



## ASPECTOS TÉCNICOS DAS PLANTAS UTILIZADAS EM ENGENHARIA NATURAL

---

*Rita dos Santos Sousa*  
*Fabrcio Jaques Sutili*

**T**écnicas construtivas de Engenharia Natural solucionam problemas estruturais de estabilização geotécnica e hidráulica, controlam processos erosivos superficiais e, simultaneamente, projetam ecossistemas em equilíbrio dinâmico. O papel desempenhado pelas plantas é fundamental para o sucesso destas intervenções. Por isso, a compreensão técnica das suas funções e efeitos é extremamente importante para sua adequada especificação como material construtivo. Pretende-se rever aqui os principais conceitos da Engenharia Natural e a utilização das plantas como material construtivo vivo. As plantas, de acordo com as suas características morfológicas e mecânicas, apresentam várias funções técnicas. Tais funções são classificadas e agrupadas segundo a metodologia proposta por Sousa<sup>1</sup> e apresentadas por meio de uma revisão bibliográfica baseada em literatura especializada dos principais autores da área. No caso específico das funções da vegetação, foram utilizados autores como Coppin & Richards<sup>2</sup>, Morgan & Rickson<sup>3</sup> e Sauli & Cornelini<sup>4</sup>.

# 1 Engenharia Natural e a importância das plantas

## 1.1 Definição de Engenharia Natural

A Engenharia Natural é definida como um subdomínio da Engenharia que tem objetivos técnicos, ecológicos, criativos, construtivos e econômicos, 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.<sup>5</sup>

É uma disciplina transversal que utiliza informações, conhecimentos e tecnologia de diversas disciplinas, tendo em vista 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.<sup>6</sup>

A Engenharia Natural é baseada no aproveitamento biológico, particularmente em conhecimentos botânicos para a 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.<sup>7</sup> Compreende técnicas de baixo impacto ambiental que baseiam-se essencialmente nas propriedades biotécnicas de algumas espécies de plantas.<sup>8</sup>

A Engenharia Natural utiliza 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.<sup>9</sup>

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<sup>10</sup>. Devido à utilização de plantas, tais técnicas apresentam deformabilidade e capacidade de regeneração das partes danificadas, ao contrário das estruturas tradicionais construídas unicamente com materiais inertes.

- <sup>1</sup> SOUSA, R. S. *Metodologia para especificação de plantas com potencial biotécnico em Engenharia Natural*. Dissertação de Mestrado – Santa Maria, Brasil: Universidade Federal de Santa Maria, 2015.
- <sup>2</sup> 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.
- <sup>3</sup> MORGAN, R. P. C. & RICKSON, R. J. *Slope stabilization and erosion control – A bioengineering approach*. 1ª. ed. London, UK: Chapman & Hall, 1995.
- <sup>4</sup> SAULI, G.; CORNELINI, P. & PRETI, F. *Manuale d'Ingegneria Naturalistica applicabile al settore idraulico*. Roma, Itália: Regione Lazio, 2002.
- <sup>5</sup> SCHIECHTL, H. *Bioengineering for land reclamation and conservation*. Edmonton, Canada: Department of the Environment, Government of Alberta. University of Alberta Press, 1980.
- <sup>6</sup> 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.
- <sup>7</sup> KRUEDENER, A. *Ingenieurbiologie*. Munich-Basel: Verl. E. Reinhardt, 1951 apud SCHIECHTL, H. & STERN, R. *Ground bioengineering techniques for slope protection and erosion control*. Oxford, UK: Blackwell Science Ltd, 1996.
- <sup>8</sup> DE ANTONIS, L. & MOLINARI, V. *Ingegneria Naturalistica – Nozione e Tecniche di Base*. Itália: Società Consortile per Azione, Regione Piemonte, 2007.
- 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.

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.

<sup>9</sup> 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.

<sup>10</sup> FERNANDES, J. & FREITAS, A. *Introdução à Engenharia Natural*. Portugal: EPAL – Empresa Portuguesa das Águas Livres, S. A., 2011.

<sup>11</sup> LEWIS, L. *Soil Bioengineering An Alternative for Roadside Management – A Practical Guide*. San Dimas, California, USA: United States Department of Agriculture, 2000.

<sup>12</sup> ABATE, I. *Storia e Cultura dell' Ingegnierbiologie*. In: *Ingegneria Naturalistica: una perfetta disciplina ambientale*. Campobasso, Itália: 2013. 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.

LEWIS, L. *Op. cit.*

<sup>13</sup> BISCHETTI, G. B.; DI FIDIO, M. & FLORINETH, F. *On the Origin of Soil Bioengineering*. *Landscape Research*, v. 0, n. 0, p. 1-13, 2012.

## 1.2 Uso de plantas em Engenharia Natural

As plantas são essenciais na Engenharia Natural e a escolha adequada das mesmas é fundamental para o sucesso das intervenções. A vantagem do uso de plantas para estabilizar margens de cursos de água e taludes foi reconhecida há muitos séculos na Europa e na Ásia. Historiadores chineses registraram a utilização dessas técnicas para reparação de diques no Rio Amarelo no século 28 A.C.<sup>11</sup>.

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.*<sup>12</sup>

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 faz referência à utilização de plantas (salgueiros e choupos) em taludes fluviais, como se pode observar na figura 1.<sup>13</sup>

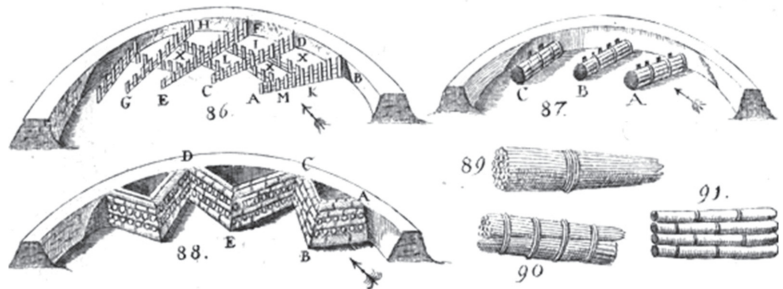


Figura 1: Aplicação de vegetação em obras hidráulicas.<sup>14</sup>

O conhecimento sobre a vegetação é fundamental para a escolha adequada das plantas. Espécies 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.<sup>15</sup>

As plantas atuam como um sistema vivo e apresentam, além da estabilização e proteção do solo, a vantagem de se desenvolverem de um modo equilibrado com os fatores de desequilíbrio, adaptando-se dentro de certos limites, à variação destes.<sup>16</sup>

- <sup>14</sup> 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.
- <sup>15</sup> COPPIN, N. J. & RICHARDS, I. G. (Eds.). *Op. cit.*  
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.  
MORGAN, R. P. C. & RICKSON, R. J. *Op. cit.*
- <sup>16</sup> FERNANDES, J. & FREITAS, A. *Op. cit.*
- <sup>17</sup> SAULI, G. & CORNELINI, P. *Manuale di Indirizzo delle Scelte Progettuali per Interventi di Ingegneria Naturalistica... Op. cit.*
- <sup>18</sup> MENEGAZZI, G. & PALMERI, F. *Il Dimensionamento delle Opere di Ingegneria Naturalistica*. Roma, Itália: Regione Lazio, 2013.
- <sup>19</sup> MENEGAZZI, G. & PALMERI, F. *Il Dimensionamento delle Opere di Ingegneria Naturalistica*. *Op. cit.*
- <sup>20</sup> SAULI, G.; CORNELINI, P. & PRETI, F. *Manuale d'Ingegneria Naturalistica applicabile al settore idraulico... Op. cit.*
- <sup>21</sup> 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, G. & CORNELINI, P. *Manuale di Indirizzo delle Scelte Progettuali per Interventi di Ingegneria Naturalistica... Op. cit.*).

### 1.3 Características e princípios

O recurso à utilização das plantas na Engenharia Natural é característica distintiva desta disciplina, 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.<sup>17</sup>

O uso de técnicas de Engenharia Natural visa, através da vegetação, de forma particular, a reconstituição de novas unidades ecossistêmicas capazes de se autossustentarem através de processos naturais. Isso resulta em um impacto positivo na melhoria das características geopedológicas, hidrológicas, hidráulicas, florísticas, faunísticas e paisagísticas do território.<sup>18</sup>

Nas fases de programação, de projeto e de execução das intervenções de Engenharia Natural, a utilização de plantas como material construtivo ajuda a atender aos seguintes critérios gerais<sup>19</sup>:

1º) utilização da menor tecnologia necessária para resolução de um problema, denominada de Lei do Mínimo de Energia. Deverá ser adotada a técnica de menor nível de energia (complexidade, tecnicismo, artificialidade, rigidez e custo), empregando sempre soluções de menor impacto para a resolução de um problema, considerando inclusive a hipótese de não intervir.<sup>20</sup> As intervenções, quando necessárias, são realizadas para solucionar o problema, evitando-se sobredimensionamento (erro deontológico) ou subdimensionamento (erro técnico) conforme figura 2;<sup>21</sup>

2º) 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 rápidos e que não comprometem as funções biológicas do ecossistema;

3º) desenvolvimento de projeto, através da análise inter e transdisciplinar, incluindo características climatológicas, geológicas, geomorfológicas, geotécnicas, hidrológicas, hidráulicas, florísticas, faunísticas, dos ecossistemas e da paisagem;

4º) a definição de parâmetros e cálculos para dimensionamento das estruturas, considerando as ações e os efeitos da vegetação com o objetivo de verificar a viabilidade das intervenções;



Figura 2: Esquema representativo do nível mínimo de energia. Adaptado de Sauli; Cornellini & Preti.<sup>22</sup>

<sup>22</sup> SAULI, G.; CORNELINI, P. & PRETI, F. *Manuale d'Ingegneria Naturalistica applicabile al settore idraulico*. Op. cit.

5º) utilização de 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;

6º) seleção de técnicas e especificação do 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, o período de repouso vegetativo).

<sup>23</sup> SUTILI, F. & GAVASSONI, E. *Pesquisa e aplicação da Engenharia Natural no Brasil*. Proceedings Cascais World Forum 2012. In: FÓRUM MUNDIAL DE CASCAIS: ENGENHARIA NATURAL E GESTÃO DO TERRITÓRIO – NOVOS DESAFIOS – II CONGRESSO APENA – VII CONGRESSO AEIP – VII CONGRESSO EFIB. Cascais, Portugal: 2012.

#### 1.4 Campos de aplicação

A Engenharia Natural pode ser aplicada em obras de terra, especificamente na 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).<sup>23</sup>

Estas intervenções, devido à utilização de plantas como material construtivo, apresentam esquemas mais flexí-

veis e permeáveis, que podem ser mais facilmente integrados, não sendo danificados devido a recalques e movimentações de solo. Tais esquemas construtivos 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 ainda para um aumento da biodiversidade e da conectividade das redes ecológicas.<sup>24</sup>

Em encostas naturais e taludes, estas técnicas promovem estabilização do solo e 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. 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 coesão das suas partículas. As raízes promovem também a infiltração profunda das águas subsuperficiais.<sup>25</sup>

As técnicas de Engenharia Natural servem, igualmente, para estabilizar ou recuperar espaços costeiros degradados por pressões ou por 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.<sup>26</sup>

Em situações de áreas alteradas por incêndios, da mesma forma, a Engenharia Natural pode ter um papel fundamental nas intervenções corretivas de emergência no combate à erosão do solo exposto.<sup>27</sup>

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.<sup>28</sup>

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.<sup>29</sup>

No caso de aterros sanitários, esse conjunto de técnicas é utilizado no final da exploração, ou seja, na fase de

<sup>24</sup> SAULI, G. & CORNELINI, P. *Manuale di Indirizzo delle Scelte Progettuali per Interventi di Ingegneria Naturalistica...* Op. cit.

<sup>25</sup> BIFULCO, C. *Engenharia Natural na reabilitação de taludes e vertentes*. In: 7º CONGRESSO RODOVIÁRIO PORTUGUÊS. Lisboa, Portugal: LNEC, 2013.

<sup>26</sup> FERNANDES, J. & FREITAS, A. Op. cit.

<sup>27</sup> SAULI, G. & CORNELINI, P. *Manuale di Indirizzo delle Scelte Progettuali per Interventi di Ingegneria Naturalistica...* Op. cit.

<sup>28</sup> FERNANDES, J. & FREITAS, A. Op. cit.

<sup>29</sup> FERNANDES, J. & FREITAS, A. Op. cit.

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.<sup>30</sup>

<sup>30</sup> SAULI, G. & CORNELINI, P. *Manuale di Indirizzo delle Scelte Progettuali per Interventi di Ingegneria Naturalistica... Op. cit.*

A implementação de infraestruturas (rodovias, ferrovias ou dutovias) provoca interferência direta no ambiente natural da paisagem, tais 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.<sup>31</sup>

<sup>31</sup> SAULI, G. & CORNELINI, P. *Manuale di Indirizzo delle Scelte Progettuali per Interventi di Ingegneria Naturalistica... Op. cit.*

Como grandes campos de aplicação que incluem todas as tipologias apresentadas, pode-se considerar que a Engenharia Natural pode ser utilizada para resolver problemas técnicos de controle de erosão superficial, estabilização hidráulica e estabilização geotécnica.<sup>32</sup>

<sup>32</sup> SOUSA, R. S. *Op. cit.*

## 2 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,<sup>33</sup> 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<sup>34</sup>, na evapotranspiração e no armazenamento de água no solo<sup>35</sup>. 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 consequentemente a sua resistência.

<sup>33</sup> SAULI, G. & CORNELINI, P. *Manuale di Indirizzo delle Scelte Progettuali per Interventi di Ingegneria Naturalistica... Op. cit.*

<sup>34</sup> 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, N. L. S. et al. *Hidrologia básica*. 11ª. ed. São Paulo: Edgard Blucher Ltda., 2008).

<sup>35</sup> DURLO, M. & SUTILI, F. *Bioengenbaria – Manejo biotécnico de cursos de água*. 3ª. ed. Santa Maria: Pallotti, 2014.

<sup>36</sup> THORNES, J. B. *Competitive vegetation-erosion model for Mediterranean conditions, in Erosion Assessment and Modelling: Erosion Assessment and Modelling*. [s. l.] Commission of the European Communities, 1988 apud MORGAN, R. P. C. & RICKSON, R. J. *Op. cit.*

Existe, portanto, uma relação muito próxima entre a vegetação e os seus efeitos na redução das taxas de erosão. Por um lado, as plantas por meio de 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<sup>36</sup> para o sudeste da Espanha. Esse autor assume que a erosão conduz a uma desregulação do balanço hídrico do solo, resultando em li-

<sup>37</sup> MORGAN, R. P. C. & RICKSON, R. J. *Op. cit.*

<sup>38</sup> COPPIN, N. J. & RICHARDS, I. G. (Eds.). *Op. cit.*

GRAY, D. H. & SOTIR, R. B. *Op. cit.*

SAULI, G. & CORNELINI, P. *Manuale di Indirizzo delle Scelte Progettuali per Interventi di Ingegneria Naturistica... Op. cit.*

mitações 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 aumentando a quantidade de plantas.<sup>37</sup>

Do ponto de vista da mecânica de solos, as plantas melhoram as propriedades de engenharia dos solos, contribuindo para a sua estabilidade.<sup>38</sup>

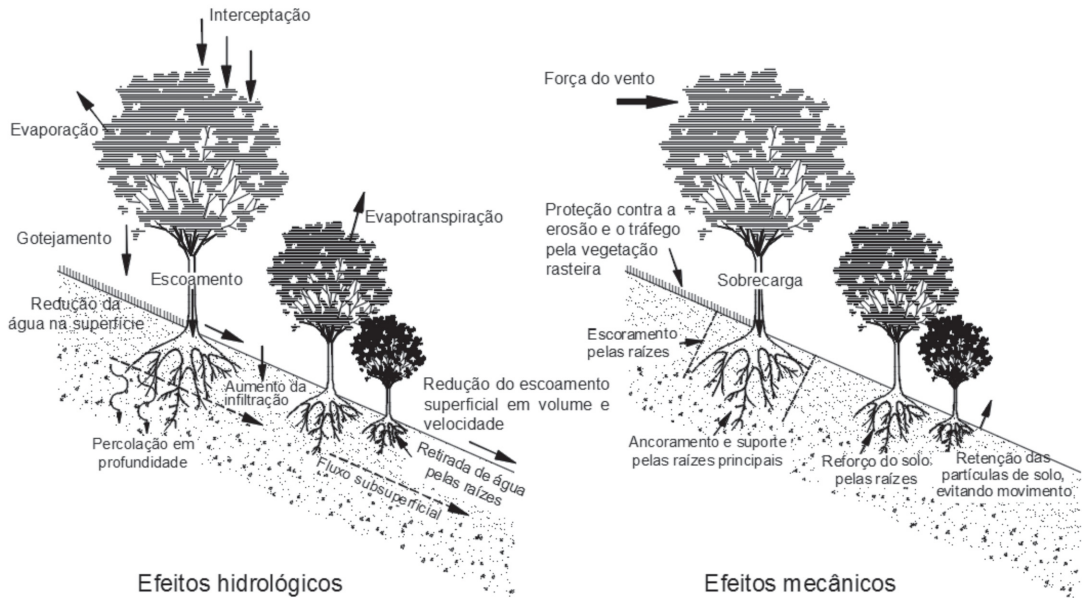


Figura 3: Efeitos físicos (hidrológicos e mecânicos) da vegetação<sup>39</sup> (adaptado de Coppin & Richards).

<sup>39</sup> COPPIN, N. J. & RICHARDS, I. G. (Eds.). *Op. cit.*

A Engenharia Natural, utilizando-se das plantas como material construtivo vivo, apresenta várias funções técnicas (hidrológicas e mecânicas) além de funções adicionais que podem ser de natureza ecológico-ambientais, estéticas e socioeconômicas (quadro 1).

<sup>40</sup> SOUSA, R. S. *Op. cit.*

Quadro 1: Classificação de funções técnicas e adicionais.<sup>40</sup>

FUNÇÕES TÉCNICAS		FUNÇÕES ADICIONAIS
HIDROLÓGICA	MECÂNICA	
Interceptar Evapotranspirar Infiltrar Drenar	Estruturar Absorver Encaminhar	Ecológica-ambiental Estética Socioeconômica

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 classificação considerar que o efeito técnico final desempenhado pelas plantas é a estabilização geotécnica de solos, estabilização hidráulica e controle de processos erosivos.

## 2.1 Funções técnicas

As funções técnicas desempenhadas pelas plantas podem ser hidrológicas e/ou mecânicas, como indicado por diversos autores.<sup>41</sup>

Uma vez que se pretende caracterizar as plantas como material construtivo, considera-se que as suas funções poderão ter efeitos técnicos nas propriedades de engenharia dos solos, especialmente na resistência. Estas funções também poderão atuar e ter efeito nas solicitações atuantes no solo, que 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 interligadas, podendo, muitas delas, ocorrer simultaneamente. Ou seja, uma planta que apresenta funções do ponto de vista hidrológico apresenta simultaneamente funções mecânicas. Isso se deve ao fato de que as funções técnicas das plantas são originadas por um conjunto de características morfológicas (arquitetura das copas ou do sistema radicular) ou de propriedades mecânicas (flexibilidade dos ramos ou resistência à tração das raízes), que resultam em um grupo de ações que atuam em conjunto, uma vez que tais características morfo-mecânicas não existem de forma dissociada.

### 2.1.1 Funções hidrológicas

Do ponto de vista hidrológico, as plantas modificam o balanço e a 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

<sup>41</sup> 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.  
COPPIN, N. J. & RICHARDS, I. G. (Eds.). *Op. cit.*  
MENEGAZZI, G. & PALMERI, F. *Op. cit.*  
MORGAN, R. P. C. & RICKSON, R. J. *Op. cit.*  
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.  
SAULI, G. & CORNELINI, P. *Manuale di Indirizzo delle Scelte Progettuali per Interventi di Ingegneria Naturalistica... Op. cit.*

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.

Com base na bibliografia consultada, considerou-se que as plantas cumprem as funções técnicas hidrológicas de interceptar, infiltrar, evapotranspirar e drenar. Tais funções técnicas produzem ações que causam efeitos positivos ou negativos na estabilidade de taludes como se pode verificar na figura 4.<sup>42</sup>

<sup>42</sup> SOUSA, R. S. *Op. cit.*

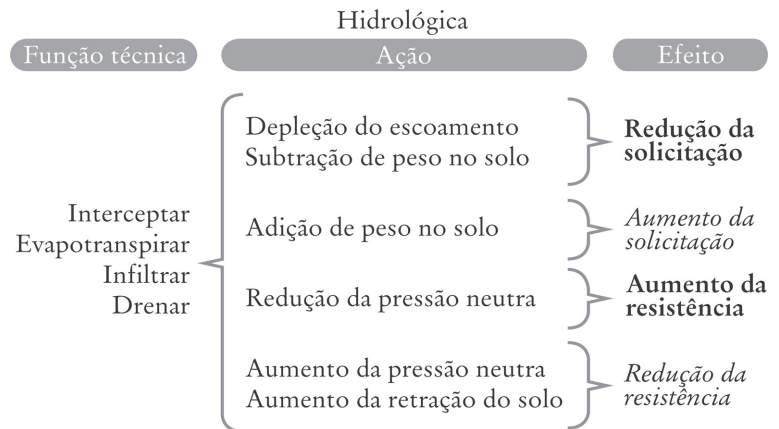


Figura 4: Funções hidrológicas das plantas na estabilidade dos taludes. (em negrito: efeitos positivos; em itálico: efeitos negativos)

#### a. Interceptar

Autores como Coppin & Richards, Morgan & Rickson e Venti *et al.*<sup>43</sup> afirmam que 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.<sup>44</sup> A precipitação que atinge o solo manifesta-se de três formas distintas:

- diretamente, quando atravessa os espaços existentes entre as folhas e entre plantas;
- descendo pelos troncos ou caules das plantas e
- gotejando das folhas.

<sup>43</sup> COPPIN, N. J. & RICHARDS, I. G. (Eds.). *Op. cit.*

MORGAN, R. P. C. & RICKSON, R. J. *Op. cit.*  
VENTI, D. et al. *Op. cit.*

<sup>44</sup> COPPIN, N. J. & RICHARDS, I. G. (Eds.). *Op. cit.*

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, alcançando valores que podem exceder a capacidade de infiltração no solo e provocar escoamento superficial.<sup>45</sup> Este efeito é mais acentuado em condições meteorológicas menos intensas, sendo que no caso de ocorrência de ventos fortes, o movimento das folhas e ramos irá ajudar na distribuição uniforme das gotas. Plantas herbáceas, por sua vez, produzem um padrão uniforme de distribuição da precipitação na superfície do solo.

A percentagem de cobertura vegetal 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.<sup>46</sup>

A interceptação da precipitação reduz a quantidade de água que atinge o solo, diminuindo tanto o volume de escoamento superficial, como a quantidade de água que irá infiltrar, não tendo, portanto, efeito na adição de peso no talude. Uma vez que menor quantidade de água atinge o solo, a pressão neutra mantém-se igual; por consequência, não haverá alteração na resistência ao cisalhamento do solo. Apesar de não haver aumento da resistência do solo, esta ação é considerada positiva porque, devido à interceptação, não ocorre aumento da pressão neutra e não se verifica diminuição da resistência do solo.<sup>47</sup>

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

Preferencialmente, deve-se optar por plantas perenes, arbustivas ou arbóreas com copas densas e bem ramificadas. As plantas devem apresentar valores altos de índice de área foliar<sup>48</sup>, 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.

#### b. Evapotranspirar

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.<sup>49</sup>

<sup>45</sup> ARMSTRONG, C. L. & MITCHELL, J. K. Transformations of rainfall by plant canopy. *Trans. Am. Soc. Agric. Engrs.*, 30, 688-696, 1987. *apud* COPPIN, N. J. & RICHARDS, I. G. (Eds.). *Op. cit.*

<sup>46</sup> COPPIN, N. J. & RICHARDS, I. G. (Eds.). *Op. cit.*

<sup>47</sup> SOUSA, R. S. *Op. cit.*

<sup>48</sup> 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 (m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>) WATSON, D. J. *Comparative physiological studies on growth of field crops: I. Variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and within and between years.* *Annals of Botany*, v. 11, p. 41-76, 1947 *apud* 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.

<sup>49</sup> COPPIN, N. J. & RICHARDS, I. G. (Eds.). *Op. cit.*

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.

MORGAN, R. P. C. & RICKSON, R. J. *Op. cit.*  
VENTI, D. *et al. Op. cit.*

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 a desidratação, as plantas reduzem a sua transpiração, de modo que a evapotranspiração seja menor que a potencial. A diminuição do teor de umidade aumenta a sucção no solo, que afeta a condutividade hidráulica e a pressão neutra.<sup>50</sup>

<sup>50</sup> MORGAN, R. P. C. & RICKSON, R. J. *Op. cit.*

Através de modificações no teor de umidade do solo, a vegetação afeta a frequência com que este fica saturado, o 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 do 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.

<sup>51</sup> COPPIN, N. J. & RICHARDS, I. G. (Eds.). *Op. cit.*

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.

ZIEMER, R. R. *Logging effects on soil moisture losses*. Ph.D. Dissertation – Fort Collins, Colorado: Colorado State University, 1978.

<sup>52</sup> ZIEMER, R. R. *Logging effects on soil moisture...* *Op. cit.*

<sup>53</sup> Plantas, ávidas de água, que crescem principalmente ao longo dos rios e cujas raízes profundas atingem a franja de capilaridade (IBGE. *Vocabulário básico de recursos naturais e meio ambiente*. 2ª. ed. Rio de Janeiro: Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão; Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2004). Estas plantas não toleram condições secas.

<sup>54</sup> COPPIN, N. J. & RICHARDS, I. G. (Eds.). *Op. cit.*

VENTI, D. *et al. Op. cit.*

Coppin & Richards, Gray e Ziemer<sup>51</sup> afirmam que 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<sup>52</sup> indicam que a maior depleção de umidade ocorre para profundidades entre 2 a 4m abaixo do nível do solo, podendo ser ampliada até 6m de distância de uma árvore individual.

Muitas plantas, principalmente aquelas que habitam locais úmidos, são caracterizadas por altas taxas de transpiração e, portanto, apresentam alta capacidade de remover água do solo. Estas plantas são denominadas de freatófitas<sup>53</sup> e apresentam potencial para serem utilizadas para diminuir a pressão neutra.

Apesar da capacidade que as plantas 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 será, provavelmente, 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.<sup>54</sup> A redução de peso pode ser muito importante em taludes vegetados onde o solo poderá estar potencialmente instável.

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 tais fissuras, poderão levar ao aumento da permeabilidade e infiltração no solo. O sombreamento pela vegetação pode reduzir a incidência deste fenômeno resultante da exposição de solos particularmente plásticos à seca intensiva ou ao aquecimento excessivo em pleno sol.<sup>55</sup>

<sup>55</sup> COPPIN, N. J. & RICHARDS, I. G. (Eds.). *Op. cit.*

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

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

Devido à combinação de fatores como interceptação e evapotranspiração o volume do escoamento superficial de áreas com plantas é inferior ao de áreas com solo exposto. O volume do escoamento superficial corresponde a uma fração variável entre 10 e 20% da precipitação recebida em pequenas bacias hidrográficas cobertas com vegetação arbórea, arbustiva e herbácea, aumentando 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 concentração e maiores picos de cheia, como se pode observar no gráfico da figura 5.

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. O processo de evapotranspiração também remove água do solo, diminuindo a pressão neutra e aumentando a resistência ao cisalhamento do solo. Combinadas, estas ações positivas aumentam a resistência do solo e reduzem a sollicitação sobre o mesmo, podendo, assim, assumir-se que o mesmo apresenta maior estabilidade devido à existência de plantas.<sup>56</sup>

<sup>56</sup> SOUSA, R. S. *Op. cit.*

No entanto, a presença de raízes também pode ter efeito negativo, notadamente 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 tais fendas associada com precipitações intensas e com a rápida infiltração de água causa diminuição na resistência do solo.

As plantas arbustivas ou arbóreas, perenes, com copas formadas por folhagem densa e com sistemas radiculares bem desenvolvidos devem merecer preferência. É importante que estas plantas apresentem maior demanda de água – plantas freatófitas. Preferencialmente, as mesmas devem apresentar valores altos de índice de área foliar que conduzem a valores superiores de evapotranspiração.

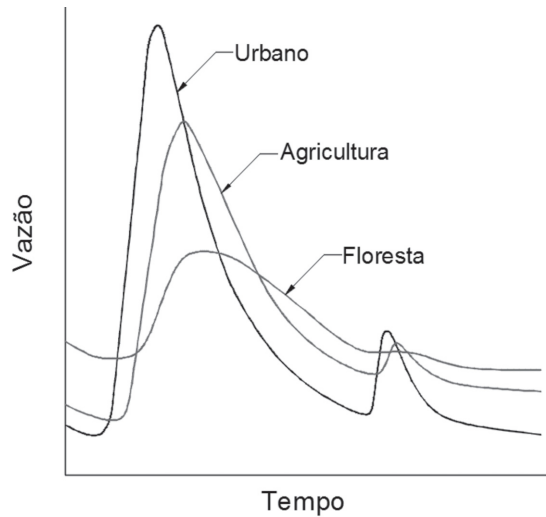


Figura 5: Escoamento superficial para diferentes tipos de cobertura vegetal.<sup>57</sup>

<sup>57</sup> COPPIN, N. J. & RICHARDS, I. G. (Eds.). *Op. cit.*

### c. Infiltrar

A presença de vegetação aumenta a infiltração e a permeabilidade do solo nas camadas superiores devido ao efeito de fatores como presença de matéria orgânica, sistema radicular, canais ou fissuras formados por raízes que apodreceram, aumento da rugosidade superficial, baixa densidade (maior porosidade) de solo e melhor estrutura da camada superficial.<sup>58</sup> Esses fatores podem dar origem a taxas de infiltração mais altas e potencialmente podem originar aumento do teor de umidade no solo comparado com áreas não vegetadas. No entanto, este efeito é compensado pela interceptação, transpiração e declividade.

<sup>58</sup> COPPIN, N. J. & RICHARDS, I. G. (Eds.). *Op. cit.*  
MORGAN, R. P. C. & RICKSON, R. J. *Op. cit.*

As plantas, além de interceptarem e reduzirem a água que chega ao solo, promovem a infiltração da mesma, devido principalmente à existência de raízes que aumentam a permeabilidade e a 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 escoia 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 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 auxilia na infiltração.

A infiltração promove ação na depleção do escoamento, reduzindo o volume de água superficial, o potencial erosivo da água e a sollicitação sobre o solo. Esta função não tem efeitos positivos na resistência do solo. Deve salientar-se que a infiltração tem efeitos negativos, na medida em que leva a um acréscimo no peso da massa de solo, aumentando a sollicitação, e também a um incremento da pressão neutra, reduzindo a resistência do solo. Por outro lado, em caso de ambientes arenosos, a infiltração não excessiva melhora a coesão aparente.<sup>59</sup> Tais efeitos negativos são, no entanto, atenuados pela interceptação e evapotranspiração, explicadas anteriormente, e pela drenagem, que será explicada em seguida.

<sup>59</sup> SOUSA, R. S. *Op. cit.*

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

#### d. Drenar

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

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 de até 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 mesma ser maior em solos vegetados do que em solos não vegetados, a profundidade de infiltração será bastante superficial.<sup>60</sup>

<sup>60</sup> 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.

COPPIN, N. J. & RICHARDS, I. G. (Eds.). *Op. cit.*

<sup>61</sup> SOUSA, R. S. *Op. cit.*

O fluxo subterrâneo 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 sollicitação sobre o solo.<sup>61</sup>

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).

As funções técnicas hidrológicas estão interligadas entre si e ocorrem 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, evapotranspiração, infiltração 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 arquitetura do sistema radicular).

### 2.1.2 Funções mecânicas

Do ponto de vista mecânico, 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 flexão<sup>62</sup>. Os agentes que provocam tais solicitações poderão ser a ação antrópica, a gravidade, a temperatura, o vento e a água.

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.

No caso particular de solicitações hidráulicas provenientes do escoamento fluvial e pluvial, as mesmas 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 ao balanço de água na hidrosfera e atmosfera.

Seguindo o mesmo critério e as definições utilizadas para as funções hidrológicas, considerou-se que as plantas apresentam funções técnicas mecânicas voltadas para estruturar, absorver e encaminhar. Estas funções técnicas geram ações que causam efeitos positivos ou negativos na estabilidade de taludes. (ver figura 16).

<sup>62</sup> 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, 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-resistencia-dos-materiais-apostila.pdf>).



## a. 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 existente no solo forma um material composto que funciona como fibras de alta resistência à tração, no interior de uma massa de solo com baixa resistência.<sup>63</sup> 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 reforçada 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 de distância, variando diretamente com a concentração de raízes. O efeito mecânico do sistema radicular consiste em 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. O ângulo de atrito interno do solo, como se pode observar na figura 6, não sofre alteração.

Outro efeito no reforço do solo pelas raízes é que estas produzem acréscimo da coesão no solo (figura 6). O aumento da coesão do solo ( $c_r$ ) devido à presença de raízes, varia em razão da densidade ou da concentração das mesmas no solo, medida diretamente em termos da massa de raízes por unidade de volume. Normalmente são consideradas apenas raízes com diâmetros inferiores a 15-20mm, 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.

Apesar das raízes não afetarem o ângulo de atrito interno do solo ( $\phi$ ), elas têm influência direta na resistência ao cisalhamento do solo ( $S$ ), uma vez que contribuem para o acréscimo da coesão do solo ( $c_r$ ), como se pode ver na equação 1. O acréscimo na resistência ao cisalhamento também pode ser medido através do fator  $\Delta s$ , que resulta de um aumento da resistência devido à resistência à tração das raízes (equação 2). O  $\Delta s$  expressa a razão entre a força máxima suportada pelas raízes e área das raízes.

$$S = c + c_r + \sigma \tan \phi \quad (\text{Equação 1})$$

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

O aumento da resistência ao cisalhamento e consequentemente da resistência do solo, devido à presença de

<sup>63</sup> CECCONI, M. *et al.* Deep Roots Planting for Surface Slope Protection. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, v. 17, p. 2.809-2.820, 2012.  
COPPIN, N. & RICHARDS, I. G. (Eds.). *Op. cit.*  
MORGAN, R. P. C. & RICKSON, R. J. *Op. cit.*  
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: IAEG 2006 - ENGINEERING GEOLOGY FOR TOMORROW'S CITIES. Nottingham, UK: 2006. Disponível em: <http://www.icevirtual-library.com/content/article/10.1680/geng.2004.157.4.199>. Acesso em: 6 maio. 2013.  
VENTI, D. *et al.* *Op. cit.*  
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.

- <sup>64</sup> COPPIN, N. & RICHARDS, I. G. (Eds.). *Op. cit.*
- <sup>65</sup> COPPIN, N. & RICHARDS, I. G. (Eds.). *Op. cit.*
- <sup>66</sup> BOSSCHER, P. & GRAY, D. Soil Arching in Sandy Slopes. *Journal of Geotechnical Engineering*, v. 112, n. 6, p. 626-645, 1 jun. 1986.
- COPPIN, N. & RICHARDS, I. G. (Eds.). *Op. cit.*
- 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.
- GRAY, D. H. & MEGAHAN, W. F. *Forest vegetation removal and slope stability in the Idabo Batholith*. [s.l.] [Ogden, Utah]: U.S. Dept. of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, 1981.
- GRAY, D. H. & LEISER, A. T. *Biotechnical slope protection and erosion control*. New York, USA: Van Nostrand Reinhold, 1982.
- MORGAN, R. P. C. & RICKSON, R. J. *Op. cit.*
- 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.
- <sup>67</sup> GRAY, D. H. Role of woody vegetation in reinforcing soils and stabilizing slopes *Proceedings Symposium. Anais...* In: SOIL REINFORCING AND STABILIZING TECHNIQUES IN ENGINEERING PRACTICE. NSW Inst. Tech., Sydney, Australia: 1978 *apud* COPPIN, N. J. & RICHARDS, I. G. (Eds.). *Op. cit.*
- <sup>68</sup> Material superficial, originado das rochas e dos depósitos inconsolidados, que foi afetado pelo intemperismo químico e físico. Abaixo do

raízes pode ser calculado pelo acréscimo da coesão ou pelo acréscimo na resistência à tração. Estes dois fatores ( $c_r$  e  $\Delta S$ ) são equivalentes, conforme se observa na figura 6.

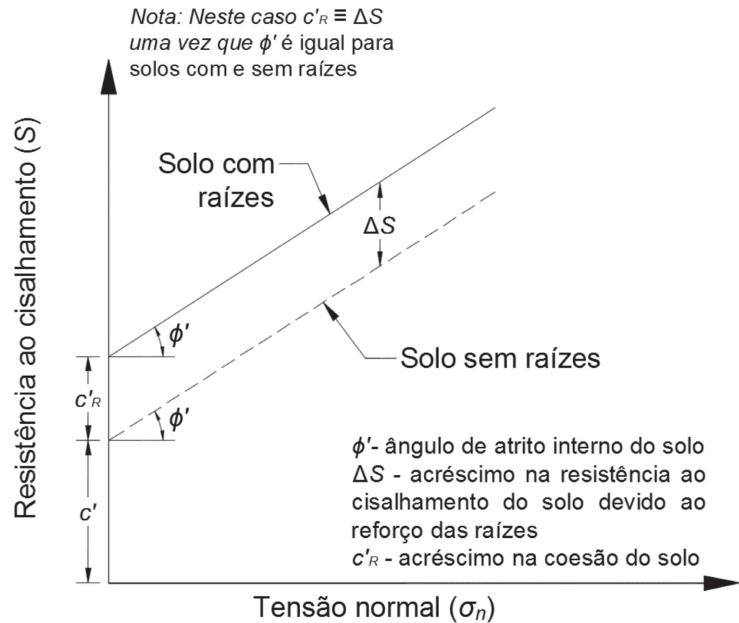


Figura 6: Efeito do reforço das raízes na resistência ao cisalhamento do solo.<sup>64</sup>

A magnitude do efeito mecânico de reforço através das plantas é função das propriedades das raízes como, por exemplo, densidade, resistência à tração, módulo de elasticidade, relação entre comprimento e diâmetro, alinhamento, ou seja, linearidade/angularidade e orientação da direção das tensões principais.<sup>65</sup>

O sistema radicular também promove a ancoragem, o arqueamento e escoramento do solo.<sup>66</sup> A raiz principal e as raízes secundárias de diversas espécies lenhosas 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<sup>67</sup>, descreve o efeito de escoramento de um talude regolítico de granito pouco profundo, com a cobertura de pinheiros, onde o espaçamento entre árvores é grande e 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 regolito<sup>68</sup> e do lençol freático, bem como da capacidade das raízes penetrarem a rocha-matriz (figura 7).



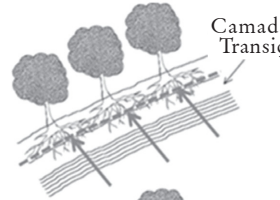

	Descrição	Efeito das raízes na estabilização
	<p>A. Camada fina de regolito totalmente reforçada pelas raízes; base de rocha firme impenetrável por raízes</p>	<p>Leve; a superfície potencial de ruptura encontra-se na interface dos dois tipos de solo</p>
	<p>B. Semelhante ao tipo A; no entanto, a rocha-matriz apresenta descontinuidades, que são penetráveis pelas raízes. Os troncos e as raízes atuam como estacas estabilizantes</p>	<p>Grande</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 7: Influência do reforço das raízes para taludes em diferentes condições de subsolo.<sup>69</sup>

regolito estão os materiais rochosos que não foram afetados pelo intemperismo, ou seja, a rocha-matriz ou rocha-mãe.

<sup>69</sup> TSUKAMOTO, Y. & KUSAKABE, O. *Vegetative influences on debris slide occurrences on steep slopes in Japan*. Paper presented to Symposium on Effects of forest land use on erosion and slope stability, Honolulu, Hawaii, 1984 *apud* MORGAN, R. P. C. & RICKSON, R. J. *Op. cit.*

<sup>70</sup> 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.

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 8). Esta zona de arqueamento cria maior resistência nas suas laterais, o que, por sua vez, traz um aumento da estabilidade do talude.

As raízes finas e médias 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 do 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 nas margens.<sup>70</sup>

COPPIN, N. J. & RICHARDS, I. G. (Eds.). *Op. cit.*  
 MORGAN, R. P. C. & RICKSON, R. J. *Op. cit.*

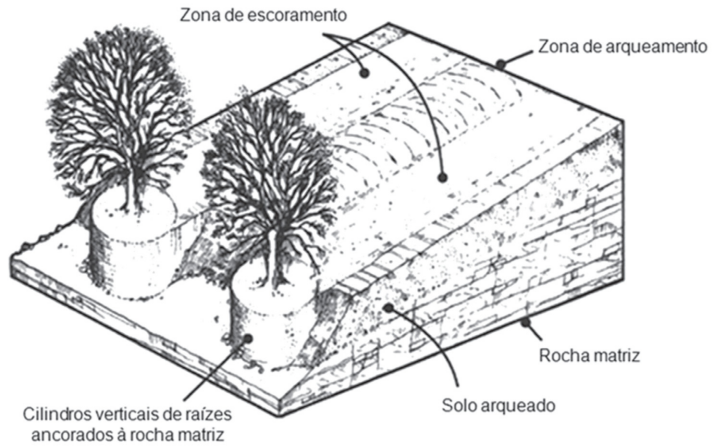


Figura 8: Representação esquemática dos efeitos de ancoragem, arqueamento e escoramento das plantas no solo.<sup>71</sup>

<sup>71</sup> WANG, W. L. & YEN, B. C. *Soil arching in slopes*. J. Geotechnical Engineering Division, ASCE, 100, 61-78. 1974. *apud* MORGAN, R. P. C. & RICKSON, R. J. *Op. cit.*

Árvores e arbustos grandes têm a capacidade de confinar e reter pedregulhos, pedras ou outros materiais instáveis e soltos, impedindo-os de rolarem ou deslizarem pelas encostas. As plantas mais eficientes para esta função devem apresentar 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; e tolerância ao aterramento, ou seja, que tenham a capacidade de produzir novas raízes a partir de caules enterrados.

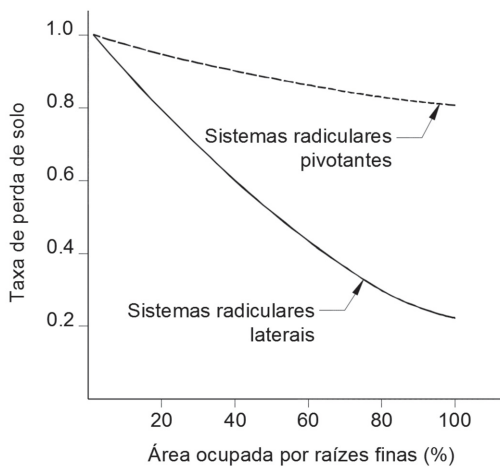


Figura 9: Relação entre perda de solo e percentagem de área ocupada por raízes finas.<sup>72</sup>

No entanto, a presença de plantas e seus sistemas radiculares também podem potencializar ações negativas devido ao efeito de cunha. 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, porém a vegetação de porte herbáceo e arbustivo 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 suscetíveis de serem afetados por este fenômeno.<sup>73</sup>

<sup>73</sup> COPPIN, N. & RICHARDS, I. G. (Eds.). *Op. cit.*  
FIORI, A. P. & CARMIGNANI, L. *Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas – aplicações na estabilização de taludes*. 2ª. ed. Curitiba: Editora UFPR, 2011.  
MORGAN, R. P. C. & RICKSON, R. J. *Op. cit.*

<sup>74</sup> Classe de diâmetro de raízes:  
Finas: < 5,0mm  
Médias: 5,0-10,0mm  
Grossas: 10,0-20,0mm  
Muito grossas: > 20,0mm  
(adaptado de BÖHM, W. *Methods of studying root systems*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1979. v. 33)

<sup>75</sup> SOUSA, R. S. *Op. cit.*

Plantas com sistemas radiculares compostos por raízes finas (até 5,0mm de diâmetro)<sup>74</sup> são mais eficientes para 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. Tais ações têm efeito no aumento da resistência do solo.<sup>75</sup>

O crescimento de raízes em solos rochosos produz efeitos negativos, uma vez que pode provocar a formação de fendas e descontinuidades, 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 majoritariamente positiva, sendo que as mesmas estruturam o solo provocando um aumento da resistência ao cisalhamento e consequentemente o 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, de modo a evitar a erosão superficial. Para solicitações hidráulicas em cursos de água, sistemas radiculares orientados lateralmente são mais eficientes. Raízes profundas, no entanto, são mais eficientes na ação de ancoragem, arqueamento e escoramento das camadas de solo, evitando movimentos de massa.

## b. Absorver

As plantas, além de estruturarem o solo devido à presença de 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 vegetação protege o solo de forma mecânica através da absorção direta do impacto humano, do pisoteio dos animais e da presecção 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. 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 elementos críticos. Devido à falta de estudos que tratem a vegetação do ponto de vista da Engenharia, a análise do modo como a mesma pode absorver tensões antes de ocorrer ruptura é, em grande parte, empírica.<sup>76</sup>

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 50mm de solo; portanto, este efeito é restrito a baixas profundidades.<sup>77</sup> Também é reconhecido na estabilidade de margens fluviais, embora inexistam estudos que quantifiquem e prevejam este efeito.

Por outro lado, a vegetação promove o isolamento do solo modificando o microclima, pois tal cobertura reduz as oscilações de temperatura e umidade no solo. Existe, ainda, 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.<sup>78</sup>

A erosão causada pelas 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 na sua separação da massa de solo, pelo impacto das

<sup>76</sup> COPPIN, N. & RICHARDS, I. G. (Eds.). *Op. cit.*  
MORGAN, R. P. C. & RICKSON, R. J. *Op. cit.*  
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.

<sup>77</sup> COPPIN, N. & RICHARDS, I. G. (Eds.). *Op. cit.*

<sup>78</sup> BONATTI, G. & MARONGIU, I. *Op. cit.*  
COPPIN, N. & RICHARDS, I. G. (Eds.). *Op. cit.*

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.

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 produzem velocidades de impacto reduzidas; no entanto, no caso de plantas com copas mais altas, as gotas podem readquirir a sua velocidade terminal antes de atingirem o solo.<sup>79</sup>

<sup>79</sup> COPPIN, N. & RICHARDS, I. G. (Eds.). *Op. cit.*  
MORGAN, R. P. C. & RICKSON, R. J. *Op. cit.*

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 0,5m, 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.<sup>80</sup>

<sup>80</sup> COPPIN, N. & RICHARDS, I. G. (Eds.). *Op. cit.*

Diferentes tipos de vegetação proporcionam diferentes níveis de proteção do solo contra a sua desagregação pelo impacto das gotas de chuva. Na figura 10, esta proteção é expressa na taxa de perda de solo em função da percentagem de cobertura. Se as copas das plantas estiverem próximas 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 0,5m 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 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 provenien-

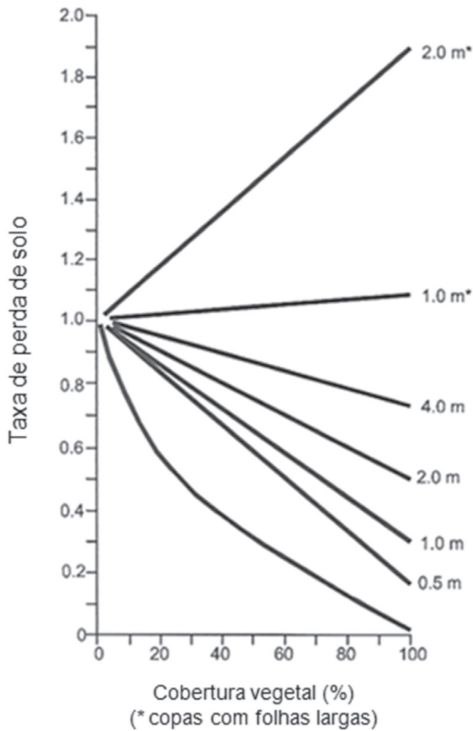


Figura 10: Taxa de perda de solo via desagregação por impacto da gota de chuva relacionada com a percentagem de cobertura de solo para diferentes alturas de copas.<sup>81</sup>

<sup>81</sup> COPPIN, N. & RICHARDS, I. G. (Eds.). *Op. cit.*

<sup>82</sup> WIERSUM, K. Effects of various vegetation layers of an *Acacia auriculiformis* forest plantation on surface erosion. Java, Indonesia. In: *Soil Erosion and Conservation*. EL-SWAIFY, S. A.; MOLDENHAUER, W. C. & LO, A. (Eds.). *Soil Conservation Society of American*. Ankeny, IA, p. 79-89. 1985 *apud* COPPIN, N. J. & RICHARDS, I. G. (Eds.). *Op. cit.*

<sup>83</sup> ABATE, I. & GROTTA, M. *Op. cit.*  
COPPIN, N. & RICHARDS, I. G. (Eds.). *Op. cit.*  
MORGAN, R. P. C. & RICKSON, R. J. *Op. cit.*

tes 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 2m de altura e 90 a 100% de cobertura.

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 em até 93%, relativamente ao solo nu.<sup>82</sup>

A vegetação reduz igualmente a velocidade do escoamento superficial, consequência da rugosidade gerada pelas folhas, ramos e caules das plantas.<sup>83</sup> A rugosidade hidráulica pode ser caracterizada pelo parâmetro  $n$ , coeficiente de Mannig ( $s.m^{1/3}$ ) conforme demonstrado na equação 3, onde:  $v$  - velocidade média da água (m/s);  $R$  - raio hidráulico da seção transversal (m);  $S$  - declividade da superfície de escoamento (m/m).

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

A rugosidade hidráulica e, por consequência, 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.<sup>84</sup> Como se pode observar na figura 11, 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 a altura da lâmina de água aumenta, os caules oscilam, perturbando o fluxo, 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 em aumento da velocidade do fluxo. O efeito da rugosidade hidráulica em canais é potencializada com a utilização de plantas de porte arbustivo.

O fluxo de água no solo exposto pode transportar partículas de solo soltas; 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 sedi-



SAULI, G.; CORNELINI, P. & PRETI, F. *Manuale d'Ingegneria Naturalistica applicabile al settore idraulico*. Op. cit.

<sup>84</sup> COPPIN, N. & RICHARDS, I. G. (Eds.). Op. cit. MORGAN, R. P. C. & RICKSON, R. J. Op. cit. 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.

mentos, quer devido ao efeito de retardamento do volume e da velocidade de escoamento, quer devido à proteção física do solo. Por conta desses efeitos, a taxa de perda de solo diminui exponencialmente com o aumento da percentagem de cobertura de solo. Tal 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 12, 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.

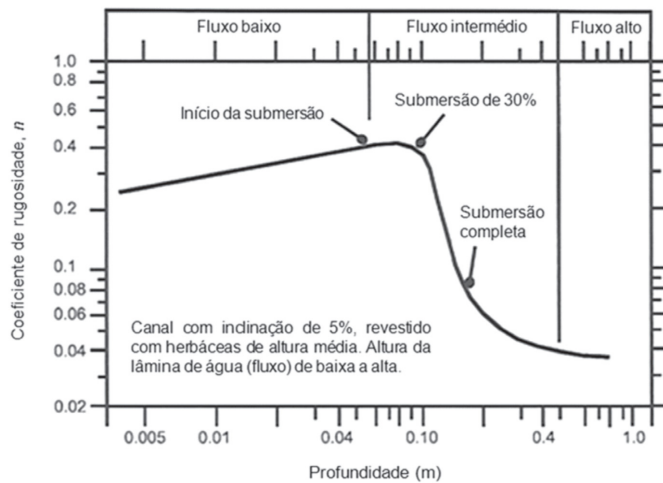


Figura 11: Relação entre coeficiente de Manning e profundidade da lâmina de água para vegetação herbácea de altura média.<sup>85</sup>

<sup>85</sup> COPPIN, N. & RICHARDS, I. G. (Eds.). Op. cit.

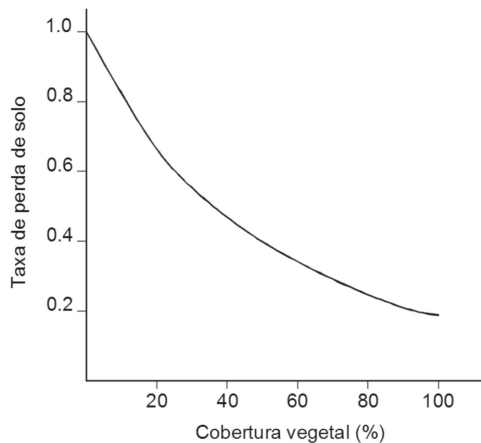


Figura 12: Alteração da taxa de perda de solo devido à redução do volume de escoamento superficial em função do aumento de percentagem de cobertura vegetal.<sup>86</sup>

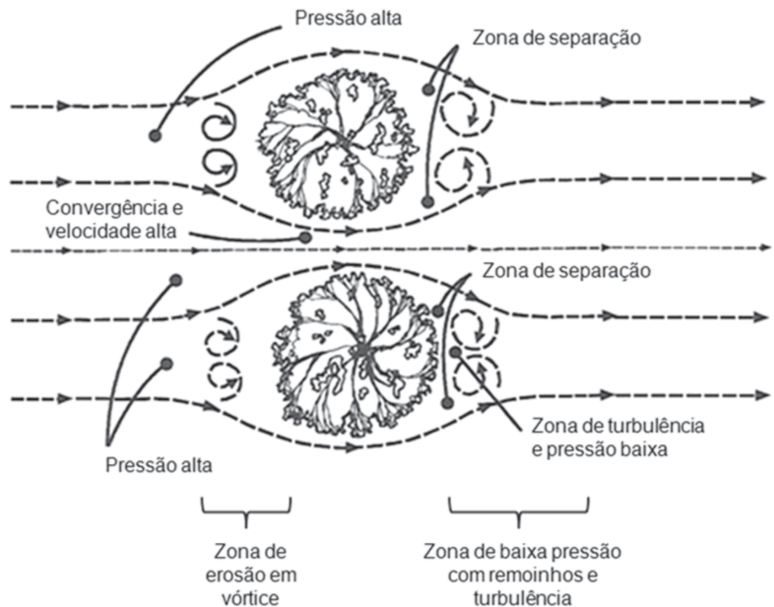
<sup>86</sup> COPPIN, N. & RICHARDS, I. G. (Eds.). Op. cit.

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 redução dos processos erosivos.

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, podendo 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 atravessem zonas urbanas em que existe ocupação humana da área reservada à passagem de água, nomeadamente do leito de cheia<sup>87</sup>.

Variações locais na vegetação podem aumentar a capacidade erosiva do fluxo superficial, devido ao aumento localizado da velocidade e devido à força de resistência. Quando o fluxo sofre uma separação em função da presença de grupos de vegetação, a pressão (tensão normal) é maior a montante do que a jusante, como se pode verificar na figura 13. Nesse caso, 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.

<sup>87</sup> Leito de cheia, maior ou inundação, corresponde ao espaço do vale que é inundável em época de cheias extraordinárias.



<sup>88</sup> COPPIN, N. & RICHARDS, I. G. (Eds.). *Op. cit.*

Figura 13: Vista em planta do fluxo de água em volta da vegetação.<sup>88</sup>

Onde a vegetação é irregular, como no caso de tufos de herbáceas, o potencial erosivo é aumentado em decorrência de todos esses fatores. O efeito combinado dos fatores pode ser suficiente para igualar o potencial erosivo do escoamento superficial num talude sem vegetação de igual inclinação.<sup>89</sup> Este fenômeno tende a afetar taludes naturais e artificiais, especialmente canais fluviais e pluviais, aumentando a solicitação sobre o solo.<sup>90</sup>

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 Reynolds<sup>91</sup> 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 11) reduz a velocidade abaixo daquela requerida para o transporte de material (velocidade limite de transporte)<sup>92</sup>. 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. Neste caso, apesar da 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.<sup>93</sup>

A existência de plantas, especificamente a parte aérea, gera 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.

A presença de plantas protege superficialmente o solo, absorvendo diretamente as ações mecânicas existentes sobre o mesmo. O aumento da rugosidade hidráulica e superficial significa redução do potencial erosivo da água. Estas ações positivas promovidas pela vegetação diminuem a solicitação sobre o solo. No caso da redução da seção transversal em canais e do aumento da turbulência causado pela presença de plantas isoladas, existe um aumento da solicitação sobre o solo causada pela existência de plantas.<sup>94</sup>

<sup>89</sup> COPPIN, N. & RICHARDS, I. G. (Eds.). *Op. cit.*

<sup>90</sup> SOUSA, R. S. *Op. cit.*

<sup>91</sup> Coeficiente adimensional expresso pela relação entre as forças de inércia e as forças de viscosidade que atuam no fluido. Quando o número de Reynolds (Re) for menor que 5 as forças viscosas são dominantes e o fluxo é dito laminar; quando o 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, R. *Hidráulica básica*. 4<sup>a</sup> ed. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, USP, 2006).

<sup>92</sup> Velocidade necessária para colocar materiais em movimento ou, então, para mantê-los em movimento. (DURLO, M. & SUTILI, F. *Op. cit.*).

<sup>93</sup> SOUSA, R. S. *Op. cit.*

<sup>94</sup> SOUSA, R. S. *Op. cit.*

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 e uniforme. A flexibilidade dos ramos pode ser uma característica desejada.

### c. 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, tais tensões podem ser distribuídas para 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.<sup>95</sup> Este efeito é positivo e aumenta a resistência da massa de solo como um todo.<sup>96</sup>

No caso específico da sobrecarga devido à presença de árvores em taludes, esta poderá transmitir aos mesmos forças estabilizantes e instabilizantes, dependendo da localização dessas árvores. A sobrecarga consiste no efeito de adição de peso ao talude, resultante da presença de vegetação. Este efeito é considerado apenas no caso de vegetação arbórea, uma vez que o peso de plantas herbáceas e arbustivas é comparativamente insignificante. Apesar da sobrecarga ser considerada adversa, também poderá ser benéfica, dependendo da geometria do talude, da distribuição da vegetação e das propriedades de solo. Em um 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, sendo a sobrecarga benéfica. No entanto, a sobrecarga localizada no topo do talude desloca o centro de gravidade em sua direção e assim reduz a estabilidade global, enquanto que a localizada na base do talude aumenta a estabilidade.<sup>97</sup>

Considerando a superfície de ruptura crítica, representada na figura 14, 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

<sup>95</sup> COPPIN, N. & RICHARDS, I. G. (Eds.). *Op. cit.*

<sup>96</sup> SOUSA, R. S. *Op. cit.*

<sup>97</sup> COPPIN, N. & RICHARDS, I. G. (Eds.). *Op. cit.*  
FAN, C.-C. & LAI, Y.-F. *Op. cit.*

GRAY, D. H. & MEGAHAN, W. F. *Op. cit.*  
MORGAN, R. P. C. & RICKSON, R. J. *Op. cit.*  
VENTI, D. et al. *Op. cit.*

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 por forças estabilizantes contra o deslizamento ao longo da superfície de ruptura. Gray & Megahan<sup>98</sup> 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.

<sup>98</sup> GRAY, D. H. & MEGAHAN, W. F. *Op. cit.*

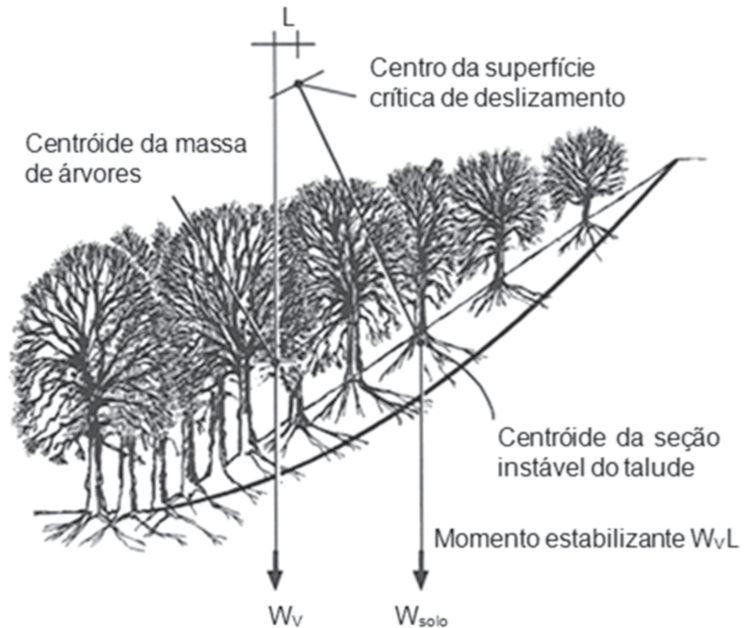


Figura 14: Efeitos da sobrecarga causada por árvores na base de uma superfície de deslizamento.<sup>99</sup>

<sup>99</sup> COPPIN, N. & RICHARDS, I. G. (Eds.). *Op. cit.*

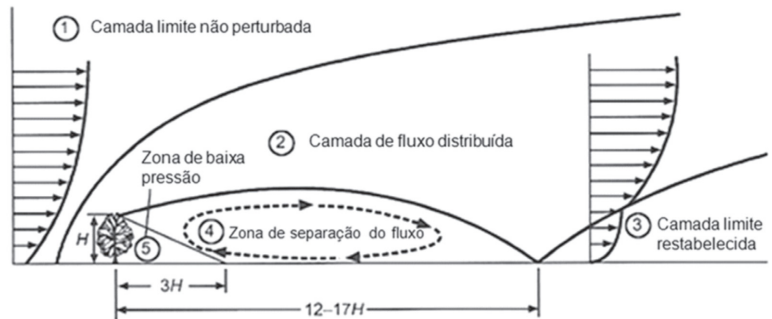
Ou seja, dependendo de fatores como a geometria do talude e da distribuição das árvores, o efeito de sobrecarga pode encaminhar forças solicitantes ou resistentes, aumentando a resistência do solo ou aumentando a sollicitação sobre o solo, respectivamente.<sup>100</sup>

<sup>100</sup> SOUSA, R. S. *Op. cit.*

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 de separar partículas do solo ou de transportar sedimentos está relacionada com a velocidade elevada ao quadrado ou ao cubo, respectivamente. Uma diminuição na velocidade do vento significa, portanto, uma diminuição exponencial 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. Forma-se uma resistência ligada à separação do fluxo causada pelos elementos individuais da vegetação, que se comportam como atenuantes do fluxo.<sup>101</sup> A resistência exercida por um quebra-vento, como barreira viva, modifica o padrão do fluxo de ar ao redor de uma barreira, pode ser dividido em diversas zonas (figura 15). A compreensão destes padrões de fluxo é utilizada na execução de projetos de barreiras vivas, para controlar erosão e providenciar abrigos.

<sup>101</sup>COPPIN, N. & RICHARDS, I. G. (Eds.). *Op. cit.*  
MORGAN, R. P. C. & RICKSON, R. J. *Op. cit.*



<sup>102</sup>COPPIN, N. & RICHARDS, I. G. (Eds.). *Op. cit.*

Figura 15: Padrão de fluxo de ar ao redor de um quebra-vento.<sup>102</sup>

As forças induzidas pelo vento sobre as plantas podem ser suficientes para criar perturbações nas camadas superiores de solo e, por conseguinte, para iniciar deslizamentos. A força exercida pelo vento normalmente é significativa para velocidades superiores a 11m/s (grau 6 da escala de Beaufort<sup>103</sup>). 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 consequência, transmitir momentos instabilizantes ao talude. A magnitude da força de resistência exercida pelas árvores depende de fatores como velocidade do vento, altura da árvore, comprimento da copa e ângulo do talude. Normalmente, a pressão exercida pelo vento não implica grande influência sobre a estabilidade dos taludes. Sendo assim, o efeito das vibrações causadas pela oscilação das árvores não é levado em consideração, porém 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. Desta forma, aumenta a infiltração de água no solo e diminui a resistência local da massa de solo ao escorregamento. Este efeito é considerado negativo e aumenta a sollicitação sobre o solo.<sup>104</sup>

<sup>103</sup>Escala empírica com 12 termos que classifica a intensidade do vento e que leva em conta a sua velocidade e os efeitos resultantes no mar e em terra.

<sup>104</sup>SOUSA, R. S. *Op. cit.*

Para encaminhar esforços solicitantes sobre o 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.

Tal como ocorre nas funções hidrológicas, também, neste caso as funções mecânicas são interdependentes e ocorrem de modo simultâneo. 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 (figura 16). 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.

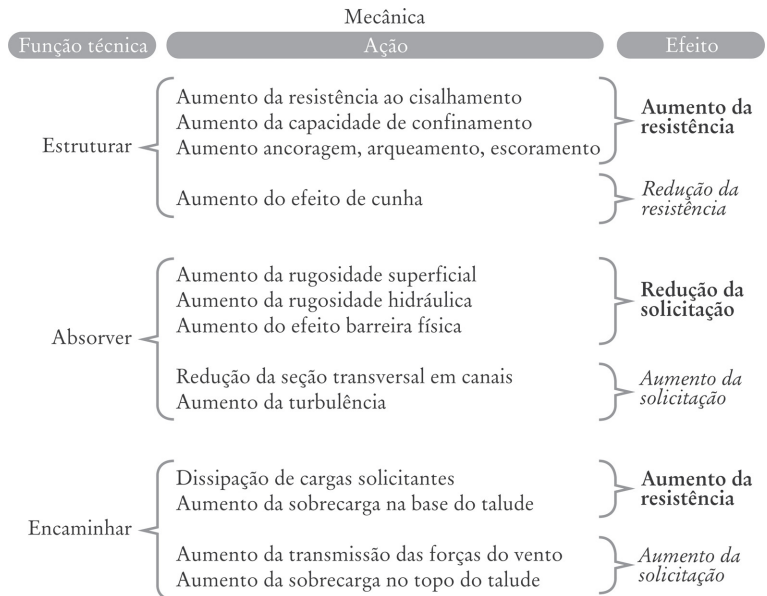


Figura 16: Funções mecânicas das plantas na estabilidade dos taludes. (em negrito: efeitos positivos; em itálico: efeitos negativos)

## 2.2 Funções adicionais das plantas

As funções adicionais das plantas, apesar de serem consideradas secundárias do ponto de vista da engenharia tradicional, são imprescindíveis numa intervenção que recorra à utilização da Engenharia Natural. Isto se deve ao fato de que desempenham funções que envolvem melhorias

ecológicas e estéticas na qualidade ambiental e ainda funções socioeconômicas. Esse fator diferencia as obras de Engenharia Natural da Engenharia Civil, que consideram principalmente funções técnicas estruturais. Uma intervenção que recorra à Engenharia Natural deve resolver problemas estruturais de estabilização geotécnica e hidráulica e, simultaneamente, projetar ecossistemas em equilíbrio dinâmico.

### 2.2.1 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. O uso de vegetação autóctone apresenta diversas vantagens, considerando 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 são introduzidas espécies exóticas numa região é difícil prever o desenvolvimento futuro das mesmas, correndo-se o risco de 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, 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 clímax<sup>105</sup> do local.

A presença de plantas poderá ter ainda outras funções ecológicas, tais como: promoção de melhorias no balanço de temperatura e umidade do solo criando, desta forma, melhores condições para a germinação das plantas e para a vida da microfauna do solo; melhoria das condições nutricionais e, conseqüentemente da fertilidade do solo; criação

<sup>105</sup>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, C. *et al.* Carta de Vegetação Natural Potencial de Caldas da Rainha. *Finisterra*, v. XLIII, n. 86, p. 31-51, 2008).



de habitats para a fauna; proteção contra a poluição atmosférica; e, utilização 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 geram 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.

A manutenção de vegetação ciliar (figura 17) permite manter a conectividade ecológica e hidráulica dos cursos de água. Também promove a estabilidade térmica da água, causada pelo sombreamento das margens dos cursos de água, além de criar refúgios para a ictiofauna e de fomentar o armazenamento de matéria orgânica para os invertebrados aquáticos.

<sup>106</sup>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: [s.n.], 2006.

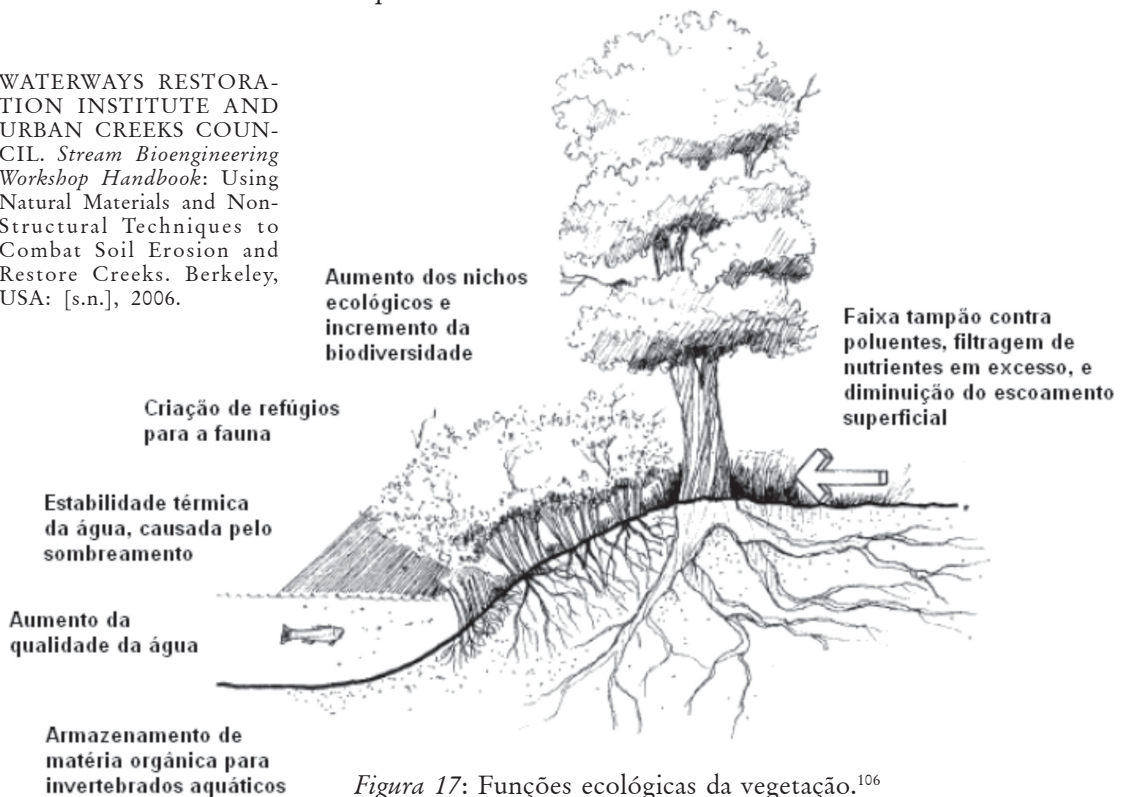


Figura 17: Funções ecológicas da vegetação.<sup>106</sup>

## 2.2.2 Função estética

A utilização de plantas em 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 restaura-

ção 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 agregar a função de ocultar ou integrar estruturas artificiais na paisagem, bem como de promover o seu enriquecimento através da criação de novos elementos, estruturas, formas e cores.

### 2.2.3 Função socioeconômica

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 mesmas 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, apresentam menores custos de manutenção e de recuperação, uma vez que as plantas conferem maior resistência e resiliência a solicitações externas.

A utilização de plantas nesse tipo de intervenção permite uma melhor gestão econômica dos recursos naturais; permite também, principalmente em contexto urbano, a obtenção de vários benefícios sociais induzidos como, por exemplo, bem-estar, promoção da saúde e redução da poluição atmosférica.

## 3 Estabilidade de taludes

A estabilidade de um talude é avaliada através do fator de segurança (FS), 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 mesma superfície (forças atuantes). A ruptura do solo ocorre quando essas forças se igualam. A análise da estabilidade pode ser feita mediante uso do método de talude infinito, considerando que um único elemento ou segmento no talude é representativo do conjunto (figura 18).

Utilizando a análise da tensão efetiva, o fator de segurança sem vegetação pode ser definido pela equação 4.

$$FS = \frac{c' + (\gamma h z - \gamma_w h_w) \cos^2 \beta \tan \phi'}{\gamma h z \sin \beta \cos \beta} \quad (\text{Equação 4})$$

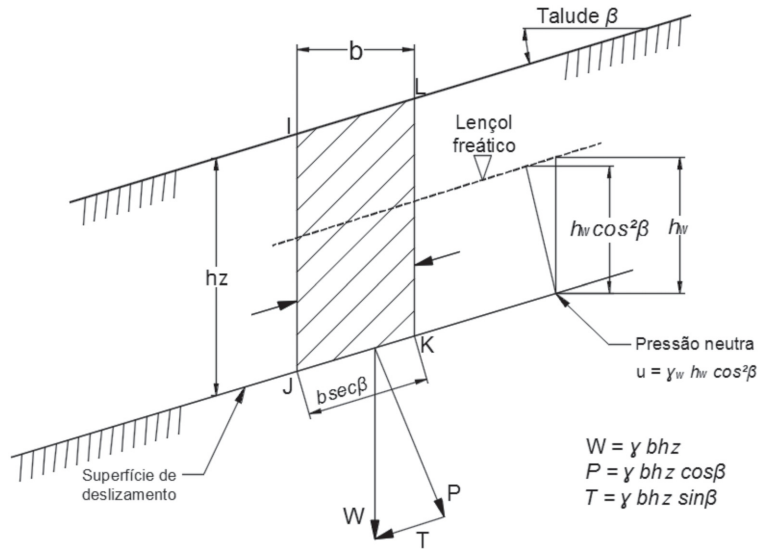


Figura 18: Fatores considerados para análise de estabilidade de taludes, pelo método do talude infinito.<sup>107</sup>

<sup>107</sup>MORGAN, R. P. C. & RICKSON, R. J. *Op. cit.*

A figura 19, por sua vez, mostra a influência da vegetação na estabilidade de um talude. Esses fatores podem ser incluídos no cálculo do fator de segurança, como demonstrado na equação 5.

$$FS = \frac{(c' + c'_r) + \{[(\gamma h z - \gamma_w h_w) + S_w] \cos^2 \beta + T \sin \theta\} \tan \phi' + T \cos \theta}{[(\gamma h z + S_w) \sin \beta + D] \cos \beta}$$

(Equação 5)

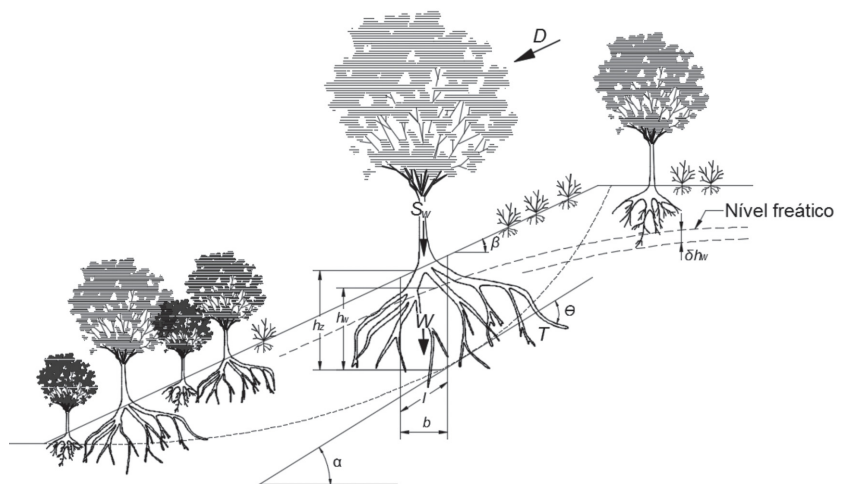


Figura 19: Fatores de maior influência da vegetação na estabilidade de taludes.<sup>108</sup>

<sup>108</sup>COPPIN, N. & RICHARDS, I. G. (Eds.). *Op. cit.*

<sup>109</sup>COPPIN, N. & RICHARDS, I. G. (Eds.). *Op. cit.*

Parâmetros aplicados na análise de estabilidade de solos<sup>109</sup> e nas equações 4 e 5:

- Efeitos devido à vegetação
- W - Peso total da fatia de solo (kN/m<sup>2</sup>);
  - c' - Coesão efetiva do solo (kN/m<sup>2</sup>);
  - ϕ' - Ângulo de atrito interno do solo (°);
  - l - Comprimento da base da fatia (m);
  - u - Pressão neutra da água na superfície de ruptura ( $\gamma_{\omega} h_{\omega}$ ) (kN/m<sup>2</sup>);
  - u<sub>v</sub> - Diminuição da pressão neutra da água causada pela evapotranspiração pela vegetação na superfície de ruptura (kN/m<sup>2</sup>);
  - c'<sub>R</sub> - Contribuição das raízes à coesão do solo (kN/m<sup>2</sup>);
  - c'<sub>S</sub> - Contribuição da sucção à coesão do solo (kN/m<sup>2</sup>);
  - S<sub>W</sub> - Sobrecarga devido ao peso da vegetação (kN/m<sup>2</sup>);
  - D - Carga do vento paralela ao talude (kN/m);
  - T - Força de tração das raízes atuando na base da superfície de ruptura (kN/m), com ângulo entre as raízes e a superfície de ruptura θ;
  - h<sub>ω</sub> - Altura de água acima da superfície de ruptura (m);
  - h<sub>z</sub> - Altura de solo acima da superfície de ruptura (m);
  - β - Ângulo de inclinação do talude (°);
  - α - Ângulo efetivo de atrito interno do solo (°);
  - θ - Ângulo entre as raízes e a superfície de ruptura (°);
  - γ - Peso específico do solo (kN/m<sup>3</sup>);
  - γ<sub>ω</sub> - Peso específico da água (=9.8 kN/m<sup>3</sup>)

<sup>110</sup>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.

COPPIN, N. & RICHARDS, I. G. (Eds.). *Op. cit.*

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

GRAY, D. H. & MEGAHAN, W. F. *Op. cit.*

GRAY, D. H. & LEISER, A. T. *Op. cit.*

GRAY, D. H. & SOTIR, R. B. *Op. cit.*

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

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.

Os valores de muitos destes parâmetros variam com a profundidade e com o tipo de solo. 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.

### 3.1 Consequência da remoção da vegetação

Além de todas as propriedades e funções abordadas anteriormente, podemos verificar e resumir a importância das plantas pela demonstração dos efeitos da sua remoção.<sup>110</sup>

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 conta da remoção desta cobertura de proteção superficial. O crescimento de uma nova cobertura

vegetal faz com que as taxas de erosão diminuam nos anos subsequentes. No entanto, esta tendência vai ser afetada 5 a 7 anos mais tarde, verificando-se rápida perda de solo devido à sua ruptura, uma vez que os sistemas radiculares das plantas antigas entram em decomposição.

<sup>111</sup>WU, T. H. *Op. cit.*

Em estudo desenvolvido por Wu<sup>111</sup>, 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, além de serem menos estáveis devido à perda de resistência dada pelas raízes e por níveis piezométricos altos. Normalmente a altura do nível freático em taludes com vegetação, acima do plano potencial de ruptura, é menor 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 conseqüentemente provoca a desagregação e o transporte de grandes quantidades de solo.

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

### *3.2 Resumo das propriedades e funções mais importantes das plantas*

A função global das plantas é o resultado do equilíbrio entre diversas funções e efeitos benéficos e adversos. 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.<sup>112</sup>

<sup>112</sup>COPPIN, N. & RICHARDS, I. G. (Eds.). *Op. cit.*  
MORGAN, R. P. C. & RICKSON, R. J. *Op. cit.*

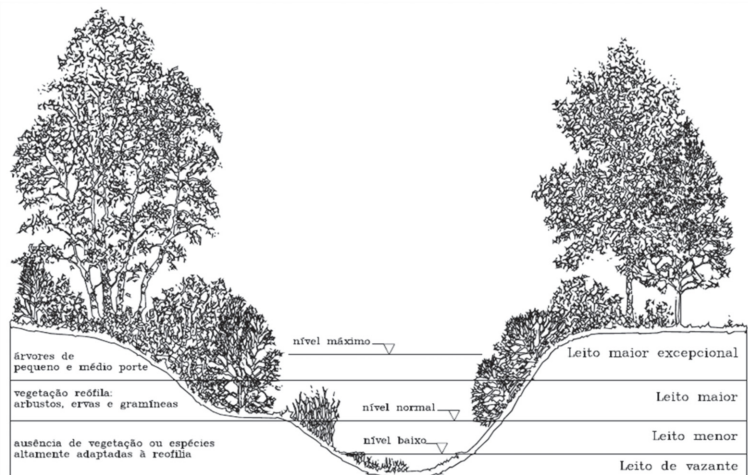
## **4 Requisitos**

A escolha adequada de plantas como material construtivo em intervenções 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, espe-

cificidades da solução construtiva e do local de aplicação. O cumprimento destes requisitos resultará no sucesso da implantação da vegetação.

Em trabalhos com material construtivo vivo é essencial ter em consideração que as plantas necessitam de condições apropriadas para o seu desenvolvimento. Estas exigências podem ser de natureza edafoclimática, (por exemplo, temperatura, precipitação, umidade, tipo de solo, radiação solar, relevo, entre outros); e/ou de natureza ecológica (por exemplo, tipo de comunidade, sucessão vegetal, competição, alelopatia, entre outros). A escolha de plantas também pode ser determinada pelo tipo de solução construtiva de acordo com as formas de uso das mesmas, ou seja, no caso de escolha de uma técnica que utilize estacas vivas, é requisito que as plantas tenham propagação vegetativa. É determinante, ainda, 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 escolha de plantas/espécies deverá obedecer a critérios ecológicos que controlam a distribuição transversal. O entendimento desta distribuição transversal, particular para cada espécie, está relacionado com o sucesso das intervenções localizadas em margens fluviais. A composição da vegetação e a 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 20, uma seção transversal que identifica a distribuição da vegetação de acordo com as especificidades do local.



<sup>113</sup>DURLO, M. & SUTILI, F.  
*Op. cit.*

Figura 20: Distribuição ecológica da vegetação ciliar.<sup>113</sup>

Quadro 2: Resumo das propriedades mais importantes das plantas e seu significado para as funções de engenharia.<sup>114</sup>

Plantas		Propriedades das Plantas									
		Cobertura do solo (%)	Altura	Forma/comprimento folhas	Densidade de 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	●	●		●	●		●	●	●	
	Proteção/isolamento	●			●						●
	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		●		●						●

<sup>114</sup>COPPIN, N. & RICHARDS, I. G. (Eds.). *Op. cit.*

Essas especificidades são majoritariamente dependentes do nível de água; por isso, a vegetação existente em margens fluviais alterna entre 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).

## **5 Propriedades biotécnicas**

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 socioeconômicas) e seus efeitos nas propriedades de engenharia dos solos.

Desta forma, propriedade biotécnica pode ser definida como uma característica do material construtivo vivo que, através de características morfo-mecânicas inerentes, desempenha uma função técnica (hidrológica ou mecânica), e que, por intermédio de um conjunto de ações, produz efeitos (positivos) nas propriedades de engenharia dos solos.<sup>115</sup>

<sup>115</sup>SOUSA, R. S. *Op. cit.*

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

As propriedades adicionais resultam igualmente das características morfo-mecânicas das plantas e englobam funções ecológico-ambientais, estéticas ou socioeconômicas, juntamente com as propriedades biotécnicas. Apesar de desempenharem um papel secundário do ponto de vista da engenharia, tais propriedades são importantes, pois integram um 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 a sua consideração para o sucesso em 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 21.

O conjunto de características morfológicas e mecânicas (morfo-mecânicas) inerente às plantas, origina funções que estão interligadas e que ocorrem simultaneamente, sejam elas hidrológicas, mecânicas, ecológico-ambientais, es-



téticas ou socioeconômicas. Estas características morfo-mecânicas não existem de forma dissociada e determinam os requisitos para cada espécie.

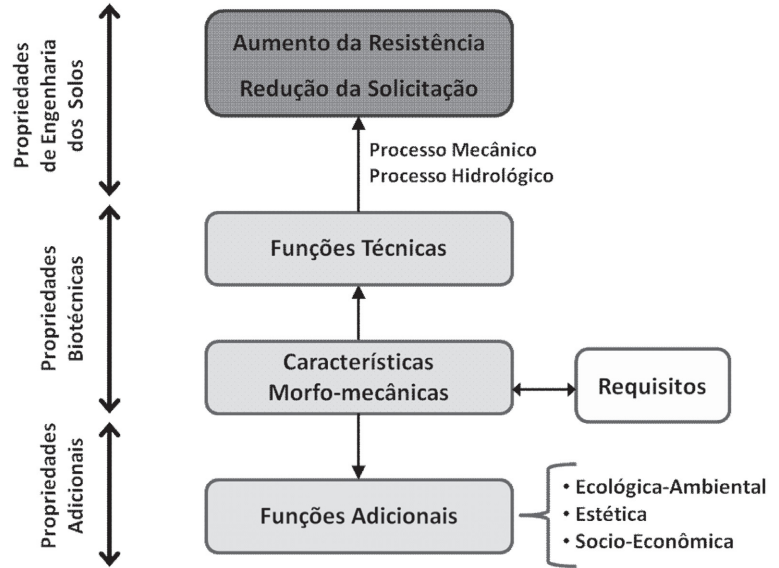


Figura 21: Correlação entre as propriedades das plantas e as funções da Engenharia Natural.

## 6 Conclusão

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 deverá orientar 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.

Rita dos Santos Sousa é graduada em Engenharia Biofísica, mestre em Engenharia Florestal e doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal da Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul.

ritasousa.ufsm@gmail.com

Fabrício Jaques Sutili é graduado em Engenharia Florestal, doutor em Engenharia Natural pela Universidade Rural de Viena e professor do Departamento de Ciências Florestais da Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul.

fjsutili@gmail.com