



46 | 47

Engenharia Natural

3 APRESENTAÇÃO

ARTIGOS

- 5 THE DEVELOPMENT OF SOIL BIOENGINEERING
AS AN ANALYTICAL DISCIPLINE
Fabício Jaques Sutili and Elvidio Gavassoni
- 31 ASPECTOS TÉCNICOS DAS PLANTAS UTILIZADAS EM ENGENHARIA NATURAL
Rita dos Santos Sousa e Fabício Jaques Sutili
- 73 METODOLOGIA PARA ELABORAÇÃO DE PROJETOS DE ENGENHARIA NATURAL
EM OBRAS DE INFRAESTRUTURA
Charles Rodrigo Belmonte Maffra e Fabício Jaques Sutili
- 95 PLANTAS LENHOSAS COM POTENCIAL BIOTÉCNICO PARA USO EM OBRAS DE
ENGENHARIA NATURAL NO BRASIL
Paula Letícia Wolff Kettenhuber, Rita dos Santos Sousa, Luciano Denardi e Fabício Jaques Sutili
- 111 ENGENHARIA NATURAL PARA ESTABILIZAÇÃO HIDRÁULICA DO RIO
PARDINHO EM SANTA CRUZ DO SUL - RS
Paula Letícia Wolff Kettenhuber, Junior Joel Dewes e Fabício Jaques Sutili
- 131 ENGENHARIA NATURAL PARA ESTABILIZAÇÃO HIDRÁULICA DE TRAVESSIA
DUTOVIÁRIA NO ESPÍRITO SANTO – CASO 1
Rita dos Santos Sousa, Charles Rodrigo Belmonte Maffra e Fabício Jaques Sutili
- 153 ENGENHARIA NATURAL PARA ESTABILIZAÇÃO HIDRÁULICA DE TRAVESSIA
DUTOVIÁRIA NO ESPÍRITO SANTO – CASO 2
Charles Rodrigo Belmonte Maffra, Rita dos Santos Sousa e Fabício Jaques Sutili

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA

REITOR	Paulo Afonso Burmann
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS	Irineo Zanella
CENTRO DE CIÊNCIAS NATURAIS E EXATAS	Sônia Terezinha Zanini Cechin
CENTRO DE CIÊNCIAS SOCIAIS E HUMANAS	Mauri Leodir Löbler
EDITOR	Delmar Antonio Bressan
EDITOR CONVIDADO	Fabrcio Jaques Sutli
CONSELHO EDITORIAL	Beatriz Teixeira Weber Élgion Loreto José Newton Cardoso Marchiori Miguel Antão Durlo Ronai Pires da Rocha Ronaldo Mota Zília Mara Scarpari
CONSELHO CONSULTIVO	Alvaro Mones André Furtado Andrey Rosenthal Schlee Antonio Augusto Passos Videira Antonio Carlos Robert Moraes Aziz Nacib Ab'Sáber (<i>in memoriam</i>) Emilio Ulibarri Franz Andrae Luiz Antonio de Assis Brasil Marcelo Leite Pascal Acot
PREPARAÇÃO E REVISÃO DE TEXTOS	Zília Mara Scarpari
CAPA, EDITORAÇÃO DE TEXTO E PROGRAMAÇÃO VISUAL	Valter Antonio Noal Filho
FOTOGRAFIA DA CAPA	Stephan Hörbinger (Rio Pardo/RS)
IMPRESSÃO E ACABAMENTO	Gráfica Editora Pallotti (Santa Maria)

Ciência & Ambiente/Universidade Federal de Santa Maria.

UFSM - v. 1, n.1 (jul. 1990) - .- Santa Maria :

Semestral

n. 46/47 (jan./jun. e jul./dez. 2013)

CDD:605 CDU:6(05)

Ficha elaborada por Marlene M. Elbert, CRB 10/951

(Edição publicada em junho de 2017)

ISSN 1676-4188

A revista *Ciência & Ambiente* é indexada ao
LATINDEX – Sistema Regional de Información en Línea
para Revistas Científicas de América Latina,
el Caribe, España y Portugal.

Ciência & Ambiente

Prédio 13/CCNE – Sala 1122 – Campus Universitário – Camobi
97105-900 – Santa Maria – Rio Grande do Sul – Brasil
Fone/Fax: (55) 32208735 e (55) 32208915/ramal 30
ciencia.ambiente@ufsm.br – www.ufsm.br/cienciaambiente

A **Engenharia Natural**, tema da presente edição de *Ciência & Ambiente*, constitui importante ferramenta técnico-científica destinada a proteger e estabilizar solos, taludes, estruturas hidráulicas, margens de cursos de água, voçorocas ou outras conformações existentes na paisagem natural ou artificial. Segundo a lógica dessa concepção, tais finalidades podem ser alcançadas mediante a utilização de materiais construtivos vivos – sementes, plantas, parte de plantas, associações vegetais – como complemento útil e por vezes necessário às técnicas tradicionais de Engenharia Civil.

Os primeiros registros bibliográficos, abordando o conhecimento artesanal e empírico em Engenharia Natural, surgiram na segunda metade do século XIX, tanto na Europa como na América do Norte. Essas referências constavam em publicações normalmente relacionadas às intervenções hidráulicas em cursos de água (manejo de torrentes) e às constru-

ções de estradas rurais e florestais. Mais adiante, em 1941, o engenheiro Arthur Freiherr von Kruedener cunhou o termo alemão “Ingenieurbiologie” (Engenharia Natural na tradução livre para o português) para designar um novo ramo da engenharia e, posteriormente, uma disciplina específica.

Nas décadas seguintes, o assunto ganhou uma série expressiva de trabalhos científicos, com destaque para as contribuições pioneiras do engenheiro austríaco Hugo Meinhard Schiechtl. Além de utilizar sistematicamente as novas técnicas na Europa Central e de ser autor de diversos livros sobre o tema, Schiechtl é também o responsável por tornar a Engenharia Natural uma disciplina acadêmica.

No Brasil, esse campo encontra-se em franca expansão, em virtude de sua elevação à condição de disciplina, em nível de graduação e de pós-graduação, e do surgimento de empresas especializadas no ramo.

Na Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), em particular, o aporte teórico da Engenharia Natural está presente, há décadas, no conteúdo programático de disciplinas como Manejo de Bacias Hidrográficas e Estradas Florestais. Isso se deve à grande influência das cadeiras ministradas na Universidade Rural de Viena, Áustria, instituição que mantém estreita relação com o Departamento de Ciências Florestais, desde a criação do mesmo no âmbito da UFSM em 1978.

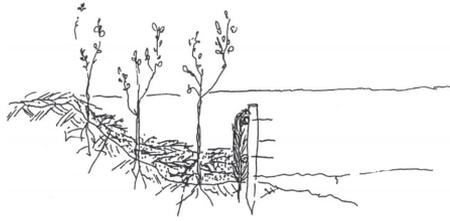
Dessa parceria, a partir de 2002, surgem os primeiros projetos destinados à qualificação de alunos brasileiros e austríacos na área, sob a orientação de um dos mais conhecidos discípulos de Schiechl, o professor Florin Florineth. Mais recentemente, ao construir uma estrutura física apropriada e ao manter uma linha de

pesquisa, exclusivamente voltada para a Engenharia Natural, abriu-se na UFSM a possibilidade de geração continuada de conhecimentos e de efetiva colaboração com entidades públicas e privadas interessadas no tema.

São justamente os primeiros produtos gerados por essa linha de pesquisa, bem como as experiências de campo resultantes da interação com empresas, que compõem o número da revista *Ciência & Ambiente* que apresentamos aos leitores.

Sem sombra de dúvidas, a demanda por conhecimentos sobre recuperação de áreas degradadas só tende a crescer nos próximos anos. Nesse contexto, a contribuição da Engenharia Natural terá, por certo, grande utilidade prática, além de considerável relevância ecológica.

Nota do editor: por razões operacionais e financeiras, as edições 46 e 47 de *Ciência & Ambiente* foram agrupadas em um único volume, publicado no mês junho de 2017.



THE DEVELOPMENT OF SOIL BIOENGINEERING AS AN ANALYTICAL DISCIPLINE

Fabrcio Jaques Sutili
Elvidio Gavassoni

Soil bioengineering consists basically of using live material as construction and structural elements in engineering applications related to stabilization of natural systems. The techniques used are not new, however its establishment as a technical and scientific discipline is recent. The current stage of soil bioengineering development is marked by artisan and descriptive approaches. The aim of this work is to propose a program to develop soil bioengineering as a more analytical engineering branch. The historical progress and current stage of soil bioengineering are discussed and related to the historical progress of traditional engineering branches. A program to structure soil bioengineering as a more analytical discipline is suggested in the form of a hierarchical sequence of steps. This structuration contributes to improve the degree of confidence and precision in the professional practice of soil bioengineering applications and also it helps to standardize practice and improving the discipline.

Introduction

Soil bioengineering is a field of civil engineering which basically consists of using plants as engineering material and structural elements.¹ From the very pioneer scientific works on the subject, such as Kruedener's book², the technical aspect of this engineering discipline was highlighted. Further its basic technical character, which is similar to other engineering fields of study, soil bioengineering has other basic functions such as ecological, aesthetic and economic finalities.³ The main interventions of soil bioengineering, regarding its technical function, are: stabilization of slopes, control of erosion processes, ecological restoration and stabilization of the hydraulic condition of open channels. By stressing the focus of soil bioengineering on broader environmental concerns some authors⁴ consider that soil bioengineering is a discipline originated in the last century, even though its techniques has been applied for centuries ago in many parts of the world⁵. Apart from this discussion, just recently, soil bioengineering has receiving some scientific treatment as a modern engineer discipline and being subject of specialized bibliography.⁶

The modern engineer concept involves the application of scientific principles to practical purposes.⁷ This concept has passed by a gradual development along many centuries.⁸ Firstly, engineering work was done by experts whose knowledge was based mainly in experience acquired through years of professional work, empirical observations and even instinctive approach.⁹ Nowadays, the engineering practice is most performed using analytical and quantitative design rules. The design rules in many engineering branches tend to course a gradual way from the experience-based (empirical) rules to principles based on a full scientific understanding and explanation of the relevant underlying phenomena.¹⁰

As a technical-scientific discipline¹¹, soil bioengineering deals with problems very similar to other civil engineering disciplines¹². Settled as a distinct engineering field, and not just a new constructive technique, soil bioengineering demands analytical quantitative design guides and codes, standard techniques of experimental engineering science and standard curricula in polytechnic or university courses. Soil bioengineering distinctive characteristic is the use of live vegetative elements as building material.¹³ Unlike other technologies in which plants are chiefly an aesthetic component, in soil bioengineering systems, plants are an important structural component.¹⁴

¹ SCHIECHTL, H. M. *Grundlagen der Grünverbauung*. Mitteilungen der forstlichen Bundes-versuchsanstalt Mariabrunn. Wien: Kommissionsverlag der Österreichischen Staatsdruckerei, 1958. 273 p.

SCHIECHTL, H. M. & STERN, R. *Ground Bioengineering Techniques for Slope Protection and Erosion Control*. Wiley, 1996. 176 p.

² KRUEDENER, A. *Ingenieurbiologie*. Münschen: Reinhardt Verlag, 1951. 172 p.

³ CORNELINI, P. & FER-RARI, R. *Manuale di Ingegneria Naturalistica per le Scuole Secondarie*. Regione Lazio, 2008. 226 p.

⁴ BISCHETTI, G. B. et al. On the origin of soil bioengineering, *Landscape Research*, p. 1-13, 2012.

⁵ GRAY, D. H. & SOTIR, R. B. *Biotechnical and Soil Bioengineering Slope Stabilization: A Practical Guide for Erosion Control*. New York: Wiley, 1996. 400 p.

⁶ PETRONE, A. & PRETI, F. *Ingeniería naturalística en Centroamérica*. Manuales técnicos per la cooperazione allo sviluppo – Istituto Agronomico per L'Oltremare, Società Editrice Fiorentina, Florencia, 2005. 108 p.

⁷ RANKINE, W. J. M. *Introductory Lecture on the Harmony of Theory and Practice in Mechanics*: Delivered to the Class of Civil Engineering and Mechanics in the University of Glasgow on Thursday, January, 3, 1856. 22 p.

⁸ KIRBY, R. S. et al. *Engineering in History*. McGraw-Hill, 1956. 544 p.

⁹ STRAUB, H. A. *History of Civil Engineering – an Outline from Ancient to Modern Times*. Leonard Hill Limited, 1960. 258 p.

ADDIS, B. *Building: 3000 years of Design Engineering and Construction*, 2007. 640 p.

¹⁰ ADDIS, B. *Op. cit.*

- ¹¹ PRETI, F. & MILANESE, C. Monitoring ground bioengineering stabilization of landslides in Lazio Region, Italy. p. 231-238, In: STOKES, A. et al. *Eco- and Ground Bio-Engineering: The Use of Vegetation to Improve Slope Stability*. Springer, 2005.
- ¹² LEWIS, L. *Soil Bioengineering: An Alternative for Roadside Management*. A Practical Guide, USA Department of Agriculture, 2000. 47 p.
- ¹³ CORNELINI, P. & FERRARI, R. *Op. cit.*
- ¹⁴ LEWIS, L. *Op. cit.*
- ¹⁵ DURLO, M. A. & SUTILI, F. J. *Bioingeniería: Manejo Biotécnico de Cursos de Agua*. Porto Alegre: EST Edições, 2005. 189 p.
- LI, X.; ZHANG, L. & ZHANG, Z. Soil bioengineering and the ecological restoration of riverbanks at the airport town, Shanghai, China. *Ecological Engineering*, 26, p. 304-314, 2006.
- PETRONI, A. *Sistema de preparación ante desastres naturales en siete comunidades rurales del Área de Cerro Musún en el municipio de Río Blanco, Matagalpa, Nicaragua*. Cooperación al Desarrollo de Países Emergentes (COSPE), Fundación Nicaraguense para el Desarrollo Sostenible (FUNDENIC) e colaboración Universidad de Florencia, Nicaragua, 2006. 84 p.
- QUINTANA, Y.; PETRONI, A. & PRETI, F. *Capitalización de la experiencia de ingeniería naturalística en Jipijapa, Manabí, Ecuador*. Proyecto reducción de riesgos por desastres en el sur de Manabí, CRIC - Terranueva, V Plan de Acción Dipecho Capítulo Ecuador, ECHO/DIP/BUD/2007/03007, Ecuador. 2009.
- ALI, F. Use of vegetation for slope protection: Root mechanical properties of some tropical plants. *International Journal of Physical Sciences*, 5, p. 496-506, 2010.
- ¹⁶ MORGAN, R. P. C. & RICKSON, R. J. *Slope*

The soil bioengineering techniques have been used for many decades, especially in Central European countries. Nowadays, those techniques are being spread over other countries.¹⁵ The main task in these new application regions is to identify plants with a required potential to be used as structural components. The result is that scientifically research has been focused on the characterization of this vegetative material in new biomes. On the other hand minor attention has being paid to quantify the characteristics and plant behavior as engineering materials. According to Morgan & Rickson¹⁶ soil bioengineering is a classic example of a discipline where there is a prominent distance between the practice and the science.

The soil bioengineering current stage, characterized by craft and artisan skills in some of its parts, has been the cause of so many challenges such as restrictions to the use of those techniques by a broader range of engineering applications and professionals. According to Mickovski & Van Beek¹⁷ the lack of more analytical literature, codes of practice and design is a relevant issue on the small interesting and encouragement of engineers to employ soil bioengineering measures. Other possible cause to the marked reluctance to use vegetative methods in preference to conventional civil engineering is, according to Schiechl & Stern¹⁸, due to the lack of training or lack of personal experience in a relatively new field. However, the very descriptive current stage of soil bioengineering contributes to turn the training process and personal experience gaining a slow and uneven task.

A clear and objective identification of soil bioengineering discipline as an engineering branch can be an important step in order to turn this field more analytical. Since in many ways and situations the soil bioengineering applications are a rediscovery or a reinterpretation of correlated traditional and well-established engineering fields, the very path, gradually performed by those correlated engineering disciplines, can be used to direct, organize and model a similar development on the soil bioengineering field.

This work presents a development program to the soil bioengineering as a technical or engineering discipline. The soil bioengineering concepts and basic definitions are first discussed, followed by a brief presentation of the gradual development of the modern concept of the engineering practice. Next the characterization of soil bioengineering as a distinct engineering discipline is presented. The

Stabilization and Erosion Control – a bioengineering approach. London: E & FN Spon, 1995. 306 p.

- ¹⁷ MICKOVSKI, S. B. & Van BEEK, L. P. H. Decision support systems in eco-engineering: the case of the SDSS. p. 231-238, In: STOKES, A. et al. *Eco- and Ground Bio-Engineering: The Use of Vegetation to Improve Slope Stability*. Springer, 2007.
- ¹⁸ SCHIECHTL, H. M. & STERN, R. *Ground Bioengineering... Op. cit.*
- ¹⁹ GIBLING, M. R. & DAVIES, N. S. Paleozoic landscapes shaped by plant evolution. *Nature Geoscience*, 5, p. 99-105, 2012.
- ²⁰ DU BOYS, P. Le Rhore et Les Riviers a Lit Affonillable. *Annales Des Ponts et Chaussées*, Ser. 5 XVIII, p. 141-195, 1879.
- DEMONTZEY, S. *Studien über die Arbeiten der Wiederbewaldung und Berasung der Gebirge*, 1884. 381 p.
- SECKENDORFF, A. F. V. *Verbauung der Wildbäche*. Aus Anlass der Reise seiner Excellenz des Herrn k. k. Ackerbauminister Grafen Julius von Falkenhayn nach Südf Frankreich, Tirol und Kärnten. 122 Abb., VIII, 1884. 319 p.
- SCHINDLER, A. *Die Wildbach- und Flußverbauung nach den Gesetzen der Natur*. 1889.
- ²¹ WANG, F. *Grundriß der Wildbachverbauung*. 1902. 706 p.
- STINY, J. *Berasung und Bebuschung des Ödlandes im Gebirge*. 1908. 186 p.
- KRAEBEL, C. J. Erosion control on Mountain Roads. *USDA Circular N°*. 380, 1936. 45 p.
- STELLWAG-CARION, F. *Eignungsprüfung bei Stechbühlzern*. Zentralbl. für die gesamte Forstwirtschaft, Heft 7/8, 1936.
- KELLER, E. *Die Bautechnische Anwendung und Durchführung der lebenden Verbauung*. Wasserw. und Technik, Heft ½. 1937.

current stage and practices of soil bioengineering are addressed, in correlation to the stages found in the development of the major engineering branches. The main challenges and difficulties of a broader acceptance by professionals of soil bioengineering techniques are discussed, as well, their relations to its current stage. Finally, the program to develop soil bioengineering is presented, discussing in details the steps to achieve a more analytical discipline and pointing out the benefits of such approach.

Development and concepts

On the very first paragraph of his book written in 1958 Schiechl affirms: “Soil bioengineering is understood as the set of efforts to attain plant recolonization in order to re-stabilize soils”. Schiechl makes clear that this discipline has “as its priority” technical goals by means of using live plants as a tool to obtain soil protection, sediment transportation management, and slope stabilization. However, the ecological, aesthetic, and territory planning soil bioengineering functions are not excluded of its technical primordial finality.

Not infrequently that soil bioengineering techniques has been presented as new-found methods by the specialized literature, however this affirmation relies much more on a rediscovery of a set of knowledge and techniques that are much more ancient than the nowadays called traditional practices. The use of local materials, such as wood and rocks, associated to live plants as construction elements and co-participant in the soil engineering properties improvement process is a simple and even intuitive concept whose origin cannot be determined. Indeed, as evidenced by Gibling & Davies¹⁹, the vegetation naturally has performed a relevant influence on the landscape formation processes, and as consequence, over its present features.

The first collecting, comprising artisan and empirical knowledge, by technical texts specialized in soil bioengineering (even though this term was not yet coined) appeared in the second half of 19th century²⁰ followed by works mainly correlated to river management, road construction, forestry planning and wood production in the 20th century²¹. In 1941 the engineer Arthur Freiherr von Kruedener coined the german term “Ingenieurbiologie” to designate a new engineering branch or discipline. In the following decades a series of scientific works on the subject were published, with the prominence of the pioneer academic work of the Austrian engineer Hugo Meihard

- KELLER, E. *Kampf dem Bergschutt*. Deutsche Wasserwirtschaft, Nr. 12. 1938.
- KELLER, E. *Lebende Verbauung im Flußbau*. Centralbl. für das gesamte Forstwesen, Heft, 7/8. 1938.
- KELLER, E. *Wildbachverbauung und Flußregulierung nach den Gesetzen der Natur*. Deutsche Wasserwirtschaft, Heft 6. 1938.
- SEIFERT, A. *Naturnäherer Wasserbau*. Deutsche Wasserwirtschaft, Nr. 12. 1938.
- MAYER, R. *Noções de Hidráulica Florestal*. Direção geral dos serviços florestais e aquícolas. 1941.
- FRY, J. R. Willows for streambank control. *Soil Conservation*, 4, p. 109-111, 1938.
- PRÜCKNER, R. *Die Technik der Lebenden Verbauung und das Weidenproblem im Flußbau und in der Wildbachverbauung*. 1948. 51 p.
- AICHINGER, E. *Die Pflanzensoziologie im Dienste der Forstwirtschaft*. Berichte der Forstwirtschaftlichen Arbeitsgemeinschaft an der Hochschule für Bodenkultur in Wien, Folge 2. 1948.
- HASSENTEUFEL, W. *Die Grünverbauung von Wildbächen*. Österreichische Wasserwirtschaft, Heft 12. 1950.
- ²² SCHIECHTL, H. M. *Grundlagen der Grünverbauung*. Mitteilungen... *Op. cit.*
- ²³ KRUEDENER, A. *Ingenieurbiologie*... *Op. cit.*
- ²⁴ KRUEDENER, A. & BECKER, A. *Forschungsstelle Für Ingenieurbiologie des Generalinspektors Für das Deutsche Strassenwesen: Atlas Standortkennzeichnender Pflanzen*. Berlin: forschungsstelle für ingenieurbiologie des generalinspektors für das deutsche strassenwesen, Wiking Verlag, 1941.
- KRUEDENER, A. *Ingenieurbiologie*... *Op. cit.*
- ²⁵ SCHIECHTL, H. M. *Grundlagen der Grünverbauung*... *Op. cit.*
- ²⁶ PRÜCKNER, R. *Die Technik der Lebendverbauung*. Wien: Österreichischer Agrarverlag Wien, 1965. 200 p.

Schiechtl. Even though this early academic work is not analytical in character it is a very important step in the soil bioengineering technical development.

According to Schiechtl²² the great damages to the European landscape and the difficulties of the post-war period stimulate the use of simple techniques. However, it is evident that the fast industrial and technological development and the yet inceptive environmental concerns, which characterize that period, have decreased the research and practical interest on such techniques.

Nowadays, there is a huge demand, not only technical-related, conducing again the scientific and engineering communities to economic and feasible solutions that make possible or even grant some degree of commitment regarding ecological (environmental) and aesthetic (landscaping) concerns.

Kruedener²³ points out that one of the basic soil bioengineering features is to bridge the natural sciences (mainly botany and ecology) and engineering disciplines. The author speaks in terms of "biology-guided engineering techniques". Approaching the subject on this manner is an essential concept in the soil bioengineering developing.

The original definitions and concepts are, generally, reproduced by the current literature without any remarkable contribution or changing. Pioneers researches such as Kruedener & Becker and Kruedener²⁴, Schiechtl²⁵ and Prückner²⁶ had identified that soil bioengineering has also non-technical characteristics. This is made clear by the constant use of the term "purely technical" interventions when referring to the traditional engineering measures. It is worthy to note that this point of view, regarding the identification of nontechnical soil bioengineering characteristics, shared by these authors, was truly innovative and only in the last years it was truly accepted. According to Kruedener²⁷ the engineer concerns should not be directed exclusively to the technical design of a given work, but also to its complete adjustment to the environment. He affirms that an engineering work should not be a strange object in relation to the around landscape, but must be completely integrated to it. Those are the principles that always have guided soil bioengineering practice. On the other hand, the pioneer researches were not concerned to develop their concepts using a clear distinction between the technical and nontechnical soil bioengineering functions. This has just happened in the last years, when current approaches, such those shared by Cornellini & Sauli and Cornellini & Ferrari²⁸,

²⁷ KRUEDENER, A. *Ingenieurbiologie... Op. cit.*

²⁸ CORNELINI, P. & SAULI, G. *Manuale di indirizzo delle scelte progettuali per interventi di ingegneria naturalistica*. 1a ed. Roma: Ministero dell' Ambiente e della tutela del territorio-Progetto Operativo Difesa Suolo, Istituto Poligrafico e Zecca dello Stato S.p.A. - Salario, 2005. 389 p.

CORNELINI, P. & SAULI, G. *Principi Metodi e Deontologia Dell'Ingegneria Naturalistica*. Roma: Regione Lazio e Associazione Italiana per la Ingegneria Naturalistica, 2012. 199 p.

CORNELINI, P. & FERRARI, R. *Op. cit.*

where technical and nontechnical soil bioengineering functions are clearly distinguished and identified.

Further its essential principle, the use of vegetation as construction material and structural element; soil bioengineering has three additional desirable guiding principles as hierarchized on figure 1. So far as a soil bioengineering intervention goes in the pathway given by these guiding principles the more it enhances a stable dynamic system. In other words, the number of degrees-of-freedom of the projected intervention is larger when more guiding principles are observed. A larger number of degrees-of-freedom implies in more possible dynamic equilibrium configurations when the system is faced down by natural or anthropic destabilization demands.

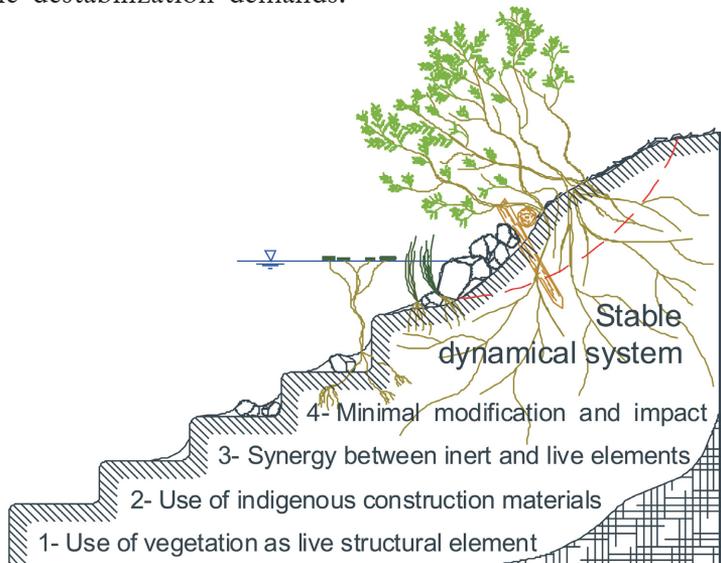


Figure 1: Soil bioengineering essential and guiding principles.

²⁹ GRAY, D. H. & LEISER, A. T. *Biotechnical Slope Protection and Erosion Control*. Van Nostrand Reinhold Company Inc., 1982. 271 p.

SCHIECHTL, H. M. & STERN, R. *Handbuch für naturnahen Erdbau: Eine Einleitung für ingenieurbiologische Bauweisen*. Wien: Österreichischer Agrarverlag, Druck und Verlagsgesellschaft m. b. H., 1992. 153 p.

It is also true that soil bioengineering measures has technical limitations regarding to their application,²⁹ in general soil bioengineering schemes are only assigned to small or medium scale problems. There are also limitations related to the vegetation developing requirements, such as environmental, soil and ecological conditions. Other limitation is that the structural behavior of a soil bioengineering measure is conditioned to the healthy condition of the vegetation.

The recognition of soil bioengineering as a separate engineering discipline and the fully understanding of its current stage depends directly of the comprehension of the modern engineering concept development process which is addressed in the following section.

Historical development of engineering concept

The engineering modern concept is greatly remarked by a conscious knowledge of the relevant behavior of natural phenomena related to a given design subject. Engineering today is considered, in a basic sense, the application of science to technological problems.³⁰

For many years this concept had involved just a direct application of scientific results and discovers, without making any structural change in scientific principles. However, this model of interaction between science and practical application was substituted by recognition that technology has its own conceptual framework, which is parallel to, and indeed independent of scientific basic principles.³¹ Actually, the science and practical application interaction requires the developmental of a distinct body of knowledge, commonly called engineering science.³² However, this development took a long and nonlinear process over the centuries in the human civilization History.

By a considerable time, civil engineering disciplines had developed more or less independently of each other.³³ It was not until the second half of the eighteenth century that the engineering science proper came into existence.³⁴ Another engineering branches and disciplines are still developing such scientific framework. Even though, science as a distinct realm from engineering was not a purposeful activity of primitive peoples, one can find in history, evidences of a differentiation between two types of knowledge, a theoretical and a practical side. This separation was recognized by the ancient Greeks³⁵ and also by the romans³⁶. The clear model of interaction between practical and theoretical knowledge gives way to the disclosure of engineering as a science branch. This model was initially proposed by the Scottish civil engineer William J. M. Rankine in the middle of 19th century.

According to Rankine³⁷ the mechanical knowledge may be distinguished into three types: purely scientific knowledge, purely practical knowledge and a third and intermediate one which relates to the application of scientific principles to practical purposes. Rankine model also proposes that this third kind of knowledge arises from understanding the harmony between theory and practice.

Engineering can be regarded, according Rankine model, as the art of practical application of scientific and empirical knowledge to the design and production processes.³⁸ According to Florman³⁹ is this middle position, the

³⁰ FLORMAN, S. C. *The civilized Engineer*. New York: St Martin's Griffin, 1987. 272 p.

³¹ CHANNELL, D. F. The harmony of theory and practice: The engineering science of W. J. M. Rankine. *Technology and Culture*, 23, p. 39-52, 1982.

³² CHANNELL, D. F. *Op. cit.*

³³ STRAUB, H. A. *Op. cit.*
ADDIS, B. *Op. cit.*
SAYÃO, A. *História da Engenharia Geotécnica no Brasil: 60 anos da Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica*. Rio de Janeiro: AMBS, 2010. 254 p.

³⁴ STRAUB, H. A. *Op. cit.*

³⁵ ADDIS, B. *Op. cit.*

³⁶ VITRUVIUS, P. *The Ten Books of Architecture*. New York: Dover Publication, 1960. 331 p.

³⁷ RANKINE, W. J. M. *Op. cit.*

³⁸ KIRBY, R. S. *et al. Engineering in History*, McGraw-Hill, 1956. 544 p.

³⁹ FLORMAN, S. C. *Op. cit.*

main contributor to the engineering progress, to credit the workshop as well the laboratory, the manual and intellectual labor, valuing intuition and experience, as well theory and experimentation. The main requisites of an engineering discipline in its modern conceptual framework can be grouped into three categories: professional practice, professional institution and professional training.

The engineering current professional approach has as its fundamental characteristic the use of numerical calculations and abstract mathematical concepts in the design process. The professional institution establishment is a key requisite of an engineering discipline to assume its modern framework. The professional institution consists basically of the formation of a community that shared certain skills and common body of knowledge, as well as values and a code of working. Engineering became defined, in the 17th and 18th centuries, by the body of knowledge that could be captured in books and by the formal means in which a person could train for and enter the profession. This instruction process relies on the fact that a person could learn engineering principles through books and classes, without the dependence of immediate personal experience. All contemporary engineers enter their profession by passing the portals of science.⁴⁰

⁴⁰ FLORMAN, S. C. *Op. cit.*

⁴¹ STRAUB, H. A. *Op. cit.*

According to Straub⁴¹ in the development of engineering disciplines, such as material and building science, three phases can be distinguished: the artisan stage, the descriptive stage and the quantitative stage. Is it true that no matter how closely modern engineering becomes identified with science, no matter how the end product of an engineering project seems remote and abstract, it can never be severed from its origins in craftsmanship.⁴² But, the mark of distinction among the three phases is upon the instinctive approach. While an engineering discipline in the artisan stage relies mainly on intuition in a making-decision process, the quantitative or analytical phase is chiefly supported by a scientific based reflection process.

⁴² FLORMAN, S. C. *Op. cit.*

Artisan stage

The artisan acquires the knowledge of his profession through years of experience. His knowledge is purely empirical, gained from experience and handed down from person to person, no general theory is present and economic principles are absent. The artisan phase is marked by the collecting of data about what worked and what did not. However, the use of such empirical rules left little flexibili-

ty and excluded radical departures from precedent, making engineering progress a slow process.

The professional institution at an artisan stage is almost absent or very incipient. During this phase, craftsmen could banded together in guilds, and organizations,⁴³ but there is no regulatory agencies or design codes that served to protect the public as well the professional class. The artisan professional training process is the apprenticeship method. There is no technical school or textbooks. Such matters of a technical nature passed orally from generation to generation of craftsmen.⁴⁴

⁴³ FLORMAN, S. C. *Op. cit.*

⁴⁴ KIRBY, R. S. *et al. Op. cit.*

Descriptive stage

The descriptive stage is marked by the appearing of condensed rules regarding the qualitative behavior and requisites of a given engineering task. Through not exclusively based on scientific principles, these rules, after all, represent an application of elementary scientific knowledge. They give general advice to the builder such as the most favorable cutting season for wood, in the renaissance.⁴⁵ In the same purely descriptive manner, stones in construction engineering were classified merely according to geographical principles, denoting a strong regionalism on the standardization process of descriptive stage, or even according to their color, revealing only aesthetical preoccupation, but not according to engineering properties such as strength in a quantitative sense. Master buildings knew the limitation of their materials, and much of their experience could be codified and passed to others as design rules or design procedures, but just in a descriptive manner or in a how-to-do procedure.

⁴⁵ STRAUB, H. A. *Op. cit.*

As in the artisan stage the engineers focused more in answer the questions how to attain determined engineering tasks than to understand the relevant phenomena underling their decisions. The result is that the descriptive design rules are of not general application, being, in general, inconsistent when extrapolated.

On the descriptive stage there is still no professional infrastructure: no committees reviewing design codes of practice, and no technical press through which scientific developments were communicated to practicing engineers. The professional training in a descriptive stage of a given engineering discipline is characterized by the use of the first technical manuals of instructions. In general, those works combine rules of thumb with mathematical or even theoretical descriptive concepts.⁴⁶ During the early 19th

⁴⁶ FLORMAN, S. C. *Op. cit.*

century, the theoretical, scientific approach for many engineering problems was gradually beginning to be taken for granted. The change from artisan routine to modern scientific based engineering must be regarded as truly revolutionary, when the analytical, quantitative stage of a given engineering discipline is reached. It marks the beginning of a unique and important development.⁴⁷

⁴⁷ STRAUB, H. A. *Op. cit.*

Quantitative stage

The analytical or quantitative stage in many civil engineering branches was stimulated by the confluence of the scientific discoveries and the economic requirement of the use of resources and materials in the engineering practice during 18th century.⁴⁸ The strength of materials and structural engineering had become quantitative disciplines late on the same period.⁴⁹

⁴⁸ PETROSKI, H. *To Engineer is Human – The role of failure in successful design.* New York: Vintage Books, 1992. 272 p.

⁴⁹ STRAUB, H. A. *Op. cit.*

By this time many engineers had developed confidence in design techniques based on calculations rather than empirical data alone. However, it should not be expected that the model would accurately represent every aspect of a real world structure. Rankine in middle of nineteenth century proposed the concept of the now largely used factor of safety to express the difference between the conceptual theoretical model and the real structure.⁵⁰

⁵⁰ ADDIS, B. *Op. cit.*

The design process in its modern sense is more focused on universal and general application, eliminating regionalisms and being not restricted to imitate previous specifications. The design procedure in the analytical sense is much more than a set of instructions to construction workers. In current language it is a mathematical model of the building – an abstract representation of the structure that allows one to experiment, to try out ideas without actually executing them.

Engineering science grew out of and in the university environment. In general, the introduction of technology into the university curriculum came at the same time of active interest in the professionalization of engineering.⁵¹ The emergence of engineering as a profession brings the realization of the importance of scientific and technical education as a prerequisite for engineering. The modern engineer education concept means that a person can derive and understand engineering subjects such as structures and machines, without, having been a builder himself.

⁵¹ CHANNELL, D. F. *Op. cit.*

The analytical stage also enables the elaboration of design codes. Being produced by leading members of each profession and given a government's stamp of authority,

design codes represent a distillation of engineers' collective experience in a certain field. They are intending to ensure that, by using them, any competent engineer will be able to arrive at a satisfactory design and to achieve the level of confidence in a proposed design that society considers acceptable. Quantitative engineering facilitates the precise stipulations regarding the quality, origin and treatment of the building materials to be used, as also the construction program, and site organization, legal and financial clauses.

The synthesis of freely creative design and analytical approach is the foremost symbol and criterion of modern engineering and it is the main reason for its perennial progress.

Soil bioengineering as an engineering discipline

Soil bioengineering has as its major objective to project an stable dynamic ecosystem⁵² that can directly contribute to improve the geotechnical, hydraulic and hydrological conditions of a given site,⁵³ or in other words to facilitate or even to enhance the stabilization of natural systems. Even though the key elements in this project action are live organisms such plants, the backbone of soil bioengineering as a science branch is its engineering approach, or using the words of Petrone & Preti,⁵⁴ the constitution of a technical-scientific discipline. Early descriptions of soil bioengineering as a science discipline had point out this principle, as it can be viewed on the Kruedner⁵⁵ work when referring to soil bioengineering projects as actions were the physical laws of "hard" engineering are used in confluence to the biological attributes of living material.

Soil bioengineering has additional functions aside this technical or engineering finality but, soil bioengineering is not a landscaping approach or even just a construction method. The very essence of soil bioengineering relies on the development of its methodological frame and systematic and scientific study of its applications.⁵⁶ Terms such vegetative construction, biological building material,⁵⁷ live building material⁵⁸ are clear indicators that when one is dealing with soil bioengineering approaches is working over engineering ground. The live plant material is not employed as decorative or cosmetic intervention, but clearly as a civil engineering work.⁵⁹ Plants are used as building material in the soil bioengineering interventions and consist of the base of such works, making appropriated its name as a civil engineering branch.

⁵² MORGAN, R. P. C. & RICKSON, R. J. *Op. cit.*

⁵³ LI, M. & EDDLEMAN, K. E. Biotechnical engineering as an alternative to traditional engineering methods: A biotechnical streambank stabilization design approach. *Landscape and Urban Planning*, 60, p. 225-242, 2002.

⁵⁴ PETRONE A. & PRETI F. Soil bio-engineering for risk mitigation and environmental restoration in a humid tropical area. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14, p. 239-250, 2010.

⁵⁵ KRUEDENER, A. *Op. cit.*

⁵⁶ LACHAT, B. Conserver, aménager, revitaliser les cours d'eau avec une logique naturelle. *Annales de Limnologie-International Journal of Limnology*, 34, p. 227-241, 1998.

⁵⁷ SCHIECHTL, H. M. & STERN, R. *Ground Bioengineering Techniques... Op. cit.* SCHIECHTL, H. M. & STERN, R. *Water Bioengineering Techniques: For Watercourse Bank and Shoreline Protection*. Wiley, 1997. 208 p.

⁵⁸ LACHAT, B. *Op. cit.* DE ANTONIS, L. & MOLINARI, V. M. *Manuale di Ingegneria Naturalistica: Nozioni e tecniche di base*. Regione Piemonte, Servizio a cura della Direzione Opere pubbliche Difesa del suolo, Economia montana e foreste, 2007. 389 p.

⁵⁹ LACHAT, B. *Op. cit.*

⁶⁰ LACHAT, B. *Op. cit.*

⁶¹ GRAY, D. H. & SOTIR, R. B. *Op. cit.*

⁶² LAMMERANNER, W.; RAUCH, R. P. & LAAHA, G. Implementation and monitoring of soil bioengineering measures at a landslide in the Middle Mountains of Nepal. *Plant and Soil*, 278, p. 159-170, 2005.

⁶³ GRAY, D. H. & SOTIR, R. B. *Op. cit.*

⁶⁴ LACHAT, B. *Op. cit.*

⁶⁵ BENTRUP, G. & HOAG, J. C. *The Practical Stream-bank Bioengineering Guide*. United States Department of Agriculture, 1998. 150 p.

⁶⁶ BENTRUP, G. & HOAG, J. C. *Op. cit.*

⁶⁷ GRAY, D. H. & SOTIR, R. B. *Op. cit.*

⁶⁸ DE ANTONIS, L. & MOLINARI, V. M. *Op. cit.*

⁶⁹ DUPUY, L.; FOURCAUD, T. & STOKES, A. A numerical investigation into the influence of soil type and root architecture on tree anchorage. *Plant and Soil*, 278, p. 119-134, 2005.

HAMZA, O. *et al.* Novel biomechanical analysis of plant roots. p. 13-20. In: STOKES, A. *et al.* *Eco-and Ground Bio-Engineering: The Use of Vegetation to Improve Slope Stability*, 2007. STANGL, R. Hedge brush layers and live crib walls – stand development and benefits. p. 287-296. In: STOKES, A. *et al.* *Eco-and Ground Bio-Engineering: The Use of Vegetation to Improve Slope Stability*, 2007.

⁷⁰ PETRONE A. & PRETI F. Soil bio-engineering for risk mitigation and... *Op. cit.*

Still in accordance to Lachat⁶⁰ soil bioengineering is not infrequently erroneously seen just a plantation or a landscape activity. Being used alone or as an essential complementary approach to traditional engineering solutions,⁶¹ soil bioengineering practice definition clearly includes its final goal: to fulfill engineering functions⁶².

Such as any correlated engineering discipline soil bioengineering has additional concerns than just construction methods, according to Gray & Sotir⁶³ soil bioengineering and biotechnical methods also can be viewed as strategies or procedures for minimizing the liabilities of vegetation while capitalizing on its benefits. In this context, according to Lachat⁶⁴ soil bioengineering is comprised, in the set of solutions, methods and approaches available to the engineer in order to obtain functional and durable solutions. The search for safety, economy and feasibility is universal among engineering branches and it is not absent in soil bioengineering applications.

The claim that soil bioengineering is not an exact science,⁶⁵ but rather it is an art that must be designed from many different factors that are not always easy to determine is not false but it is completely true for every traditional engineering branch. As exposed on the previous section, engineering has developed its proper scientific frame, and its branches tend to pass from the artisan stage to an analytical phase. This path is not different regarding soil bioengineering as illustrated in the Bentrup & Hoag affirmation: "Some of the [soil bioengineering] techniques will work well in one situation, but not in others. The secret is to learn over time and many different projects."⁶⁶

According to Gray & Sotir⁶⁷, plant materials are not different from other materials in the sense that they must be selected with care for their intended purpose, which once more affirms the engineering character of biotechnical methods. However, the very singular nature of this construction material⁶⁸ turns necessary the development of an engineering discipline capable to deal with the vegetative material peculiarities. In this sense plant material are seen not only in biological or ecological senses as the traditional point of view of botanic or biological sciences but, also as building material and engineering structures.⁶⁹

The development process of soil bioengineering as a separated branch of civil engineering can be regarded as a rediscovery and a reinterpretation of traditional engineering methods.⁷⁰ In some cases it can be necessary that an entirely new approach must be created in order to fulfill

⁷¹ LEWIS, L. *Op. cit.*

⁷² LACHAT, B. *Op. cit.*

⁷³ COPPIN, N. & RICHARDS, I. *Use of vegetation in civil engineering*. Construction Industry Research and Information Association. CIRIA, 1990. 312 p.

⁷⁴ FLORINETH, F. Begrünungen von Erosionszonen im Bereich über der Waldgrenze. *Zeitschrift für Vegetationstechnik*, 5, p. 20-24, 1982.

BORGHERO, G. et al. *Lignes directrices pour l'application du génie écologique et de bonnes pratiques de gestion du territoire en milieu méditerranéen*. Commission Européenne, 2003. 430 p.

PUGLISI, S. *Progettazione di aree verdi e ingegneria naturalistica in ambiente mediterraneo*. Editoriale Bioss s. a. s. Castrolibero, 2004. 336 p.

PETRONE, A. & PRETI, F. *Ingeniería naturalística en Centroamérica... Op. cit.*

PETRONE, A. *Op. cit.*

SUTILI, F. J. & ANDRAE, F. Wie Waldbesitzer in Brasilien zur Nachhaltigkeit verdammt werden. *Forstzeitung*, Viena/Áustria, 112, p. 16-17, 2001.

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

SUTILI, F. J. & DURLO, M. A. Bioengenharia de solos: o estado da arte na Europa e no Sul do Brasil. *Conselho em Revista CREA-RS*, Porto Alegre - RS, p. 31, 2007.

QUINTANA, Y.; PETRONE, A. & PRETI, F. *Op. cit.*

the vegetative peculiar requirements. The differences in approach are also a remarkable distinction about soil bioengineering and other civil engineering branches.⁷¹ According to Lachat⁷² soil bioengineering consists of a nature emulation, artificially accelerated to fulfill mainly technical requirements but also to accomplish economical, ecological, and aesthetics functions. In fact soil bioengineering requires both an understanding of engineering principles and knowledge of vegetation⁷³, but not in a detached manner. It requires an understanding of how these two branches of knowledge interacts one with another and the way which both interacts with soil, water and climate conditions of a given work site, what turn soil bioengineering a very interdisciplinary engineering branch.

Current stage and practice

The most salient aspect of soil bioengineering is the use of live plant materials as an active element in the intervention. To achieve such finality, local or even autochthonous vegetal species must be found. However, the properties and features desirable for such vegetative material are of universal character, they are called biotechnical characteristics. The lacking of information regarding local species with biotechnical characteristics is frequently a prominent obstacle in the soil bioengineering techniques spreading. This search for local species has caused, at least apparently, some misunderstanding about the nature of soil bioengineering itself. It is usual to find in the soil bioengineering specified literature works whose content and even the proper title seems to validate their information only locally.⁷⁴

The question is: is the universal validity of the technique being clouded with the necessity of local vegetable species with biotechnical properties? Even though some degree of confusion about this aspect can happens, it can be properly cleared by considering the soil bioengineering definition made by virtually each author, all of them have been emphatic to view vegetation as a constructive material. In other words, just the materials – what is the same in almost any engineering branch – are of regional character, the design processes must have an analytical methodology of universal validity character. The regionalism regarding soil bioengineering technical applications can be originated not only from this confusion but also from the proper current stage of this discipline.

Soil bioengineering current stage is not uniform regarding all its various sub-branches, since they are not equally developed.⁷⁵ However, considering the principles presented on section 3, the artisan and descriptive marks can be identified in soil bioengineering regarding its professional practice, institution and training.

Professional practice

In spite of embrace a sufficient set of basic principles in order to characterize a distinguished approach, soil bioengineering professional practice does not exhibit a standardization degree comparable to other correlated engineering branches. The professional approach facing a practical problem depends massively on the previous experience of each engineer.

Regarding technical codes, soil bioengineering works lack an analytical point of view and are strongly based on practically accumulated previous experience. This could be identified on expressions such as: “gained experience”; “new experience developing and accumulation”; which are recurrent in the disclosure period of soil bioengineering as a scientific discipline⁷⁶ and are kept at the present time⁷⁷. Coppin & Richards⁷⁸, and also Hacker & Johannsen⁷⁹ precisely recognize the artisan origin of soil bioengineering techniques, and also its “gained experience” approaching. Even the plant species selection at the current stage depends on the previous experience of the professional.

The concept of an optimized design (safety, economic and feasible) is present and cleared pointed out by the technical literature, Cornelini and co-workers⁸⁰ emphatically present those principles in schemes showing a clear distinction between design and deontological mistakes. However, the lacking of analytical approach could confuse the engineer or other professional engaged in a soil bioengineering project, leading him, not infrequently, to an only cost-oriented design (in opposition to a performance-based design). The soil bioengineering professional practice is thus characterized by the lacking of technical specification, design codes, monitoring procedures and maintenance standardized methodologies.

The novice engineer who desires to employ soil bioengineering methods must search a solution based on the encoded (by the yet experienced professionals) information founded in schemes or entirely descriptive procedures such as tables, decision trees, graphs, or texts that guide the

⁷⁵ MORGAN, R. P. C. & RICKSON, R. J. *Op. cit.*
GRAY, D. H. & SOTIR, R. B. *Op. cit.*

⁷⁶ KRUEDENER, A. & BECKER, A. *Op. cit.*
KRUEDENER, A. *Op. cit.*
SCHIECHTL, H. M. *Grundlagen der Grünverbauung. Op. cit.*

PRÜCKNER, R. *Die Technik der Lebendverbauung... Op. cit.*

PIETZSCH, W. *Ingenieurbiologie*. Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, 1970. 119 p.

⁷⁷ LACHAT, B. *Op. cit.*

FLORINETH, F. *Pflanzen Statt Beton: Handbuch Zur Ingenieurbiologie Und Vegetationstechnik*. Berlin und Hannover: Patzer Verlag, 2004. 272 p.

DURLO, M. A. & SUTILI, F. J. *Op. cit.*

FERNANDES, J. P. & FREITAS, A. F. M. *Introdução à Engenharia Natural*. v. 2. Portugal: EPAL – Empresa Portuguesa das Águas Livres S. A., 2011. 108 p.

⁷⁸ COPPIN, N. & RICHARDS, I. *Op. cit.*

⁷⁹ HACKER, E. & JOHANNSEN, R. *Ingenieurbiologie*. Stuttgart (Hohenheim), 2012. 336 p.

⁸⁰ CORNELINI, P. & SAULI, G. *Manuale di indirizzo delle scelte progettuali... Op. cit.*
CORNELINI, P. & FERRARI, R. *Op. cit.*
CORNELINI, P. & SAULI, G. *Principi Metodi e Deontologia... Op. cit.*

beginner engineer to a closed solution, without exposing the underlying analytical method (if existent).

Regarding the inert material specifications the task is obviously facilitated by the traditional engineering knowledge, and once more the difficulty relies on the vegetative material whose quantitative specification information is almost inexistent, and also its interaction with the inert materials. There is also ignorance about the forces magnitude and dimension scales with the soil bioengineering can handle. The underlying processes and correlated phenomena are qualitatively understood and satisfactorily described by the technical and scientific literature; however the quantitative description of some needed design parameters is yet very incipient. One of the main reasons for these characteristics is the very erratic and complex behavior and mechanisms that characterize vegetation itself as well its interaction with the various environmental agents such soil, climate, landscape and other living organisms.

Professional Institution

In the context of professional institution, soil bioengineering has the support of universities which are interested on this scientific area, including some research institutes dedicated to the soil bioengineering developing. National and local professional associations are common in some European Countries and in the USA. Official and governmental agencies, especially those related to hydric resources and road engineering has demonstrated interest and has contributed for the soil bioengineering development. However, the existing organisms have not yet the sufficient acting amplitude, organization and authority to be in charge of the analytical standardization of soil bioengineering practice. The regulatory agencies in charge of soil bioengineering activities do not possess, in most countries, specified codes or standards regulations to supervise these activities.

Academic research efforts in terms of analytical knowledge have already being done.⁸¹ Even though these efforts are an important contribution to the developing of soil bioengineering they are not uniform. In addition, those studies do not present common or standard methods regarding technical knowledge sharing, acting conduct, and tests protocols. Nowadays soil bioengineering has its own publishing and propagation mechanisms. Its results can reach the interested public through scientific journals specialized in the correlated themes. There is also publica-

⁸¹ GERSTGRASER, C. *Ingenieurbiologische Bauweisen an Fließgewässern*. Grundlagen zu Bau, Belastbarkeiten und Wirkungsweisen. Dissertationen der Universität für Bodenkultur in Wien, Band 52. Wien: Österreichischer Kunst- und Kulturverlag, 2000. 92 p.
RAUCH, H. P. *Hydraulischer Einfluss von Gehölzstrukturen and Beispiel Einer Ingenieurbiologischen Versuchsstrecke Am Wienfluss*. Dissertationen Der Universität Für Bodenkultur in Wien, Band 63. Wien: Guthmann-Peterson, 2006. 188 p.
HAMZA, O. *et al. Op. cit.*
STOKES, A. *et al.* Mechanical resistance of different tree species to rockfall in the French Alps. *Plant and Soil*, 278, p. 107-117, 2005.
VAN BEEK, L. P. H. *et al.* Observation and simulation of root reinforcement on abandoned Mediterranean slopes. *Plant and Soil*, 278, p. 55-74, 2005.
WU, T. H. Root reinforcement: analyses and experiments. p. 21-30. *In: STOKES, A. et al. Eco- and Ground Bio-Engineering: The Use of Vegetation to Improve Slope Stability*, 2007.
SUTILI, F. J. *et al.* Flexural behavior of selected riparian plants under static load. *Ecological Engineering*, 43, p. 85-90, 2012.

tions specialized exclusively on soil bioengineering subjects, and scientific events such congresses, symposiums and technical forums. Regarding propagation as well other institution issues it can be observed a large progress in the current stage of soil bioengineering. Possibly, the next important step in this process is the creation of an international organization able to gather different regional organizations.

Professional training

The professional training in soil bioengineering field is highly influenced by both currently professional practice and institution. Due to the very current stage of the professional practice the soil bioengineering learning process depends massively upon the direct contact with the practical professional exercise. The technical books also reflect this fact by valorizing, in most cases, the knowledge transferring by practical experience description or even giving executive guidelines, showing in the training process the same non-analytical behavior of the professional practice and institution.

The formal educational system composed by universities and institutes strive to make the learning process more analytical, but the tools to attain such goal are not completely available. There is not a minimum standard curriculum, not even in a regional degree, related to soil bioengineering professional training. The major part of specialized books on the subject consists of technical handbooks and not textbooks of general application.

Soil bioengineering, is currently characterized by an artisan-descriptive phase, which is very natural in the developing process of every engineering branch. This current stage could not be absolutely understood as a failing process or weakness feature. But, similarly to even other engineering discipline, this phase must be overcome and the signs toward this analytical direction can be yet seen. In the following section the consequences of such developing process are discussed in details.

The main challenges

Even though soil bioengineering techniques compound an alternative approach or complementary actions to the traditional civil engineering methods they are not equally accepted in engineering applications. The schemes and intervention in soil bioengineering methods are, in many

places, little known or even completely ignored. The reasons of these reluctance and ignorance could be largely explained by the current stage regarding professional practice, institution and training as discussed in the previous section.

Considering the professional practice field, one of the great obstacles to the soil bioengineering techniques broader acceptance is the scarce information regarding vegetation species with detected biotechnical potential. The knowledge gap regarding local vegetation's biotechnical properties generally obligates the engineer to choose between two paths: the use of allochthonous species or the prioritization of non-vegetative intervention schemes such as geotextiles, erosion control blanket, concrete, gabions and other inert structures, where vegetation effect is regarded to a secondary role,⁸² not infrequently, without any technical function.

Following the premises from the very first soil engineering definitions⁸³, the vegetation used in its techniques should be, preferentially, autochthonous and must be employed as an active structural component contributing directly to soil stabilization. Here, the term stabilization is used in its broader sense, meaning, according to Sowers & Sowers⁸⁴, the process of improving soil in order that it can meet the desirable engineering requirements.

According to Cornelini & Ferrari⁸⁵ the autochthonous material use is of fundamental character to a given intervention using soil bioengineering technique. This fact means that even though soil bioengineering ecological function is not technically a restrictive requirement, it is an important principle in the discipline practice. The economical and aesthetical functions can be regarded on the same way. This kind of separation is really necessary and central to the analytical development of the soil bioengineering since it can guide the engineer to the needed functions on a specific project.

According to Morgan & Rickson⁸⁶ when a soil bioengineering based intervention is designed, it comprises further than a traditional engineering work but also an ecosystem. By the other hand, according to Gray & Sotir⁸⁷ the live plant materials are not different from other conventional material, in the sense that they should be selected and specified according the intentioned purposes in the intervention design. Hence, the identification of biotechnical properties and botanical related characteristics in the autochthonous flora of a given local is an important step to

⁸² COPPIN, N. & RICHARDS, I. *Op. cit.*

⁸³ KRUEDENER, A. & BECKER, A. *Op. cit.*
SCHIECHTL, H. M. *Grundlagen der Grünverbauung. Op. cit.*

⁸⁴ SOWERS, G. F. & SOWERS, G. B. *Introductory Soil Mechanics and Foundations: Geotechnical Engineering.* New York, 1979. 621 p.

⁸⁵ CORNELINI, P. & FERRARI, R. *Op. cit.*

⁸⁶ MORGAN, R. P. C. & RICKSON, R. J. *Op. cit.*

⁸⁷ GRAY, D. H. & SOTIR, R. B. *Op. cit.*

develop soil bioengineering as a more analytical discipline. The great challenge related to this issue is the very absence of a program to structure methodologically the recognition and search for determined local species with the desirable biotechnical properties to enhance a given necessary property to dynamically stabilize natural system. Such a methodology is really important, since according Schiechl⁸⁸ in a given floristic area there are many appropriated species to use in landscaping or horticultural activities, but there are few which prove their biochemical value. In the absence of such analytical methodology to search, to measure and to quantify biotechnical potential in vegetation species, the results could be inconsistent or demand a larger amount of time to be considered consistent.

This lack of analytical approach also leads to a gap in the conscience concerning the real reach of soil bioengineering interventions, regarding engineering problem dimensions. It can be observed in the stamen done by Cornellini & Sauli⁸⁹ who predict an increasing in the soil bioengineering application reach as the plant biotechnical properties knowledge also increases. Along these lines, the very current reach horizon of soil bioengineering is let obscure.

The incomplete methodological and analytical focus at the current soil bioengineering professional practice transcends the search and identification of biotechnical valuable species and is also present in the intervention scheme choice and design process. The existed models are strongly based on previous and empirical experience. Those models could in some level incorporate some scientific knowledge, however, without a complete analytical and quantified design process. The main difficulties, resulted from this empirical design process, are that new schemes are, at least partially, relegated to the experimental range. When the engineer faces a completely new problem or application he has not the necessary analytical tools to extrapolate his previous knowledge to the new situations. Such a lack of analytical approach is according Lewis⁹⁰ one of the fundamental difficulties to establish the professional field of soil bioengineering.

The main consequence of such empirical design process is reflected on the great variety of soil bioengineering intervention results. It can be found some soil bioengineering projects which fail from a technical aspect, being not able to convey appropriately the imposed requirements. On the other hand there are interventions exaggeratedly conservative, consisting of, in the words of Cornellini

⁸⁸ SCHIECHTL, H. M. *Sicherungsarbeiten im Landschaftsbau*. Grundlagen – lebende Baustoffe – Methoden. München: Callwey-Verlag, 1973. 244 p.

⁸⁹ CORNELINI, P. & SAULI, G. *Principi Metodi e Deontologia...* *Op. cit.*

⁹⁰ LEWIS, L. *Op. cit.*

⁹¹ CORNELINI, P. & FERRARI, R. *Op. cit.*

⁹² RANKINE, W. J. M. *Op. cit.*

⁹³ MORGAN, R. P. C. & RICKSON, R. J. *Op. cit.*

⁹⁴ MICKOVSKI, S. B. & Van BEEK, L. P. H. Decision support systems in eco-engineering: the case of the SDSS. p. 231-238, *In: STOKES, A. et al. Eco- and Ground Bio-Engineering: The Use of Vegetation to Improve Slope Stability*, 2007.

⁹⁵ STRAUB, H. A. *Op. cit.*

& Ferrari⁹¹, a case of deontological error. According to Rankine⁹² this conservative approach is a direct result of the unscientific design which is obligate to counteract the lack of analytical knowledge by the use of massive strength materials and schemes.

Soil bioengineering does not feature those abstract methods of design. According to Morgan & Rickson⁹³, without engineering quantification, vegetation cannot be included even in a simple way in engineering design procedures. The result is that soil bioengineering has its solutions largely based on the qualification of a mentor artisan (in a similar way to the master buildings in middle age). The term artisan is used here meaning a professional who is guided essentially by his intuition. Therefore, is the intuition, the key mark which distinguishes the engineer from the artisan, both have it, but just the last is uniquely and essentially oriented by intuited insights.

Soil bioengineering professional institution is marked by the scarce existence of literature, codes of practice, or regulation.⁹⁴ This current stage limits the prescription of these techniques on the design procedures. Other important consequence is the lack of confidence by the engineer to forecast performance at a safety level during the work lifetime, which in turn leads this same professional to reject such interventions. These challenges follows from the fact that the recourse to empirical design procedures means that it is impractical to specify limits for loadings or factors of safety in the engineering design process.

Regarding soil bioengineering training aspects, the current empirical stage prevents that both the learning and knowledge acquiring processes used on standard engineering courses could be replicated and adapted to this new engineering field. This is explained by the fact that an artisan and empirical knowledge request more practice and field experience than an analytically developed engineering branch.

It is important to note that if an intervention is based just on artisan and descriptive criteria, this not means that is an inferior solution in terms of quality. On descriptive phase of structural engineering many buildings such as the middle age gothic cathedrals, had a structural quality that hardly could be improved by the modern engineer.⁹⁵ However, regarding to its fundamental descriptive characteristics the constructive techniques of such buildings were only ruled by the master building. Furthermore, those techniques were not unique and change from master to

master. Those characteristics result in a very expensive knowledge appropriation and also in a very irregular knowledge transmission. Another negative consequence is the effort repetition and in many cases, a trial and error sequence which turns the very developing process a very cumbersome procedure.

In a similar way that happened to other engineering disciplines, the quantitative and abstract marks from analytical phase can open new possibilities that are previously unimaginable to soil bioengineering. While most engineering branches have as their main issues to answer “why” questions, soil bioengineering could not be restraint at every new challenge to answer only “how” questions, waiting for a long time until these new techniques become full established and accepted though the experience acquiring process.

Those difficulties should be appropriately addressed by an analytical approach, universally valid method, according the engineering premises and be not codified into subjective descriptions or dependent on experiment repetition or even closed on the artisan’s mind. This structured an analytical approach could stimulate the interest of and encourage engineers and others to employ such soil bioengineering measures. In the next section a program to structure the soil bioengineering developing as a more analytical discipline is suggested and discussed.

Developmental program

Since soil bioengineering constitutes a branch or a discipline of the traditional engineering, a similar path to its development can be traced. The improvement of soil bioengineering could be granted by both scientific progress and technical evolution.⁹⁶ A parallel to the correlated traditional science branches is not only efficient to characterize and to provide understanding about the developing phases of the current stage of soil bioengineering. It could also be used to reduce the time required to this discipline reaches an analytical stage. According to Morgan & Rickson⁹⁷ the waiting for decades to new soil bioengineering schemes become full established and the techniques completely evaluated can be avoided by stating the potential of soil bioengineering as science and justifying the techniques involved to practitioners. In other words, by developing it as an analytical science field. This approach corresponds to the very definition of engineering as a link between theoretical scientific knowledge and technical practical application. In

⁹⁶ CORNELINI, P. & FER-
RARI, R. *Op. cit.*

⁹⁷ MORGAN, R. P. C. &
RICKSON, R. J. *Op. cit.*

this way, the analytical setting of soil bioengineering, could be attained by appropriation, adaptation or even inspiration derived from all methodologies, practices, tests, protocols, procedures, and approaches that has being gradually evolved in the long developing process of correlated traditional engineering branches. This parallelism must be very regardful to specific particularities of soil bioengineering, mainly concerned to vegetative material and the additional finalities of its application such aesthetic, environmental and productive use of the intervention subjected area.

Even though plants constitute a very different material from those inert materials traditionally used in engineering building practices, vegetation, according to Schiechl & Stern⁹⁸, as well any other building material must comply with origin conditions, quality characteristics, size, and age in order to appropriately perform or support the engineering properties improvement of soil.

The very first step to compose such parallelism between soil bioengineering and correlated traditional engineering branches is to understand clearly how some determined plant species could enhance some soil engineering properties. For example, according to Genet and co-workers⁹⁹, if root system characteristics, which govern soil stabilization, could be better identified, screening of suitable species for use on unstable slopes would be more efficient. This identification process itself could be clear and broadly applied to other technical actions of soil bioengineering by means of a model, as showed in figure 2, which correlates at one side the stabilization requisites of the natural system, which implies the technical function of soil bioengineering, and at the other side the inherent vegetation characteristics, the so called botanic characteristic. The interlink between these two classes of properties is performed by means of biotechnical constitution¹⁰⁰ or biotechnical properties¹⁰¹.

In addition to the technical function consisting of improving natural systems physical stabilization, soil bioengineering has aesthetic, ecological and economical (since a soil bioengineering work can provide live vegetative materials to other interventions) finalities as showed in figure 2. It can also be used as source of other agricultural and forestry materials. This multifunctional character is, in several applications, a very useful feature¹⁰² which cannot be paired, in most cases, by correlated traditional engineering techniques. As a construction material, live material, has some requirements to keep itself active since its insertion on soil bioengineering schemes until the entire intervention

⁹⁸ SCHIECHTL, H. M. & STERN, R. *Water Bioengineering Techniques... Op. cit.*

⁹⁹ GENET, M. *et al.* The influence of cellulose content on tensile strength in tree roots. *Plant and Soil*, 278, p. 1-9, 2005.

¹⁰⁰ SCHIECHTL, H. M. & STERN, R. *Water Bioengineering Techniques... Op. cit.*

¹⁰¹ DURLO, M. A. & SUTILI, F. J. *Op. cit.*

¹⁰² EVETTE, A. *et al.* History of bioengineering techniques for erosion control in rivers in Western Europe. *Environmental Management*, 43, p. 972-984, 2009.

life cycle. Such requirements include ecological (soil, water and light conditions) and phytosociology (competition and interrelationship among species) requisites.

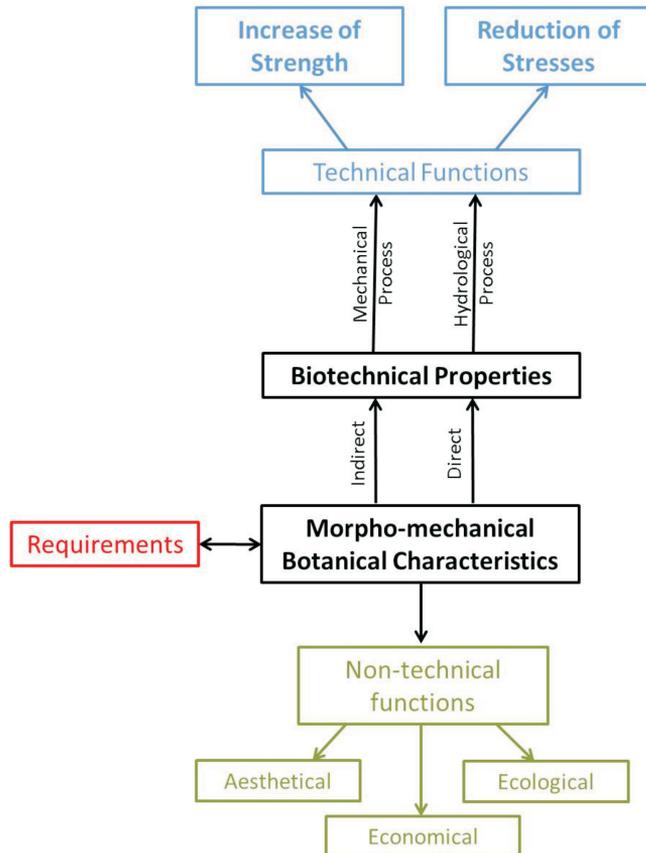


Figure 2: Correlation mode between live material construction and soil bioengineering functions.

The correlation model briefed in figure 2 can also clarify some concepts that, not infrequently, are mixed up. A brief literature survey in the soil bioengineering field is sufficient to reveal that not unusually; concepts such as finalities, functions, actions, properties, characteristics, approaches, techniques and schemes are not properly stated and distinguished in a rational way. It is also frequent that some causes and consequences are taken equally in a given list of properties or actions. It is also pertinent to propose a specified soil definition in the soil bioengineering perspective which share, but being not restricted to, the civil engineering approach to soil as a physic-chemical construction material and also having in common the productive and fertile point of view held up by agricultural sciences.

The biotechnical properties of a given vegetation specie or a group of plant species are those properties which can influence positively the soil engineering requisites. The action exerted by the biotechnical properties of vegetation upon soil engineering requisites could be classified in three classes according to the produced effects: mechanical, hydraulic and hydrological processes.¹⁰³ In general, effects of more than one group occur at same time.

¹⁰³MORGAN, R. P. C. & RICKSON, R. J. *Op. cit.*

The positive influence on the natural system stabilization could be exerted in a direct way, by improving the inherent soil properties, or the system strength, such as the reinforcement in soil matrix due some soil root systems. And also, it could be performed in an indirect way, by reducing the demand action of destabilizing agents, such as reducing runoff volume by evapotranspiration or infiltration.

On the other side the botanical characteristics are inherent to the plants themselves, describing their behavior in terms of ecology, physiology and morphology, which in combination; result in the biotechnical properties of such vegetation. As an example a given root system architecture, which is a botanic characteristic, could result in more or less pull-out resistance. The parallelism to a given inert material used in traditional interventions could be traced in such a way that the botanical plant characteristics are related to the biotechnical properties in the same way as the inert materials characteristics (gravity, elastic modulus, etc.) are to the technical their properties (strength, stiffness, etc.).

The biotechnical vegetation characteristics should be sought according a primordial purpose. This objective is the fulfillment of the technical finality of soil bioengineering. The soil engineering requisites are enhanced by the biotechnical plant properties, which in turn are explained by a proper set of inherent botanical plant characteristics.

A clear model which translates inherent plant characteristics into enhancing of desirable soil engineer requisites is, in the view of the authors, the very first step to the evolution of soil bioengineering from its current artisan-descriptive stage to a more analytical one. This model can be obtained by the following basic steps:

Step 1: This step consists basically of the specific identification of all engineering requisites regarding interventions of soil bioengineering, the identification of all biotechnical properties that influence or contributes to the enhancement of these engineering requisites; and the identification of morpho-mechanical botanical characteristics responsible, directly or indirectly by the biotechnical prop-

erties. Then, this step is completed by the derivation of a correlation model, between engineering requisites and plant inherent characteristics, which make possible a clear understanding to derive the strategies and approaches of the next suggested steps

Step 2: The main goal of this step is to study how the engineering requisites surveyed on Step 1, are enhanced by conventional construction materials and traditional engineering techniques. And also to study the analytical quantification of the biotechnical properties surveyed on Step 1. This step consists of a fully understanding of both traditional techniques and the yet developed efforts to quantify the biotechnical properties, making possible to determine, what methods could be directly used or inspire the same kind of developing regarding soil bioengineering practices, and what new procedures needed to be derived.

Step 3: This step has as its main goal to rank the biotechnical properties collected on step 1 according to their developing necessity regarding step 2. This rank considers further the current developing stage of the biotechnical properties and also their amount of influence on soil engineering requisites. Is also considered the interdependence between those properties, since some of them must need the prior developing of others. This step leads to a rational program in terms of resources and time to develop analytically the soil bioengineering. This is achieved by defining what traditional approaches could be applied to the prioritized biotechnical properties. And also by defining those properties whose quantification method must be developing completely aside the traditional techniques. This step makes possible to determine the biotechnical properties whose parameters quantification could be follow a related traditional counterpart and those whose path need to be entirely developed according to the peculiarities presented by the live vegetative material. It includes the development of standard protocols regarding search of plants with biotechnical properties following the correlation, turning the species search activity an analytical procedure such in the case of other conventional construction materials. This is achieved, mainly, by focusing on principles and making these procedures of general and universal application instead of local oriented practices and regionalisms.

This model contributes to the main applicability requisites of soil bioengineering, which are, according to Gray & Sotir¹⁰⁴: availability, installation feasibility, familiarity, techniques propagation and dissemination, design codes existence, and specification acceptance.

¹⁰⁴GRAY, D. H. & SOTIR, R.
B. *Op. cit.*

Both availability and installation feasibility are intimate related to the actual lacking knowledge regarding the local vegetation biotechnical properties. It is common that in many situations and many places the vegetation action is relegated to a minor contribution in reaching the engineering requisites. Even the search procedures and tests concerning both botanical characteristics and biotechnical properties are not standardized and analytical settled. In this sense a developing model to soil bioengineering must also to propose and to establish analytical procedures and methods regarding the plant species discovery.

In the familiarity issue, the very discipline structuration in an analytical frame and inspiration by a parallelism to the related traditional civil engineering branches lead to an appropriation of the existent familiarity to engineers engaged in traditional techniques. This structuration model also allows, by increasing the rational level at the design and construction procedures, the use of live plant material in infrastructure applications such roadways, railroads, pipelines rights-of-way, energy transmission line corridors, optical cables, etc. Since the aforementioned steps help the development of soil bioengineering as a feasible approach to common engineering applications where careful planning is needed, with live plants to be considered as veritable construction material. In this context, this program contributes to develop the professional institution of soil bioengineering practice, making possible the future creation of practice rules and design codes.

Regarding the promotion and dissemination, the main difficult according Schiechtl & Stern¹⁰⁵ is the remarkable pre-existent reluctance direct to soil bioengineering approach in preference to conventional methods. According to them, this reluctance results from both lack of training and acquired practical experience in such a new field. The analytical developing of soil bioengineering could help or even creates mechanisms to overcome such difficulties. The engineering training modern method is nowadays largely based upon the analytical teaching, which could not be done in the case of an artisan knowledge, whose training depends on years of experienced based apprenticeship.

Final remarks

Soil bioengineering has as its main and distinguishable characteristic the use of live vegetation elements as construction material. Focusing on native species, local natural materials, reduced impacts and modification and the syner-

¹⁰⁵SCHIECHTL, H. M. & STERN, R. *Handbuch für...*
Op. cit.

gy between inert and live materials soil bioengineering techniques are a very suitable approach to stabilize natural systems. This is attained due to the flexibility, nature emulation, and high level of integration exhibited by soil bioengineering schemes.

Soil bioengineering is a branch of civil engineering and has aside its primordial technical functions of stabilize natural systems, further finalities such as aesthetic, ecological and economic objectives. Actually, a soil bioengineering design process embraces more than a typical traditional engineering work, it consists of an ecosystem design.

Although soil bioengineering schemes are not new, the settlement of this discipline as a technical and scientific engineering branch is relatively recent. Soil bioengineering current stage is characterized by an artisan and descriptive approach, commonly exhibited by other engineering disciplines in their gradual developing course. This non-analytical stage of soil bioengineering is characterized by a highly empirical professional practicing, a not fully organized professional institution and a practical experienced-based professional training process.

Many obstacles to soil bioengineering broader acceptance by the engineering community and also difficulties to its developing are a direct consequence of this current descriptive and artisan character. Examples of negative consequences of this present stage are: lack of confidence by designers in the prescription of soil bioengineering measures, irregular and time consuming training processes, long developing processes of new schemes and methods.

As an engineering branch, soil bioengineering could be analytically developed tracing a parallel to its correlated other engineering disciplines. A program to develop and structure soil bioengineering as an analytical engineering field was presented. This program is fundamentally based on a model that clearly interlinks morpho-mechanical botanical characteristics and biotechnical properties of plants to the needed stabilization requisites of natural systems. The proposed program contributes directly to the applicability and the dissemination of soil bioengineering techniques by a broader professional community in a more uniform and rational way. It also allows the use of soil bioengineering schemes in infrastructure applications such as roadway works. This structuration contributes to the developing of new soil bioengineering methods, and to more feasible training processes of such engineering discipline.

Fabrício Jaques Sutili has a Degree in Forest Engineering, PhD in Soil Bioengineering. Professor at the Department of Forest Sciences at Federal University of Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brazil.

fjsutili@gmail.com

Elvidio Gavassoni has a Degree in Civil Engineering, PhD in Structural Engineering. Professor at Federal University of Paraná, Curitiba, Brazil.

gavassoni@ufpr.br



ASPECTOS TÉCNICOS DAS PLANTAS UTILIZADAS EM ENGENHARIA NATURAL

Rita dos Santos Sousa
Fabrcio Jaques Sutili

Técnicas 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 Sousa¹ 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 & Richards², Morgan & Rickson³ e Sauli & Cornelini⁴.

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.⁵

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.⁶

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.⁷ Compreende técnicas de baixo impacto ambiental que baseiam-se essencialmente nas propriedades biotécnicas de algumas espécies de plantas.⁸

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.⁹

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 – benefício¹⁰. 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.

- ¹ 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.
- ² 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.
- ³ MORGAN, R. P. C. & RICKSON, R. J. *Slope stabilization and erosion control – A bioengineering approach*. 1ª. ed. London, UK: Chapman & Hall, 1995.
- ⁴ SAULI, G.; CORNELINI, P. & PRETI, F. *Manuale d'Ingegneria Naturalistica applicabile al settore idraulico*. Roma, Itália: Regione Lazio, 2002.
- ⁵ SCHIECHTL, H. *Bioengineering for land reclamation and conservation*. Edmonton, Canada: Department of the Environment, Government of Alberta. University of Alberta Press, 1980.
- ⁶ 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.
- ⁷ 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.
- ⁸ 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.

⁹ 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.

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

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

¹² 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.*

¹³ 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.¹¹.

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.*¹²

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 1.¹³

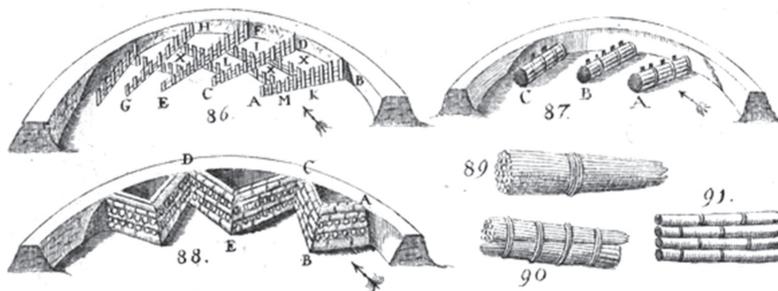


Figura 1: Aplicação de vegetação em obras hidráulicas.¹⁴

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.¹⁵

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.¹⁶

- ¹⁴ 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.
- ¹⁵ 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.*
- ¹⁶ FERNANDES, J. & FREITAS, A. *Op. cit.*
- ¹⁷ SAULI, G. & CORNELINI, P. *Manuale di Indirizzo delle Scelte Progettuali per Interventi di Ingegneria Naturalistica... Op. cit.*
- ¹⁸ MENEGAZZI, G. & PALMERI, F. *Il Dimensionamento delle Opere di Ingegneria Naturalistica*. Roma, Itália: Regione Lazio, 2013.
- ¹⁹ MENEGAZZI, G. & PALMERI, F. *Il Dimensionamento delle Opere di Ingegneria Naturalistica*. *Op. cit.*
- ²⁰ SAULI, G.; CORNELINI, P. & PRETI, F. *Manuale d'Ingegneria Naturalistica applicabile al settore idraulico... Op. cit.*
- ²¹ 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.¹⁷

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.¹⁸

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 gerais¹⁹:

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.²⁰ As intervenções, quando necessárias, são realizadas para solucionar o problema, evitando-se sobredimensionamento (erro deontológico) ou subdimensionamento (erro técnico) conforme figura 2;²¹

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.²²

²² 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).

²³ 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).²³

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

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.²⁴

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.²⁵

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.²⁶

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.²⁷

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.²⁸

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.²⁹

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

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

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

²⁶ FERNANDES, J. & FREITAS, A. Op. cit.

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

²⁸ FERNANDES, J. & FREITAS, A. Op. cit.

²⁹ 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.³⁰

³⁰ 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.³¹

³¹ 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.³²

³² 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,³³ 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 concentração³⁴, na evapotranspiração e no armazenamento de água no solo³⁵. Afetando o volume e as taxas de água ao longo das linhas de fluxo, as plantas influenciam o processo e a amplitude da erosão. Também modificam o teor de umidade do solo e conseqüentemente a sua resistência.

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

³⁴ 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).

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

³⁶ 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 Thornes³⁶ para o sudeste da Espanha. Esse autor assume que a erosão conduz a uma desregulação do balanço hídrico do solo, resultando em li-

³⁷ MORGAN, R. P. C. & RICKSON, R. J. *Op. cit.*

³⁸ 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.³⁷

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

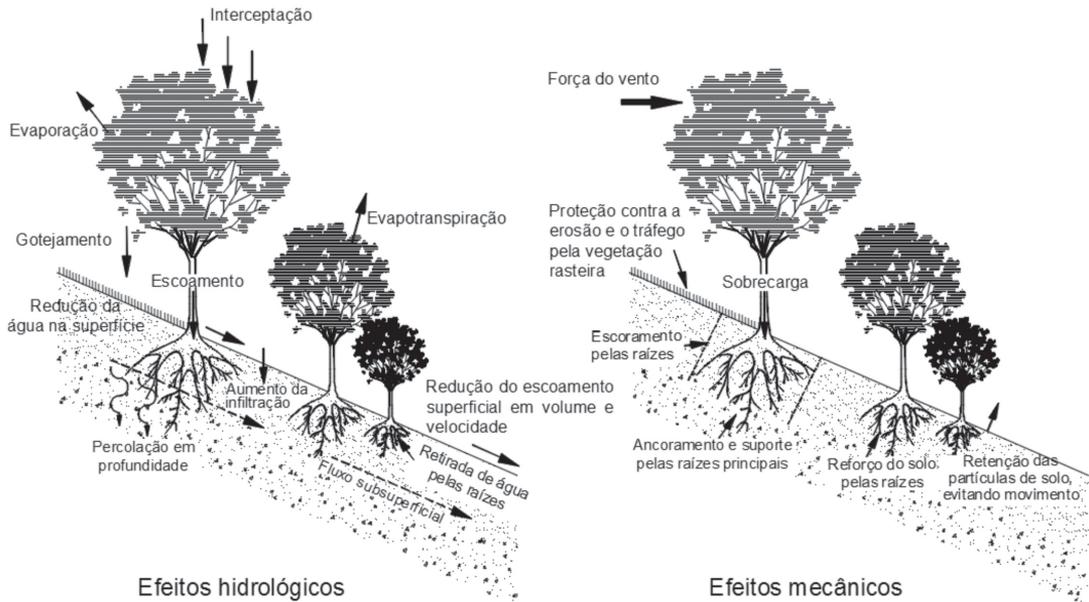


Figura 3: Efeitos físicos (hidrológicos e mecânicos) da vegetação³⁹ (adaptado de Coppin & Richards).

³⁹ 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).

⁴⁰ SOUSA, R. S. *Op. cit.*

Quadro 1: Classificação de funções técnicas e adicionais.⁴⁰

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.⁴¹

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

⁴¹ 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 4.⁴²

⁴² SOUSA, R. S. *Op. cit.*

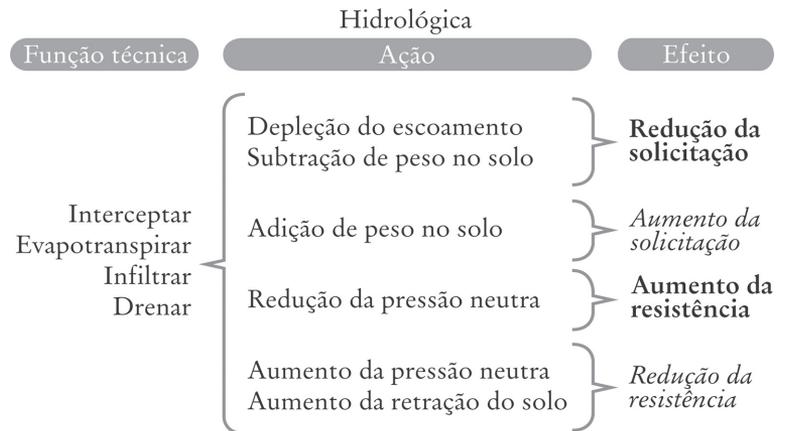


Figura 4: Funções hidrológicas das plantas na estabilidade dos taludes. (em negrito: efeitos positivos; em itálico: efeitos negativos)

a. Interceptar

Autores como Coppin & Richards, Morgan & Rickson e Venti *et al.*⁴³ 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.⁴⁴ 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.

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

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

⁴⁴ 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.⁴⁵ 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.⁴⁶

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.⁴⁷

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 foliar⁴⁸, 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.⁴⁹

⁴⁵ 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.*

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

⁴⁷ SOUSA, R. S. *Op. cit.*

⁴⁸ O índice de área foliar (IAF) ou leaf area index (LAI) é um parâmetro biofísico que caracteriza um dossel florestal e está diretamente relacionado com a evapotranspiração e produtividade. Expressa uma relação entre área da superfície foliar (apenas a parte superior) e a área projetada no solo (m²/m²) WATSON, 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.

⁴⁹ 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.⁵⁰

⁵⁰ 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.

⁵¹ 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.

⁵² ZIEMER, R. R. *Logging effects on soil moisture...* *Op. cit.*

⁵³ 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.

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

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

Coppin & Richards, Gray e Ziemer⁵¹ afirmam que a capacidade da vegetação alterar o teor de umidade no solo é grande e pode, especialmente, se estender para além da região ocupada pelo sistema radicular. Medições feitas por Ziemer⁵² 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 freatófitas⁵³ 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.⁵⁴ 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.⁵⁵

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.⁵⁶

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.

⁵⁵ 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.

⁵⁶ SOUSA, R. S. *Op. cit.*

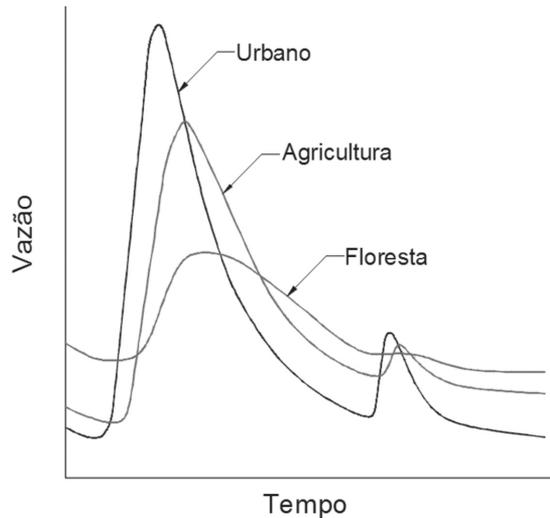


Figura 5: Escoamento superficial para diferentes tipos de cobertura vegetal.⁵⁷

⁵⁷ 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.⁵⁸ 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.

⁵⁸ 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.⁵⁹ Tais efeitos negativos são, no entanto, atenuados pela interceptação e evapotranspiração, explicadas anteriormente, e pela drenagem, que será explicada em seguida.

⁵⁹ 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.⁶⁰

⁶⁰ 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.*

⁶¹ 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.⁶¹

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 flexão⁶². 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).

⁶² 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.⁶³ 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 (ϕ), 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 Δs , que resulta de um aumento da resistência devido à resistência à tração das raízes (equação 2). O Δs 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

⁶³ 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.icvirtual-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.

- ⁶⁴ COPPIN, N. & RICHARDS, I. G. (Eds.). *Op. cit.*
- ⁶⁵ COPPIN, N. & RICHARDS, I. G. (Eds.). *Op. cit.*
- ⁶⁶ 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.
- ⁶⁷ 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.*
- ⁶⁸ 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 ΔS) são equivalentes, conforme se observa na figura 6.

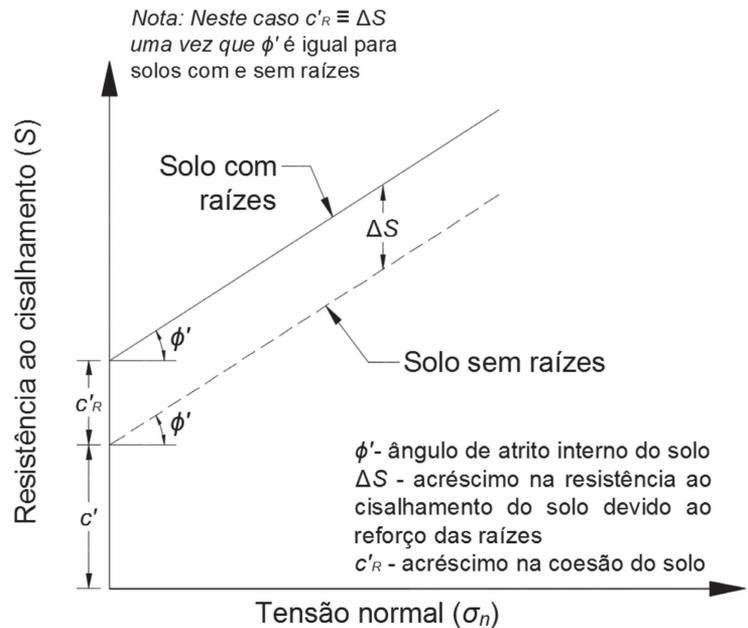


Figura 6: Efeito do reforço das raízes na resistência ao cisalhamento do solo.⁶⁴

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.⁶⁵

O sistema radicular também promove a ancoragem, o arqueamento e escoramento do solo.⁶⁶ 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. Gray⁶⁷, 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 regolito⁶⁸ e do lençol freático, bem como da capacidade das raízes penetrarem a rocha-matriz (figura 7).

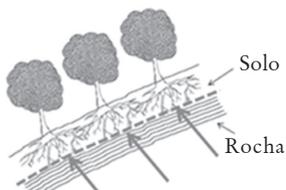
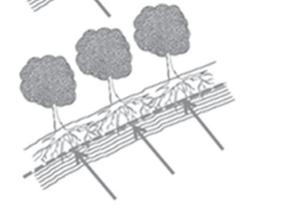
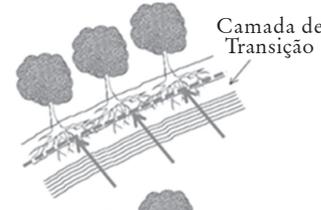
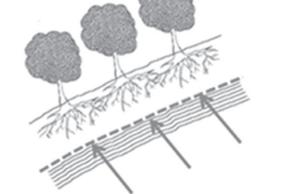
	Descrição	Efeito das raízes na estabilização
	<p>A. Camada fina de regolito totalmente reforçada pelas raízes; base de rocha firme impenetrável por raízes</p>	<p>Leve; a superfície potencial de ruptura encontra-se na interface dos dois tipos de solo</p>
	<p>B. Semelhante ao tipo A; no entanto, a rocha-matriz 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.⁶⁹

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

⁶⁹ 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.*

⁷⁰ 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.⁷⁰

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

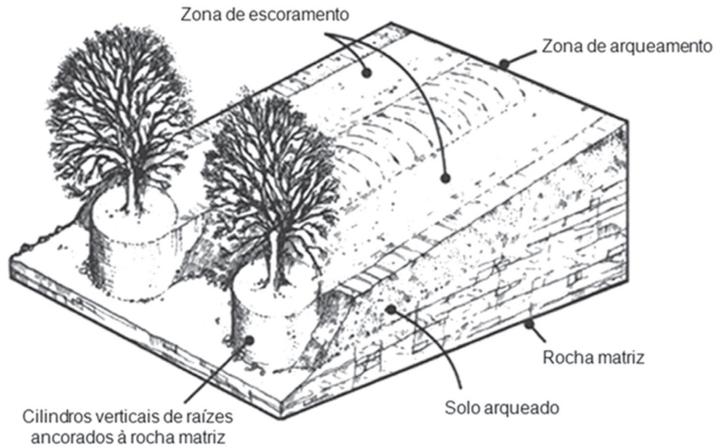


Figura 8: Representação esquemática dos efeitos de ancoragem, arqueamento e escoramento das plantas no solo.⁷¹

⁷¹ 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.

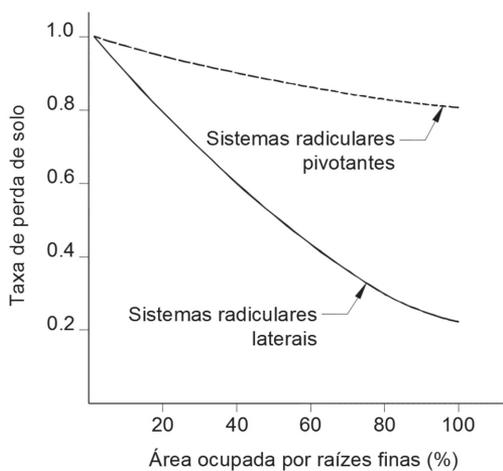


Figura 9: Relação entre perda de solo e percentagem de área ocupada por raízes finas.⁷²

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.⁷³

⁷³ 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.*

⁷⁴ 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)

⁷⁵ SOUSA, R. S. *Op. cit.*

Plantas com sistemas radiculares compostos por raízes finas (até 5,0mm de diâmetro)⁷⁴ 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.⁷⁵

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.⁷⁶

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.⁷⁷ 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.⁷⁸

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

⁷⁶ 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.

⁷⁷ COPPIN, N. & RICHARDS, I. G. (Eds.). *Op. cit.*

⁷⁸ 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.⁷⁹

⁷⁹ 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.⁸⁰

⁸⁰ 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-

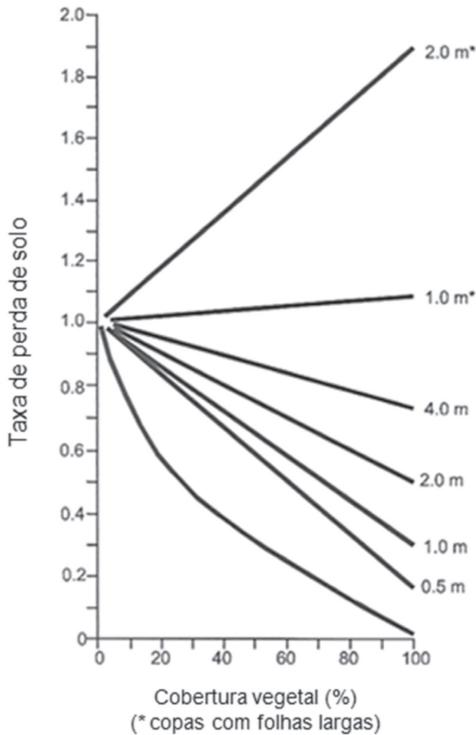


Figura 10: Taxa de perda de solo via desagregação por impacto da gota de chuva relacionada com a percentagem de cobertura de solo para diferentes alturas de copas.⁸¹

⁸¹ COPPIN, N. & RICHARDS, I. G. (Eds.). *Op. cit.*

⁸² 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.*

⁸³ 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.⁸²

A vegetação reduz igualmente a velocidade do escoamento superficial, consequência da rugosidade gerada pelas folhas, ramos e caules das plantas.⁸³ 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.⁸⁴ 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.

⁸⁴ 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.

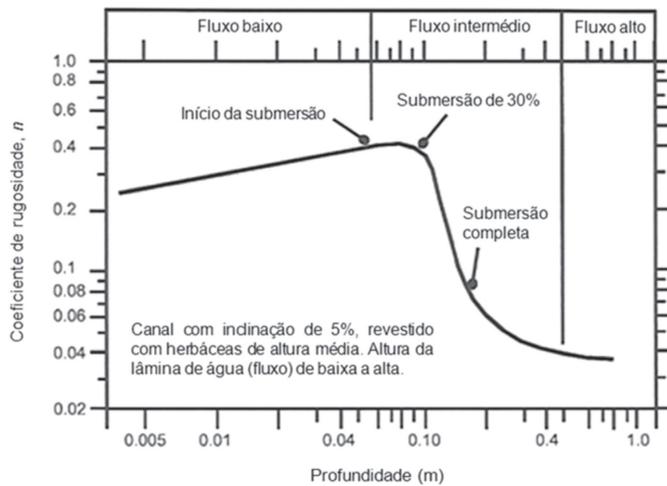


Figura 11: Relação entre coeficiente de Manning e profundidade da lâmina de água para vegetação herbácea de altura média.⁸⁵

⁸⁵ COPPIN, N. & RICHARDS, I. G. (Eds.). Op. cit.

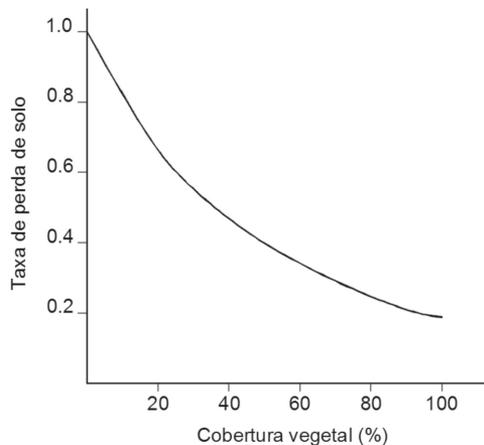


Figura 12: Alteração da taxa de perda de solo devido à redução do volume de escoamento superficial em função do aumento de percentagem de cobertura vegetal.⁸⁶

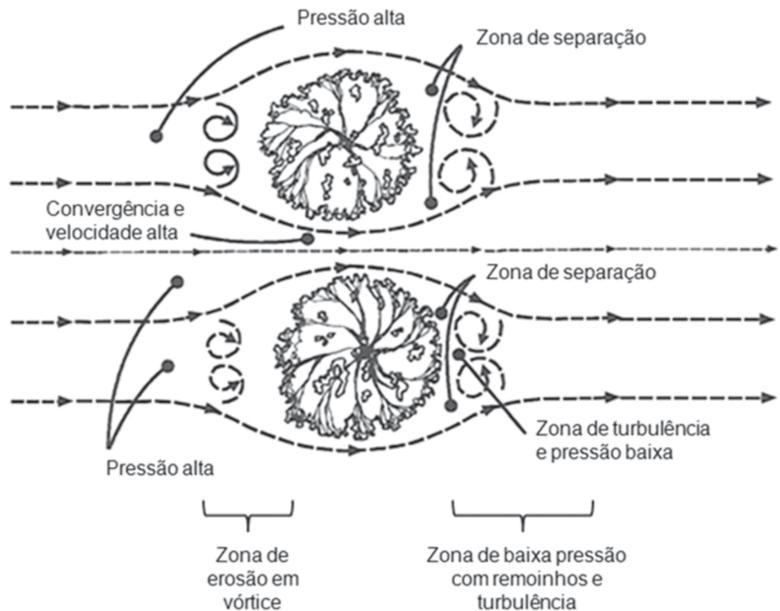
⁸⁶ COPPIN, N. & RICHARDS, I. G. (Eds.). Op. cit.

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 cheia⁸⁷.

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.

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



⁸⁸ COPPIN, N. & RICHARDS, I. G. (Eds.). *Op. cit.*

Figura 13: Vista em planta do fluxo de água em volta da vegetação.⁸⁸

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.⁸⁹ Este fenômeno tende a afetar taludes naturais e artificiais, especialmente canais fluviais e pluviais, aumentando a solitação sobre o solo.⁹⁰

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 Reynolds⁹¹ 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)⁹². 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 solitação sobre o solo.⁹³

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 solitação 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 solitação 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 solitação sobre o solo causada pela existência de plantas.⁹⁴

⁸⁹ COPPIN, N. & RICHARDS, I. G. (Eds.). *Op. cit.*

⁹⁰ SOUSA, R. S. *Op. cit.*

⁹¹ 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*. 4ª. ed. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, USP, 2006).

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

⁹³ SOUSA, R. S. *Op. cit.*

⁹⁴ 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.⁹⁵ Este efeito é positivo e aumenta a resistência da massa de solo como um todo.⁹⁶

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.⁹⁷

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

⁹⁵ COPPIN, N. & RICHARDS, I. G. (Eds.). *Op. cit.*

⁹⁶ SOUSA, R. S. *Op. cit.*

⁹⁷ 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 & Megahan⁹⁸ 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.

⁹⁸ GRAY, D. H. & MEGAHAN, W. F. *Op. cit.*

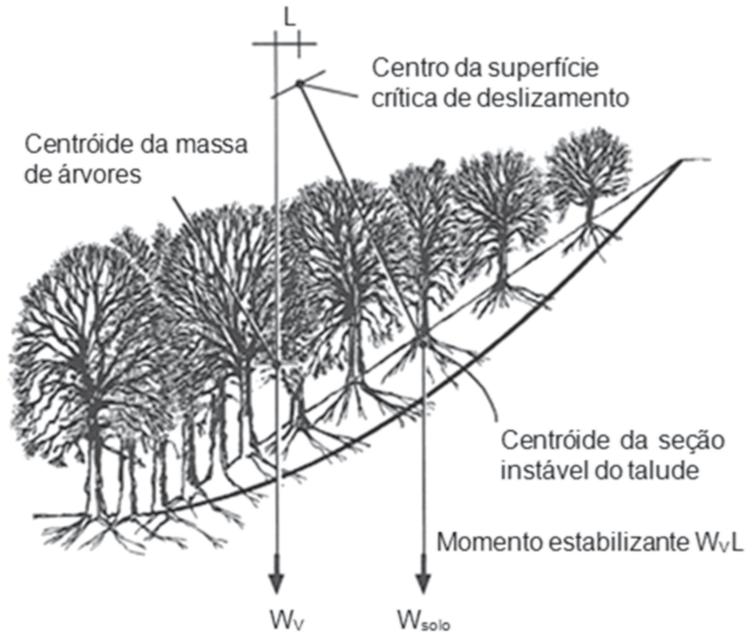


Figura 14: Efeitos da sobrecarga causada por árvores na base de uma superfície de deslizamento.⁹⁹

⁹⁹ COPPIN, N. & RICHARDS, I. G. (Eds.). *Op. cit.*

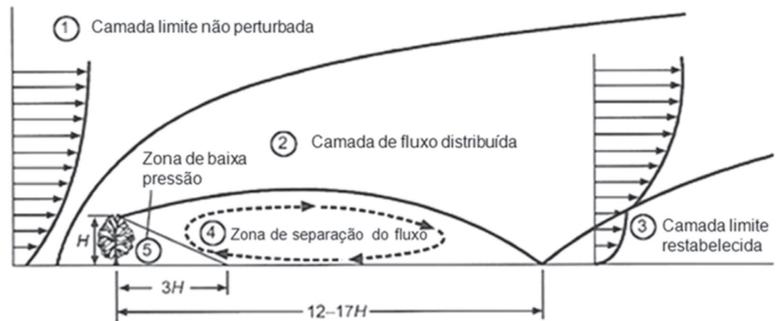
Ou seja, dependendo de fatores como a geometria do talude e da distribuição das árvores, o efeito de sobrecarga pode encaminhar forças solicitantes ou resistentes, aumentando a resistência do solo ou aumentando a sollicitação sobre o solo, respectivamente.¹⁰⁰

¹⁰⁰ 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.¹⁰¹ 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.

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



¹⁰²COPPIN, N. & RICHARDS, I. G. (Eds.). *Op. cit.*

Figura 15: Padrão de fluxo de ar ao redor de um quebra-vento.¹⁰²

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 Beaufort¹⁰³). 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.¹⁰⁴

¹⁰³Escala 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.

¹⁰⁴SOUSA, 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.

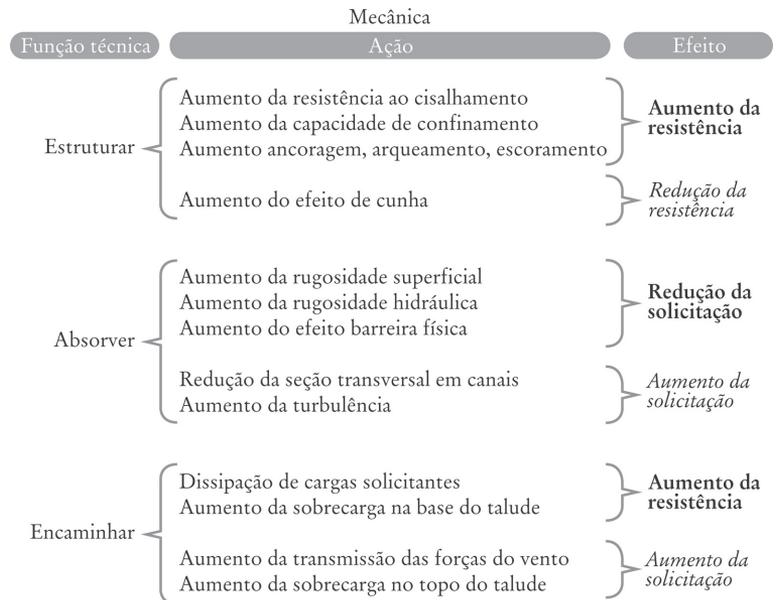


Figura 16: Funções mecânicas das plantas na estabilidade dos taludes. (em negrito: efeitos positivos; em itálico: efeitos negativos)

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 clímax¹⁰⁵ 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

¹⁰⁵Vegetação 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.

¹⁰⁶WATERWAYS 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.

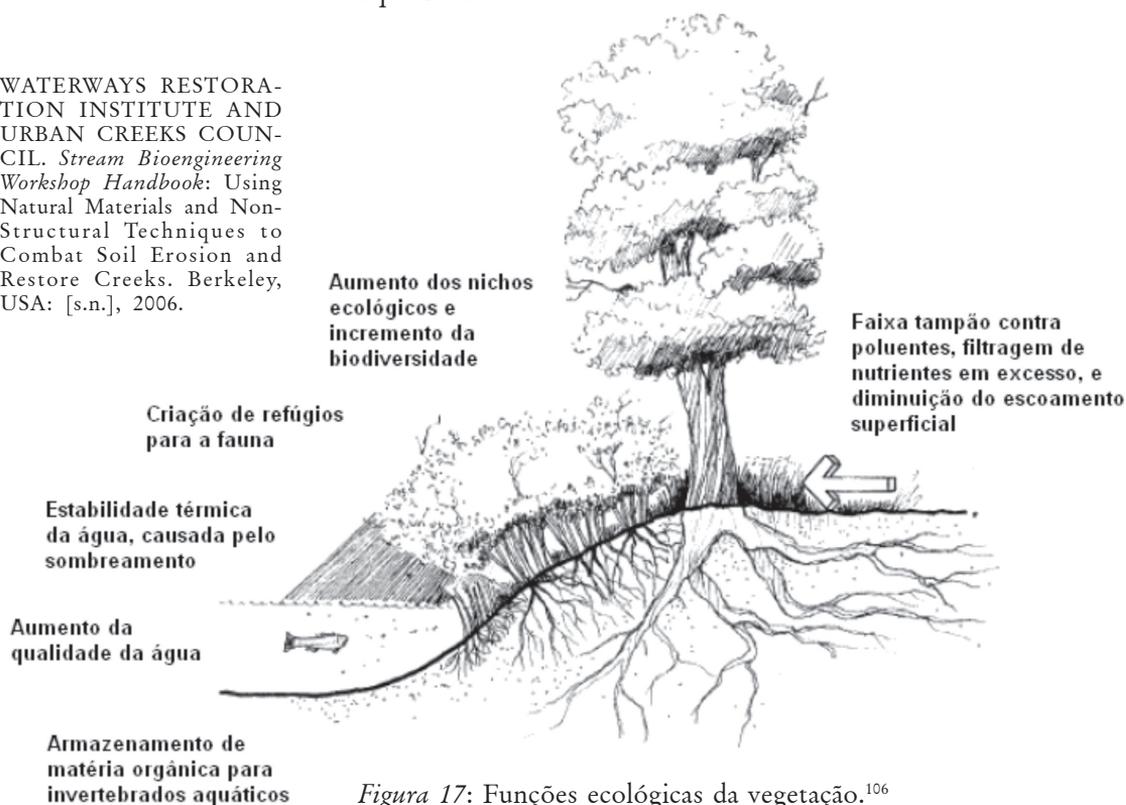


Figura 17: Funções ecológicas da vegetação.¹⁰⁶

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.

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

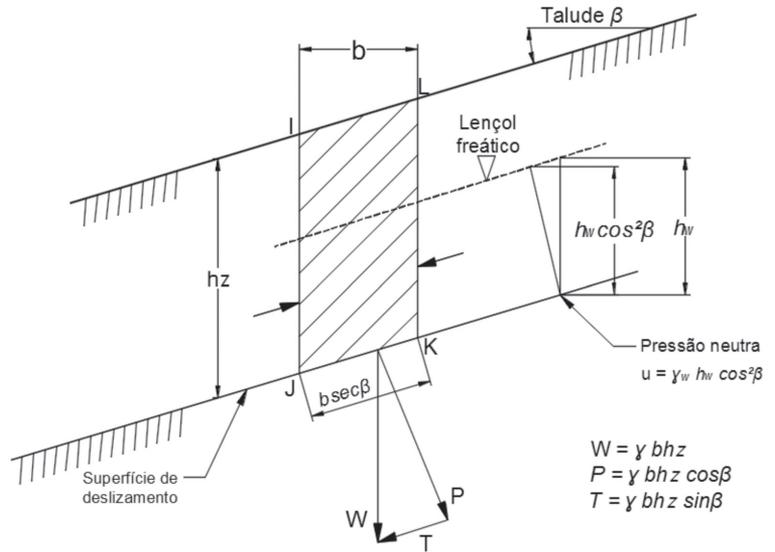


Figura 18: Fatores considerados para análise de estabilidade de taludes, pelo método do talude infinito.¹⁰⁷

¹⁰⁷MORGAN, 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)

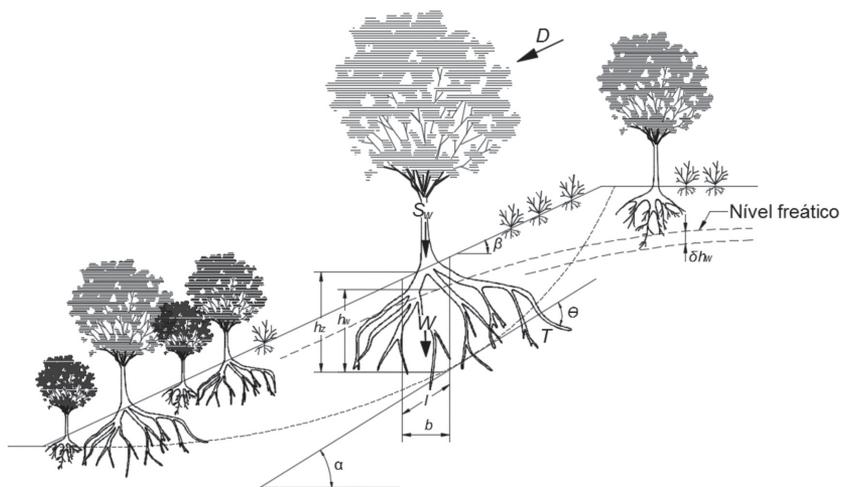


Figura 19: Fatores de maior influência da vegetação na estabilidade de taludes.¹⁰⁸

¹⁰⁸COPPIN, N. & RICHARDS, I. G. (Eds.). *Op. cit.*

¹⁰⁹COPPIN, N. & RICHARDS, I. G. (Eds.). *Op. cit.*

Parâmetros aplicados na análise de estabilidade de solos¹⁰⁹ e nas equações 4 e 5:

- Efeitos devido à vegetação
- W - Peso total da fatia de solo (kN/m²);
 - c' - Coesão efetiva do solo (kN/m²);
 - 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/m²);
 - u_v - Diminuição da pressão neutra da água causada pela evapotranspiração pela vegetação na superfície de ruptura (kN/m²);
 - c'_R - Contribuição das raízes à coesão do solo (kN/m²);
 - c'_S - Contribuição da sucção à coesão do solo (kN/m²);
 - S_W - Sobrecarga devido ao peso da vegetação (kN/m²);
 - 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_ω - Altura de água acima da superfície de ruptura (m);
 - h_z - 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/m³);
 - γ_ω - Peso específico da água (=9.8 kN/m³)

¹¹⁰BISHOP, 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.¹¹⁰

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. Não 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.

¹¹¹WU, T. H. *Op. cit.*

Em estudo desenvolvido por Wu¹¹¹, 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.¹¹²

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

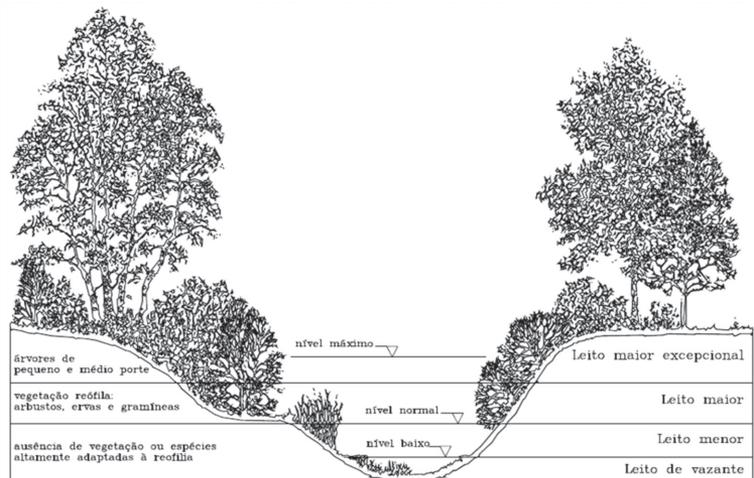
4 Requisitos

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.



¹¹³DURLO, M. & SUTILI, F.
Op. cit.

Figura 20: Distribuição ecológica da vegetação ciliar.¹¹³

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

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		●		●						●

¹¹⁴COPPIN, 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.¹¹⁵

¹¹⁵SOUSA, 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 solitação 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.

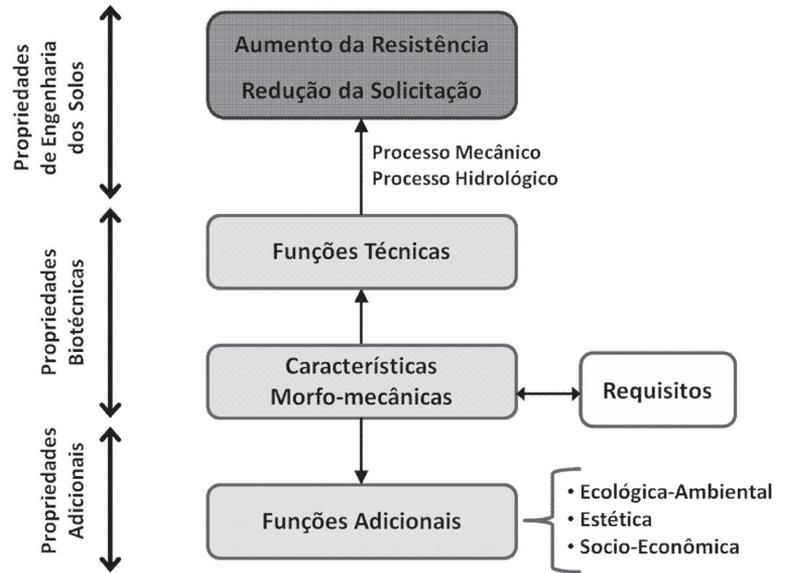


Figura 21: Correlação entre as propriedades das plantas e as funções da Engenharia Natural.

6 Conclusão

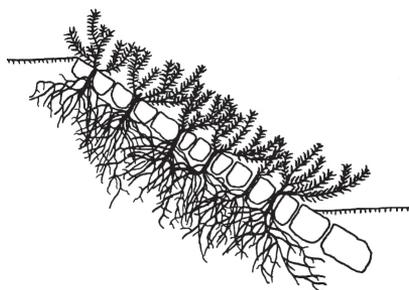
Definidos e estruturados todos os conceitos relativos à utilização e importância das plantas como material construtivo vivo, em intervenções de Engenharia Natural, sejam eles relativos às suas funções técnicas hidrológicas e mecânicas ou adicionais, sejam sobre os seus efeitos nas propriedades de engenharia 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



METODOLOGIA PARA ELABORAÇÃO DE PROJETOS DE ENGENHARIA NATURAL EM OBRAS DE INFRAESTRUTURA

Charles Rodrigo Belmonte Maffra
Fabício Jaques Sutili

A Engenharia Natural, assim como outras disciplinas da Engenharia, dispõe de um conjunto de procedimentos que servem para auxiliar a tomada de decisão do engenheiro durante a elaboração de um projeto. Esses procedimentos são semelhantes aos empregados em projetos convencionais de Engenharia Civil, diferindo apenas por peculiaridades intrínsecas à vegetação, da qual se obtém os materiais construtivos vivos, principal diferencial das obras biotécnicas. O procedimento de projeto de Engenharia Natural para aplicação em obras de infraestrutura aqui apresentado é constituído por três etapas: a conceitual, a básica e a executiva. Para que essas três etapas sejam plenamente desenvolvidas, existem objetivos específicos para cada uma delas. Tais objetivos, quando observados, servem de orientação segura e objetiva no processo decisório do projetista.

Introdução

¹ **Engenharia** – enquanto são utilizados dados técnicos e científicos com fins construtivos, de consolidação e anti-erosivos; **Natural** – enquanto são utilizados materiais vivos, predominantemente plantas de espécies locais, com a finalidade de reconstrução do ecossistema natural próximo do original e o aumento da biodiversidade – também se considera o emprego de materiais mortos de origem vegetal (MENEGAZZI, G. & PALMERI, F. *Il dimensionamento delle opere di ingegneria naturalistica*. Direzione Regionale Infrastrutture, Ambiente e Politiche abitative – Regione Lazio, Roma, 2013.).

A aplicação das soluções de Engenharia Natural¹ em obras de infraestrutura precisa, indispensavelmente, de um projeto para definir e hierarquizar as etapas e atividades em uma sequência analítica de desenvolvimento. A quantidade de informações geradas em empreendimentos de infraestrutura é muito grande, o que torna praticamente impossível manter o controle de qualidade – segurança econômica e ambiental – sem lançar mão de um documento escrito que sirva como referência a ser seguida. A falta de um documento desse tipo pode aumentar a chance de equívocos, além de reduzir a qualidade das obras como um todo, pois fomenta a tomada de decisões subjetivas e, geralmente, o emprego de procedimentos de implantação com base em conclusões precipitadas.

Para evitar esses problemas, a Engenharia Natural, assim como outras disciplinas da Engenharia, dispõe de um conjunto de procedimentos que servem para auxiliar o processo decisório do engenheiro durante a elaboração de um projeto. Esses procedimentos são semelhantes aos empregados em projetos convencionais de Engenharia Civil, diferindo apenas por peculiaridades que dizem respeito à vegetação, da qual se obtém os materiais construtivos vivos, que são o principal diferencial das obras biotécnicas.²

² SCHIECHTL, H. M. & STERN, R. *Ground Bioengineering Techniques for Slope Protection and Erosion Control*. Oxford: Blackwell Science Publications, 1996.
MORGAN, R. P. C. & RICKSON, R. J. (Ed.). *Slope stabilization and erosion control: a bioengineering approach*. London: E & FN SPON, 1995. 274 p.

O procedimento de projeto de Engenharia Natural para a aplicação em obras de infraestrutura aqui apresentado é constituído por três etapas: a conceitual, a básica e a executiva.

Para que essas três etapas sejam plenamente desenvolvidas, existem objetivos específicos para cada uma delas, os quais, quando observados, constituem orientação objetiva e analítica no processo decisório do projetista.

No presente artigo, as fases de projeto mencionadas são apresentadas em ordem de desenvolvimento. Inicialmente são descritos os objetivos que devem ser alcançados em cada uma das três fases de projeto. Após, são definidas e descritas, em tópicos, as atividades que devem ser realizadas para atingir os objetivos de cada fase. Ao longo da seção, os tópicos principais são organizados em esquemas, e ao seu término, é apresentado um fluxograma que condensa a sequência do método de abordagem.

Fases de um projeto de Engenharia Natural

Cada uma das fases de um projeto de Engenharia Natural tem o objetivo de responder a diferentes questões

durante o processo decisório envolvido na prática de Engenharia Natural aplicada em obras de infraestrutura. Desses objetivos resultam características específicas que podem ser resumidamente explicadas da seguinte maneira:

Fase conceitual – são identificados os problemas e os objetivos do projeto; as alternativas de tratamento são formuladas e é prescrita a aquisição de informações específicas e necessárias para a elaboração das fases subsequentes.

Fase básica – são selecionadas as intervenções mais adequadas; a fenomenologia do problema é estudada e considerada no dimensionamento das intervenções; os riscos são analisados e as considerações estéticas e ecológicas das intervenções são feitas.

Fase executiva – abordam-se as informações necessárias para a implantação da obra; para isso, as atividades e serviços são descritos minuciosamente. Nessa fase é especificada a forma como as estruturas devem ser construídas, incluindo-se os desenhos detalhados e as plantas de projeto; seguem-se o cronograma executivo e as formas de monitoramento e manutenção da obra; além disso, são elencados, quantificados e orçados os materiais e a mão-de-obra necessários para tal.

1 *Objetivos de projeto*

1.1 *Fase conceitual*

A fase conceitual busca atingir três objetivos: identificar os objetivos do projeto, identificar as alternativas de tratamento e prescrever a aquisição de informações adicionais ao projeto.

I – Identificar os objetivos do projeto

O primeiro objetivo da fase conceitual é identificar, ou seja, nomear e classificar, bem como descrever qualitativamente as demandas da intervenção. É preciso considerar claramente quais requisitos técnicos (proteção, estabilização e/ou consolidação) são necessários ao sistema objeto do projeto, que, em se tratando de Engenharia Natural, quase sempre consiste de um sistema natural³.

II – Identificar as alternativas de tratamento

Depois de identificadas as necessidades para se alcançar a estabilidade do sistema, esse conjunto de informações constitui a base para iniciar a identificação e a escolha das alternativas viáveis de Engenharia Natural, que atendam aos objetivos requeridos pelo projeto. Nesta fase, a viabilidade das alternativas é analisada, contudo, apenas qualitativamente.

³ Como sistema natural entende-se os locais de interesse de um determinado projeto, bem como suas feições, elementos inertes e vivos e sua interação com o entorno. Podem ser citados como exemplo de sistemas naturais, ecossistemas em geral, sistemas fluviais, bacias hidrográficas, encostas ou vertentes, fundos de vales e qualquer um de seus subsistemas em qualquer nível desejado.

te, uma vez que neste estágio ainda são incipientes as informações quantitativas sobre os processos em questão. Quando apropriado ou necessário, também podem ser formuladas novas sugestões de intervenção de modo empírico e qualitativo, principalmente quando a situação analisada tiver peculiaridades cujos requisitos não são plenamente atendidos pelos métodos de Engenharia Natural já estabelecidos.

III– Prescrever a aquisição de informações adicionais ao projeto

Para que se possa tornar analítico, o estudo preliminar de viabilidade feito quando se identificam, de modo qualitativo, as alternativas com viabilidade de aplicação, é necessária a prescrição de aquisição de informações que propiciem, nas próximas etapas do projeto, uma precisa fundamentação teórica. Essa prescrição constitui o terceiro objetivo da fase conceitual e compreende a descrição das informações a serem obtidas, os métodos para sua obtenção, as quantidades necessárias de dados, de ensaios, e as formas de apresentação dos seus resultados. De modo geral, esse conjunto de prescrições engloba os seguintes dados: levantamentos e ensaios de campo, laboratório, informações documentais e outros dados que se entendam necessários de acordo com a tipologia da área e as especificidades do problema.

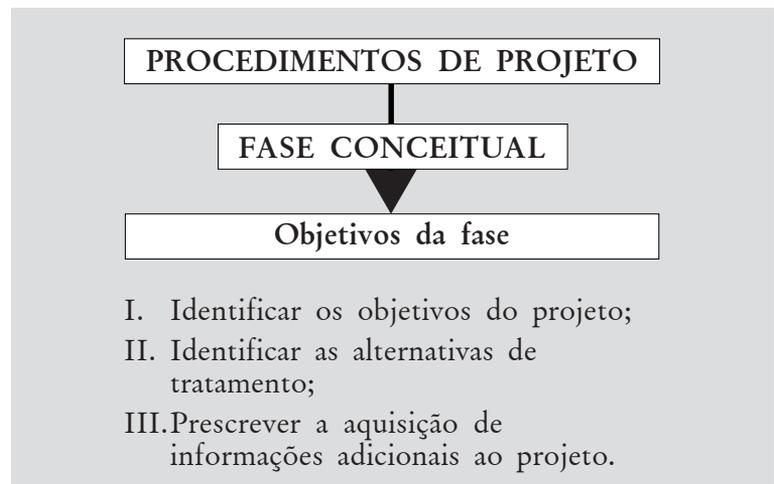


Figura 1: Objetivos da fase conceitual de projeto.

1.2 Fase básica

A fase básica busca atingir cinco objetivos principais: escolher a abordagem de projeto, dimensionar as interven-

ções, estimar os custos, analisar os riscos associados e avaliar estética e ambientalmente as intervenções.

I – Escolher a abordagem de projeto

A partir das soluções apontadas na fase conceitual, o primeiro objetivo da fase básica de projeto é escolher aquela que seja a mais viável quanto aos critérios técnicos, econômicos, de exequibilidade, ecológicos, estéticos, de manutenção e de segurança. Nesta fase, o processo é conduzido analiticamente, ou seja, as inferências feitas na fase conceitual são fundamentadas por informações numéricas obtidas por cálculos específicos, baseadas em leis empíricas ou formulações analíticas que descrevam a fenomenologia identificada. O processo que envolve essa tomada de decisão é flexível e, por isso mesmo, novas análises quantitativas (principalmente os dimensionamentos da fase posterior) são realizadas e diferentes condições são constatadas, de modo que a definição das alternativas pode ser adaptada ou substituída para melhor atender às necessidades de projeto.

II – Dimensionar as intervenções

O segundo objetivo da fase de projeto básico é determinar a forma de intervenção, o tipo de material (vivo e/ou inerte), as dimensões, as configurações e o conjunto de todos os elementos constituintes da intervenção. A determinação desse conjunto de informações é comumente chamada de dimensionamento. É nesta etapa, portanto, que são realizados os dimensionamentos hidrológico, hidráulico, estrutural, geotécnico e vegetacional (escolha e uso de plantas com as características biotécnicas adequadas para cada tipo de intervenção em específico). Os resultados do dimensionamento também podem apontar que uma alternativa já escolhida não é a mais adequada para a correção do problema, e a necessidade de reconsideração da abordagem de projeto – adaptar ou substituir a técnica interventiva.

III – Estimar os custos

A estimativa de custos tem por finalidade atestar a viabilidade econômica da solução tecnicamente dimensionada. Nesta fase, a questão econômica é ainda avaliada de modo aproximado, sendo por essa razão denominada estimativa de custos, uma vez que somente o detalhamento executivo fornece a informação essencial para uma análise de viabilidade econômica mais precisa. Contudo, essa estimativa é suficiente para orientar e confirmar, ou não, a escolha da(s) alternativa(s) cuja viabilidade técnica já está confirmada.

⁴ Na Engenharia Natural essas considerações são mais acentuadas, uma vez que o material construtivo, por ser vivo, traz mais incertezas do que as aplicações puramente com materiais inertes, tais como as realizadas em técnicas tradicionais de engenharia. Os materiais inertes manufaturados têm suas propriedades intrínsecas, principalmente de resistência, bem determinadas, e por essa razão, cálculos acurados para o dimensionamento de estruturas podem ser realizados. O conhecimento das propriedades técnicas da vegetação ainda não está nesta fase analítica, portanto, não permite exatamente as mesmas descrições e aplicações quantitativas.

⁵ Os princípios orientadores da Engenharia Natural também apresentam finalidades não técnicas, as quais estão ligadas à composição da paisagem e contribuição aos aspectos ambientais.

⁶ O ecossistema é a unidade funcional básica da ecologia, incluindo tanto os organismos vivos quanto o ambiente abiótico onde sobrevivem (ODUM, E. P. *Ecologia*. Rio de Janeiro: Interamericana, 434 p., 1985). Nesse âmbito, a Engenharia Natural projeta fitocenoses que gradualmente são incorporadas ao ecossistema local, possibilitando a união dos pontos fragmentados e as condições necessárias para o aumento da biodiversidade florística e faunística. Para Cornellini & Sauli (CORNELINI, P. & SAULI, G. *Manuale di indirizzo delle scelte progettuali per interventi di ingegneria naturalistica*. Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio – Direzione Generale per la Difesa del Suolo – PODIS, Roma, 389 p., 2005), a Engenharia Natural projeta ecossistemas paranaturais mediante o emprego de espécies vegetais de ocorrência local.

⁷ Conjunto de espécies vegetais que ocupam um determinado habitat.

IV – Analisar os riscos associados

Mesmo que analítico, o dimensionamento de obras em sistemas naturais envolve incertezas, uma vez que os mesmos são regidos por fenômenos complexos, erráticos e randômicos.⁴

Assim, deve-se avaliar quantitativamente o risco associado a essas incertezas, ou seja, quais as possibilidades de a obra vir a falhar no caso de uma solicitação predeterminada (solicitação tomada com base nos dimensionamentos). Tais informações remetem à segurança da obra e ao custo financeiro necessário para sua implantação; por essa razão, revertem-se de importância no processo que define a escolha de uma configuração em detrimento de outra.

V – Avaliar estética e ambientalmente as intervenções

Por fim, é necessário avaliar estética e ambientalmente as intervenções⁵, estimando-se os ganhos advindos de sua implementação. Além disso, deve-se analisar os impactos para além do ponto de intervenção e descrever a evolução da obra com o tempo e sua integração ao ecossistema⁶ e a paisagem. Deve-se ter em mente que, mesmo nos casos em que as funções estéticas e ecológicas não são tratadas prioritariamente como objetivo do projeto, em maior ou menor medida uma composição vegetal ou fitocenose⁷, que evoluirá e será integrada aos poucos ao ecossistema, está sendo projetada⁸. Ecossistemas paranaturais (ou seja, que são semelhantes ao original), tais como os projetados pela Engenharia Natural, são sistemas dinâmicos que se desenvolvem ao longo do tempo e, por isso, previsões de sua formação e desenvolvimento devem ser realizadas.

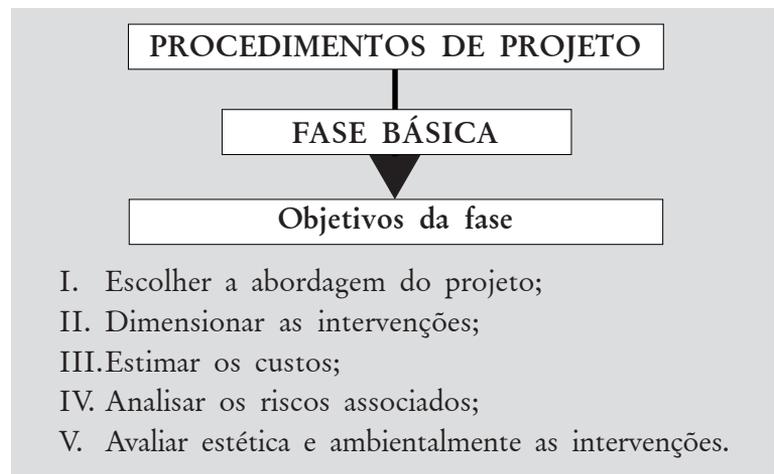


Figura 2: Objetivos da fase básica de projeto.

⁸ MORGAN, R. C. & RICKSON, R. J. (Ed.). *Op. cit.*

1.3 Fase executiva

A fase executiva é a última fase de projeto e busca atingir sete objetivos principais: otimizar as intervenções, detalhar as soluções, especificar os materiais, descrever os serviços, elaborar o cronograma executivo, especificar o monitoramento e a manutenção das intervenções.

I – Otimizar as intervenções

Uma vez dimensionadas as intervenções, o primeiro objetivo da fase executiva concentra-se na otimização das mesmas. O detalhamento torna possível que o gasto de materiais, o impacto da execução e os demais recursos envolvidos sejam minimizados. Deve-se atentar para que sejam aplicados apenas os recursos necessários para a mitigação e/ou solução dos problemas encontrados.

II – Detalhar as soluções adotadas

O detalhamento minucioso das soluções adotadas compreende as descrições tipológica, de material e geométrica dos arranjos, elementos conjuntos e individuais. Essas informações também são sintetizadas em desenhos e plantas detalhadas e precisas, que constituem uma ferramenta indispensável de consulta a campo no momento da implantação. O detalhamento torna possível a interpretação das intervenções planejadas e dimensionadas durante as fases anteriores, e possibilita que as soluções sejam descritas, orçadas e finalmente executadas.

III – Especificar os materiais

Este objetivo consiste na listagem das propriedades físicas, químicas e biológicas, bem como dos requisitos mínimos de desempenho, dos critérios de aceitação, estocagem, manuseio e emprego na obra de acordo com o tipo de material – vivo e/ou inerte – a ser empregado.

IV – Descrever os serviços

A descrição dos serviços compreende tanto as atividades em si, quanto a sequência cronológica de cada etapa dos serviços. Abrange todas as etapas das obras de implantação de uma intervenção e geralmente são apresentadas na forma de um documento denominado Memorial Descritivo.

V – Elaborar o cronograma e o orçamento

A descrição dos serviços constitui a base para a elaboração do cronograma de atividades e também de orçamento que inclua os custos dos materiais e das atividades necessárias para a implantação das obras. O cronograma planifica o tempo necessário para elaboração das atividades que com-

preendem a execução dos trabalhos, bem como define a época do ano mais apropriada para a implantação, considerando as necessidades fisiológicas dos materiais vivos utilizados. No orçamento são especificados os custos e valores unitários e totais de todas as atividades, serviços e materiais que a obra necessita para ser executada.

VI – Especificar o monitoramento

A especificação do monitoramento se constitui em mais um objetivo relacionado à dinâmica do ecossistema. Essa etapa tem a função de garantir que o conjunto de estruturas constituídas pela associação de elementos estruturais inertes e vivos evolua conforme o esperado. Deve-se assegurar que as estruturas inertes (que conferem a estabilidade inicial ao terreno e suporte à vegetação) mantenham sua integridade, no mínimo, por tempo suficiente ao estabelecimento do material vivo, que passa, então, a assumir a função de estabilização e/ou consolidação da área afetada. Assim, a importância do monitoramento reside no diagnóstico das inconformidades encontradas imediatamente após a instalação das intervenções, bem como as encontradas ao longo do processo de estabelecimento do sistema dinâmico implantado. O atendimento desses requisitos fornece as bases necessárias para que as atividades de manutenção possam ser planejadas, seja em caráter emergencial ou de rotina periódica e pré-programada. Para isso são definidos prazos, periodicidade e as ações que devem ser realizadas durante as verificações *in situ*.

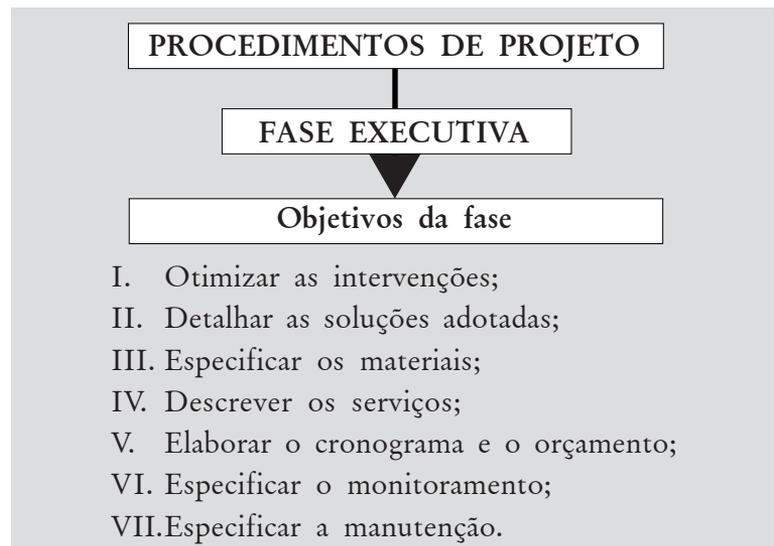


Figura 3: Objetivos da fase executiva de projeto.

VII – Especificar a manutenção

A manutenção tem o objetivo de garantir que todos os trabalhos planejados e executados mantenham sua qualidade no período imediatamente posterior às obras, bem como mantenham ou mesmo propiciem o aumento gradual das qualidades do sistema dinâmico implantado.

2 Atividades de projeto

A identificação da relação entre atividades e ações práticas das fases de projeto e os seus objetivos é indispensável para a elaboração de uma metodologia hierarquizada de projeto. Portanto, uma vez que os objetivos específicos de cada fase estejam definidos, é necessário analisar quais atividades devem ser desenvolvidas para que os mesmos sejam alcançados. Com esse intuito, as atividades correspondentes aos objetivos das três fases de projeto – conceitual, básica e executiva – são detalhadas e, ao final de cada uma, são identificados os respectivos produtos gerados, ou seja, as informações resultantes.

2.1 Conceitual

Para atender aos objetivos dessa fase, as seguintes atividades são desenvolvidas: visita de avaliação em campo, medições expeditas de campo, análise de informações de escritório, análise qualitativa da fenomenologia, identificação e formulação das intervenções e especificação dos mecanismos de aquisição de informações detalhadas.

I – Avaliação inicial em campo

Observar as feições do problema, as características do local e do entorno, perceber as interações dessas características com os processos desencadeados, bem como avaliar as condições da bacia hidrográfica ou da área de contribuição que o problema envolve. Observar as características da vegetação local buscando identificar, ou não, a ocorrência de espécies com propriedades biotécnicas comprovadas ou com características potenciais para a aplicação em obras de Engenharia Natural. Caso sejam encontradas, verificar a possibilidade de coleta de material vegetativo em quantidade suficiente para a aplicação direta, ou se existe necessidade de propagar maior quantidade em local apropriado. Caso não sejam identificadas *in situ* espécies com atributos biotécnicos necessários para as aplicações, devem ser buscadas informações sobre espécies regionais nativas e que ocorram preferencialmente na mesma região fitoecológica e/ou bioma.

Observar também se nas proximidades existe a disponibilidade de materiais inertes (madeira, rochas, cascalho etc.) que prontamente possam ser utilizados nas intervenções. Informações preliminares como essas fornecem indicadores de quais intervenções podem ser feitas e que recursos necessariamente devem ser mobilizados para a realização da obra.

II – Medições expeditas de campo

Embora a fase conceitual seja essencialmente qualitativa, medições expeditas realizadas em campo constituem uma orientação inicial para o engenheiro compreender a fenomenologia e as relações que são responsáveis pelos processos desencadeados. Como medições expeditas citam-se, por exemplo, as avaliações de gradientes de margens de rios e encostas, estimativas de velocidades e vazões de escoamento, medições das feições erosivas e a caracterização tátil-visual da textura dos solos.

III – Análise de informações documentais

Essa atividade consiste em coletar e reunir informações em documentos existentes que auxiliem na caracterização dos processos e também da área e seu entorno, tais como: relatórios prévios, imagens de satélite, bases cartográficas, dados climáticos e bancos de dados de órgãos públicos e/ou privados. Também podem ser reunidas – se disponíveis – informações de séries históricas de dados hidrológicos, uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica, bem como de geologia, geomorfologia, sedimentologia do curso de água e informações prévias sobre a vegetação local com potencial biotécnico (espécies ocorrentes e localização). Informações que não são séries históricas, e que não estão disponíveis, devem ser obtidas em atividades específicas *in situ*.

IV – Análise qualitativa da fenomenologia

Com base nas informações obtidas nas atividades anteriores, são identificados os objetivos técnicos do projeto, ou seja, são definidas as propriedades de engenharia do sistema natural envolvido que precisam ser corrigidas por meio de proteção, estabilização e/ou consolidação. Como exemplos dessas propriedades podem ser destacados os aspectos relativos ao solo (o tipo de textura, a desagregação, a cobertura superficial, diagnóstico visual da estabilidade etc.), ao escoamento (o regime de fluxo e os pontos onde este afeta a estabilidade das margens) e ao transporte de sedimentos (dimensão das partículas transportadas). A aná-

lise conjunta dessas propriedades propicia as bases necessárias para descrição qualitativa do problema encontrado e é indispensável para a formulação inicial das intervenções que possam atender às necessidades diagnosticadas.

V – Identificação e formulação das intervenções

Com base nas necessidades identificadas na análise qualitativa da fenomenologia, podem ser listadas as possíveis formas de tratamento utilizando-se técnicas de Engenharia Natural para tratar o problema. Para isso, são levados em conta os seguintes fatores:

- Atendimento aos requisitos técnicos – procurar esquemas construtivos constituídos por materiais inertes e vivos cuja associação responda às necessidades requeridas, com a mínima alteração possível do ambiente;
- Atendimento aos requisitos não técnicos – considerar as funções ecológicas e estéticas que devem ser agregadas ao projeto de acordo com a área de implantação (zona rural ou urbana, ambiente natural ou alterado);
- Restrições quanto aos materiais – identificar a disponibilidade local de materiais inertes e vivos, bem como a interação entre eles (como podem ser utilizados em conjunto). Sempre que possível, utilizar materiais de ocorrência local ou regional (um dos princípios guia da Engenharia Natural), recorrendo-se a fontes externas apenas em situações necessárias (ausência local de materiais vivos ou inertes).
- Restrições quanto ao ambiente – condições de desenvolvimento do material vivo, conservação dos materiais inertes e vivos e manutenção das combinações entre estes;
- Restrições econômicas – avaliação da mão de obra, dos materiais, da execução, da manutenção – a partir dessa avaliação prévia, optar por soluções economicamente justificáveis;
- Restrições de impacto ambiental – avaliação dos impactos dentro e fora dos limites do local de intervenção, limitando-se à escolha das alternativas qualitativamente definidas como menos impactantes;
- Restrições locais – existência de infraestrutura ou benfeitorias, ocupação humana, e quaisquer outros objetos ou condições locais que limitem as intervenções previstas.

VI – Especificação dos mecanismos de aquisição de informações detalhadas

O último objetivo da fase conceitual diz respeito à prescrição específica dos métodos de aquisição de informações em nível quantitativo que são utilizadas nas próximas

fases de projeto. Essas informações devem ser listadas em conformidade e em complemento às informações qualitativas já obtidas; também devem ser evidenciados o grau de exatidão e detalhamento, suas quantidades, locais e formas de obtenção. De modo geral, a prescrição quantitativa abrange levantamentos topográficos, ensaios geotécnicos, levantamentos florísticos, fitossociológicos e faunísticos (quando for o caso), análises químicas e físicas do solo, obtenção de séries históricas de dados hidrológicos etc.

VII – Produtos da fase conceitual

Ao final da fase de projeto conceitual, são geradas as seguintes informações: relatório conceitual com fotografias, esquemas e descrição dos objetivos, descrição qualitativa dos fenômenos e apresentação e descrição das possíveis alternativas de correção dos problemas fazendo uso de imagens e/ou plantas esquemáticas.

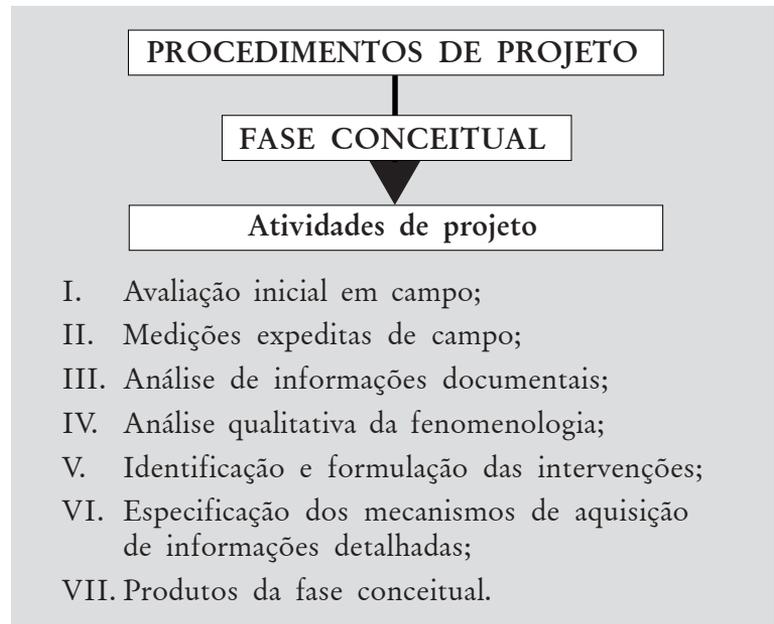


Figura 4: Atividades da fase conceitual de projeto.

2.2 Fase básica

Para atender aos objetivos dessa fase, as seguintes atividades são desenvolvidas: análise quantitativa da fenomenologia, definição das medidas de tratamento, dimensionamentos, consideração e avaliação dos critérios ambientais e estéticos.

I – Análise quantitativa da fenomenologia

A partir das informações adquiridas nos levantamentos quantitativos são realizadas as análises específicas do local e dos problemas encontrados para a obtenção de modelos que expliquem o comportamento e levem a um entendimento das causas dos problemas. Os principais agentes e suas propriedades, bem como os processos em que estes atuam, precisam ser identificados e caracterizados. Para isso, as condições hidrológicas da bacia hidrográfica são consideradas para um tempo de retorno consistente aos objetivos do projeto e associadas às suas condições físicas também determinadas. Determinam-se as condições hidráulicas do canal, bem como as condições geotécnicas⁹ e edafológicas¹⁰ do solo local. Tais fatores são associados e analisados conjuntamente, e, então, são realizadas as inferências acerca da fenomenologia, da criticidade e da evolução dos processos desencadeados. Por meio da análise explicitada, alcança-se o entendimento das causas do problema, e pode-se então definir as soluções tecnicamente mais apropriadas e as variáveis para atender os objetivos de correção requisitados.

II – Definição das medidas de tratamento

A compreensão analítica da fenomenologia, da criticidade e da evolução dos processos desestabilizantes do sistema natural objeto do projeto possibilita a escolha definitiva das soluções de tratamento, pois fornece critérios de escolha. A definição das medidas de tratamento deve ser fundamentada nas informações qualitativas obtidas na fase conceitual, mas, principalmente, nos parâmetros quantitativos reunidos durante as atividades de projeto básico. As informações específicas advindas de análise quantitativa quanto a aspectos hidrológicos e hidráulicos, condições do solo (estabilidade mecânica e suporte para as plantas), diagnóstico de recomposição e estabilização de leito e/ou taludes, somadas ao conhecimento da disponibilidade regional de materiais inertes e vivos adequados, informações qualitativas da ecologia da paisagem (florística, fitossociologia e fauna quando for o caso), bem como a estimativa prévia dos custos associados, compõem as medidas gerais para a escolha definitiva dos tratamentos que serão implantados. Em resumo, todas as informações levantadas na fase qualitativa (conceitual) são complementadas pelas informações da fase quantitativa (básica), constituindo os fundamentos necessários para a escolha da(s) medida(s) mais adequada(s) de tratamento dos problemas conforme as exigências ambientais, econômicas e de segurança de cada projeto.

⁹ Geotécnica é o ramo da engenharia que faz uso da mecânica de solos e das rochas (descreve a resposta das massas aos sistemas de força) para encontrar soluções de planejamento, projeto, construção e operação de obras que envolvem fundação de construções sobre materiais inalterados (escavações e cortes), ou ainda, o uso dos materiais terrosos e rochosos como matérias-primas para a construção (preenchimentos e aterros) – SOWERS, F. G. *Introductory Soil Mechanics and Foundations: Geotechnical Engineering*. Fourth edition. New York: Macmillan Publishing Co., Inc, 1979.

¹⁰ O termo edafologia (do grego *edaphos* = terra ou terreno) é por vezes usado como sinônimo de pedologia aplicada ao estudo do solo, sendo este entendido como o meio onde se cultivam as plantas (LEPSCH, I. F. *Formação e conservação dos solos*. São Paulo: Oficina de Texto, 2010.). Tem, por essa razão, relação direta com as disciplinas que tratam dos cultivos florestais e agrícolas.

III – Dimensionamento

Nesta etapa determinam-se as solicitações para possibilitar o dimensionamento das estruturas, dos elementos e de seus arranjos, inclusive considerando-se as estimativas de custos, níveis de segurança e desenvolvimento da vegetação e seus efeitos. As intervenções são dimensionadas e modeladas de acordo com as solicitações mais desfavoráveis encontradas tanto na situação atual quanto nos cenários de evolução durante toda a vida útil do sistema natural projetado.

A partir do momento em que a demanda crítica (solicitação mais desfavorável) for determinada, têm-se então, as bases para o dimensionamento das estruturas interventivas, respeitando-se que os esforços máximos¹¹ nas estruturas, elementos e arranjos utilizados devem ser menores ou iguais aos esforços admissíveis. Para isso, são necessárias análises hidrológica, hidráulica, geotécnica e da vegetação. São essas informações que possibilitam projetar estruturas e configurações compatíveis com a resolução do problema. É ainda por meio dessa atividade que se alcança o objetivo de estimar os riscos, quer pelos tempos de retorno, probabilidades de falha ou fatores de segurança para todos os períodos representativos da vida útil de uma estrutura¹².

O dimensionamento, neste caso, resulta da aplicação das leis de equilíbrio para um sistema dinâmico. As combinações de solicitações que refletem situações de instabilidade podem ser diversas. Deste modo, procura-se dimensionar não somente estruturas resistentes aos estágios em que as solicitações são as mais desfavoráveis, como também que tenham graus de liberdade¹³ suficientes para acomodar apropriadamente as configurações de equilíbrio que um sistema dinâmico apresenta ao longo do tempo.

Por fim, com os dimensionamentos realizados, os custos da obra podem ser estimados e a solução adotada pode ser avaliada quanto a sua viabilidade econômica. Além disso, torna-se possível definir se os níveis de segurança são aceitáveis ou não, bem como realizar previsões da ação da vegetação ao longo do tempo.

IV – Consideração e avaliação dos critérios ambientais e estéticos

As obras de Engenharia Natural, além de corrigirem a instabilidade dos solos pelo aumento da sua resistência e redução do impacto das solicitações sobre os mesmos, também proporcionam o aumento gradual da qualidade ambiental da área tratada. Para amplificar as qualidades da obra para além dos aspectos econômicos e de segurança, os critérios ambientais e estéticos devem ser considerados.

¹¹ Descreve-se aqui, de modo generalizado, os esforços, não só puramente mecânicos, ou mesmo hidromecânicos, mas sempre as solicitações que os processos naturais extremos (normalmente chuvas intensas) impõem aos sistemas naturais (sistemas fluviais representados pelo curso de água e seus componentes ecossistêmicos bióticos e abióticos), o que os obriga a encontrar novas configurações de equilíbrio (novos leitos de fluxo onde prevaleça a menor quantidade de energia).

¹² A vida útil de uma intervenção de Engenharia Natural é indeterminada, pois a vegetação se estabelece e continua a se desenvolver ao longo dos anos e a proporcionar melhorias às condições que fornecem proteção aos sistemas naturais. Determinável ou estimável, através de um tempo de retorno (TR), por exemplo, é a vida útil de estruturas inertes que complementam as intervenções fornecendo as condições necessárias de estabilidade enquanto as plantas estão em processo de desenvolvimento. As estruturas associadas que são protegidas pelas intervenções de Engenharia Natural, tais como estradas, pontes, gasodutos etc., também são construídas com base em uma estimativa de durabilidade.

¹³ Trata-se de um acréscimo de segurança flexível às condições de equilíbrio que normalmente ocorrem ao longo do tempo em sistemas dinâmicos, tais como os cursos de água e suas áreas de influência.

¹⁴ Vegetação que tem sua origem na região onde é encontrada (HOUISS, A. *Dicionário da língua portuguesa*. 2ª ed. rev. e aum.. Rio de Janeiro: Objetiva, 2004).

¹⁵ Reduzir a biodiversidade do ambiente significa reduzir os graus de liberdade na manutenção do equilíbrio dinâmico.

Os projetos precisam satisfazer condições que vão desde o uso preferencial de um conjunto diversificado de espécies vegetais autóctones¹⁴ da região de intervenção, até à formulação de combinações que se assemelhem, ou muito se aproximem, da paisagem potencial do local, fornecendo as condições iniciais necessárias para o aumento da biodiversidade natural. Em larga medida, deve-se evitar o que é estranho ao ambiente local e que, segundo os preceitos ecológicos, pode ser prejudicial às interações ocorrentes no meio, como por exemplo, o uso de espécies vegetais invasoras (normalmente exóticas) que podem reduzir a biodiversidade do ambiente¹⁵ tratado. Em Engenharia Natural, os aspectos técnicos, ambientais e estéticos não se dissociam e, portanto, a avaliação das obras deve atentar para a constituição de um ambiente que possibilite o desenvolvimento e a diversidade da biocenose (flora e fauna).

V – Produtos da fase básica

Ao final da fase de projeto básico, são geradas as seguintes informações: memorial de cálculo que descreve os fenômenos e o ecossistema envolvido de modo quantitativo (aspectos morfométricos da bacia hidrográfica, hidrologia, hidráulica do canal e vegetação), apresentação dos modelos de intervenção e dos cálculos de dimensionamento (hidráulico, geotécnico, estrutural, riscos associados, configuração e fatores de segurança das estruturas) acompanhados das plantas esquemáticas das intervenções (somente a forma inicial e parcialmente desenvolvida, uma vez que plantas e desenhos detalhados e com especificações fazem parte do projeto executivo).

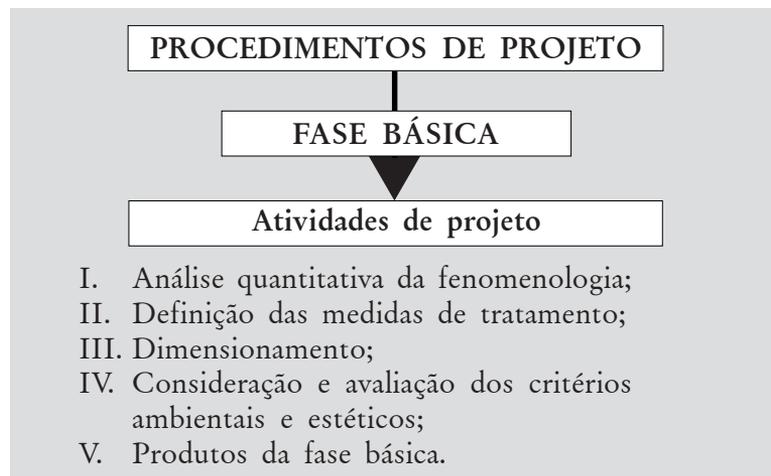


Figura 5: Atividades da fase básica de projeto.

2.3 Fase executiva

Para atender aos objetivos dessa fase, desenvolvem-se as seguintes atividades: detalhamento das soluções, serviços, cronograma de implantação e orçamento, monitoramento e manutenção.

I – Detalhamento das soluções

Definidas e dimensionadas as estruturas que compõem as intervenções de Engenharia Natural, pode-se, então, realizar o detalhamento de cada uma delas, atentando para a otimização, especificação e quantificação dos materiais necessários para que sejam construídas. Nesta etapa é realizada a descrição minuciosa de cada estrutura, especificando-se cada tipo de material que a compõe (ex.: madeira, vergalhões de aço, pregos, grampos, material vegetal [estacas, mudas, estolões, rizomas, bulbos, sementes] etc.), e ao mesmo tempo, descrevendo como exatamente cada uma deve ser implantada, indicando-se sequencialmente o procedimento de instalação, inclusive com a elaboração de desenhos e plantas com as medidas e localização detalhadas e em escala de cada intervenção na área de trabalho.

Esse detalhamento fornece as bases necessárias para que as intervenções sejam orçadas e o cronograma para sua implantação seja constituído (pois se identifica o tamanho e o grau de complexidade que influenciam diretamente no tempo dispensado à construção). Do mesmo modo, são fornecidas as informações necessárias à execução e à posterior fiscalização da obra. O detalhamento das intervenções ao nível em que técnicos alheios ao processo de elaboração do projeto possam compreendê-lo e realizá-lo autonomamente, reveste-se de fundamental importância para a execução bem sucedida de uma obra, pois nem sempre o projetista (que participa de todas as fases de elaboração do projeto) pode estar presente para prestar esclarecimentos durante as atividades de execução.

II – Serviços

Os serviços são listados por categorias, abordando-se os materiais, as atividades e equipamentos que são utilizados na execução. São apresentados e descritos os serviços iniciais (preparo e limpeza da área, canteiro e atividades de apoio, obras provisórias de controle de erosão e sedimentos), serviços auxiliares (terraplanagem, desmonte de rochas etc.), serviços de implantação das intervenções propriamente ditas, serviços complementares às estruturas principais de estabilização (tal como estruturas de drena-

gem), serviços finais (limpeza final, recomposição de áreas afetadas pelo trânsito de veículos e equipamentos de construção, e do canteiro de obra), plano de monitoramento e manutenção de estruturas inertes e material vivo.

III – Cronograma de implantação e orçamento

Na definição do cronograma são previstas todas as atividades relacionadas à execução da obra, considerando-se o período mais adequado para cada atividade e o tempo de duração das mesmas. Como as intervenções são realizadas com material vivo – muitas vezes estacas de plantas – deve-se ter especial atenção, sempre que possível, para realizá-las durante o período de dormência vegetativa, pois assim o índice de pega e enraizamento pode alcançar maior êxito¹⁶. Quando não realizadas com estacas, mas com mudas ou sementes, a amplitude temporal de execução das intervenções pode ser um pouco maior, especialmente se houver recurso à irrigação.

¹⁶ O maior índice de pega pode ser explicado pelo fato de as reservas nutricionais de uma planta, no período de dormência, estarem disponíveis, ao mesmo tempo e em maior quantidade, para a emissão de raízes e brotos. O contrário ocorre com as estacas coletadas na primavera, quando parte das reservas da planta já foram disponibilizadas para a emissão de novas raízes, brotos e floração.

Todos os serviços apresentados no item anterior devem ser organizados sequencialmente de acordo com as atividades que são pré-requisitos para outras, de modo a facilitar o processo e evitar erros grosseiros de logística e/ou implantações em períodos desfavoráveis. No que diz respeito ao orçamento, o cômputo minucioso de valores reais de mercado deve ser condizente a tudo o que for mobilizado para a realização da obra, seja material, maquinário ou pessoal. Esse conhecimento é imprescindível para verificar a viabilidade financeira da execução, bem como para realizar a programação financeira do órgão responsável pela contratação dos serviços e evitar inconformidades que podem interromper o bom andamento da obra. O licenciamento ambiental e demais trâmites legais junto aos órgãos competentes são imprescindíveis para que as datas de execução das atividades sejam estabelecidas e, portanto, devem ser realizados com antecedência. Os pedidos de licença devem ser encaminhados já nas primeiras fases de projeto. Normalmente o projeto conceitual é suficiente para os esclarecimentos exigidos pelos órgãos ambientais.

IV – Monitoramento e manutenção

Ambas as atividades são interdependentes e realizadas *in situ*. O monitoramento avalia as condições da obra como um todo, a partir da análise individual e conjunta dos componentes inertes e vivos, sendo que sua periodicidade de realização é consistente aos objetivos da obra. As atividades de manutenção, por sua vez, dependem dos diagnósticos

realizados durante os monitoramentos para constituir as diretrizes de abordagem das inconformidades (se estas existirem) e correção das mesmas, buscando retornar as condições previstas em projeto.

A periodicidade de monitoramento da obra geralmente deve ser ajustada ao atendimento das necessidades das plantas utilizadas nas intervenções. Isso ocorre porque as plantas dependem de maiores cuidados iniciais para garantir o seu estabelecimento do que as estruturas inertes que, ao serem implantadas, têm condições praticamente imediatas de atender às solicitações para que foram dimensionadas.

No primeiro mês pós-implantação, a vegetação encontra-se em processo de adaptação ao novo ambiente ao qual foi inserida e, por isso, os monitoramentos necessariamente devem ter frequência semanal (uma ou mais vezes). O período inicial é o mais crítico ao estabelecimento da vegetação. Uma vez constatada a pega da vegetação e também sinais de seu desenvolvimento (normalmente no segundo mês isso é bastante visível), o monitoramento pode ter sua frequência reduzida (mas não suspensa) a um número que corresponda ao comportamento da vegetação ou aos acontecimentos que podem interferir em seu estabelecimento (no mínimo duas visitas ao ano, uma na estação seca e outra na estação das chuvas). Sempre que ocorrer um evento climático extremo (evento pluviométrico intenso, seca etc.) ou ataque de insetos (formigas, em especial) o monitoramento deve ser imediatamente reajustado (antecipado e intensificado). Deve-se ter em mente que os monitoramentos são realizados simultaneamente para os elementos vivos e inertes que compõem as intervenções.

No monitoramento das estruturas inertes, avalia-se a integridade estrutural, o aparecimento de sinais e pontos de fraqueza que antecedem ou indicam uma ruptura, a ruptura propriamente dita, o surgimento de processos erosivos ou qualquer inconformidade capaz de enfraquecer a estrutura tornando-a instável ou que inviabilize o seu funcionamento conforme a finalidade para qual foi projetada. Quanto à vegetação, todas as espécies plantadas ou semeadas devem ser verificadas em termos de sobrevivência, sanidade (alterações fisiológicas causadas por pragas, deficiência nutricional ou hídrica) e desenvolvimento (avaliação do diâmetro de caule e ramos e altura total por meio de procedimentos de amostragem que represente todo o plantio, ou seja, apenas parte das plantas são medidas). Com base nessas informações são realizadas as devidas apurações e registros manus-

critos e fotográficos das inconformidades para possibilitar o planejamento das atividades de manutenção. Os registros fotográficos devem ser realizados sempre a partir de pontos fixos da obra, para possibilitar comparações cronológicas e se poder avaliar a evolução das intervenções e a interação entre elementos inertes e vivos. As inconformidades diagnosticadas devem ser fotografadas em detalhes de modo a representar as características do problema.

Na manutenção, quaisquer inconformidades que possam resultar na instabilidade das estruturas inertes devem ser corrigidas, assim como devem ser devidamente tratadas as plantas que morrem (novo plantio ou semeadura), as que não se desenvolvem (correção na irrigação, adubação de manutenção, cuidado com as pragas) ou que se desenvolvem excessivamente (raleio ou poda).

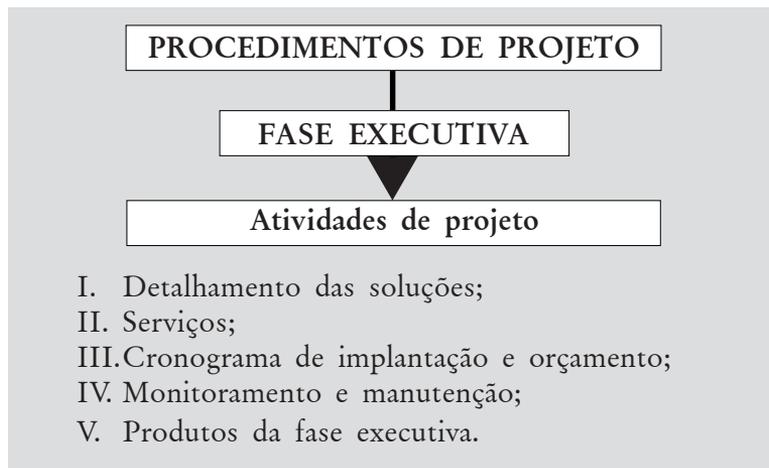


Figura 6: Atividades da fase executiva de projeto.

V. Produtos da fase executiva

Ao final da fase de projeto executivo é gerado o documento denominado Memorial Descritivo, no qual devem constar as seguintes informações: atividades auxiliares, materiais utilizados, forma como devem ser construídas as estruturas, diretrizes do monitoramento e ações de manutenção, previsão de execução das atividades, custos unitários e totais de materiais e atividades, desenhos explicativos e plantas executivas.

Considerações finais

Ao longo das seções anteriores, os tópicos principais compostos por objetivos e atividades foram apresentados,

sendo agora possível formar um fluxograma que condensa a sequência da metodologia de projeto. A compilação dos procedimentos gerais de projeto é apresentada na figura 7.

As soluções técnicas propostas pela Engenharia Natural para a prevenção e/ou correção de problemas decorrentes da perda de estabilidade de sistemas naturais, começam, aos poucos, a ser adotadas no Brasil. Trata-se do reconhecimento de que estas soluções são alternativas viáveis ao complemento ou substituição daquelas já consolidadas pela engenharia tradicional.



Figura 7: Fluxograma dos procedimentos gerais de projeto.

A evolução desse processo de reconhecimento e adoção depende de um desenvolvimento mais técnico e analítico da disciplina. Essa necessidade vem sendo atendida na Engenharia Natural, para permitir que o engenheiro empregue uma abordagem de projeto semelhante àquela que já se usa na engenharia tradicional.

No caso de obras de infraestrutura, a abordagem analítica é ainda mais importante que no caso de pequenas intervenções rurais e urbanas, em que a abordagem descritiva ou mesmo artesanal pode ser perfeitamente justificável. Isso ocorre porque as obras de infraestrutura têm elevados níveis de exigência de mitigação de riscos a elas associados, bem como requisitos legais decorrentes de possíveis consequências de caráter social, econômico e ambiental na eventualidade de uma falha dessas estruturas. No entanto, a metodologia também pode ser empregada nas obras de menor exigência técnica e porte, sempre que a melhor compreensão das características dos problemas e das operações for considerada importante e viável.

O emprego da metodologia aqui apresentada é útil na concepção de projeto pelo fato de propiciar a organização das informações em uma sequência racionalizada de obtenção e análise. Tal organização torna mais fácil a compreensão da fenomenologia dos problemas envolvidos, levando o engenheiro às soluções mais apropriadas do ponto de vista técnico, econômico e ecológico.

Por fim, as indicações de organização e apresentação de requisitos indispensáveis fazem da metodologia uma ótima ferramenta para a uniformização¹⁷ e universalização¹⁸ das atividades de projeto. Essa característica é muito importante para disciplinas que ainda estão em estágio de desenvolvimento analítico, como é o caso da Engenharia Natural.

¹⁷ Significa tomar por base os mesmos princípios para a elaboração de um projeto.

¹⁸ Ser aplicada por qualquer engenheiro ou pessoa responsável por projeto, chegando a resultados semelhantes.

Charles Rodrigo Belmonte Maffra é graduado em Engenharia Florestal, mestre em Engenharia Florestal e doutorando no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal da Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul.

charles.maffra@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



PLANTAS LENHOSAS COM POTENCIAL BIOTÉCNICO PARA USO EM OBRAS DE ENGENHARIA NATURAL NO BRASIL

Paula Letícia Wolff Kettenhuber
Rita dos Santos Sousa
Luciano Denardi
Fabrcio Jaques Sutili

A especificação do material vegetal caracteriza-se como uma das etapas mais importantes nos projetos de Engenharia Natural. Portanto, é imprescindível que as plantas selecionadas tenham suas propriedades biotécnicas conhecidas e devidamente consideradas. Tais propriedades derivam das características morfo-mecânicas de cada espécie vegetal. Por outro lado, as necessidades do projeto, ou seja, suas exigências biotécnicas, variam conforme cada situação particular de uso, devendo-se considerar também os aspectos edafoclimáticos e ecológicos, bem como o tipo de solução construtiva empregada e o problema a ser resolvido. Nessa perspectiva, são descritas as principais espécies nativas do Brasil já utilizadas com sucesso em obras de Engenharia Natural. Esses parâmetros servem de base para investigações que visem ampliar o rol de espécies úteis.

Introdução

A Engenharia Natural é uma disciplina técnica que usa plantas vivas, ou partes destas, como material de construção em intervenções particularmente eficazes para a estabilização dos cursos de água e suas margens, encostas e outras situações. Sua ação é orientada principalmente para limitar os efeitos da erosão causada pelas intempéries e para a estabilização de encostas e áreas degradadas por fatores naturais (hidrogeológicos) ou antropogênicos (pedreiras, aterros, obras de infraestrutura).¹

A utilização de plantas com potencial biotécnico, em intervenções de Engenharia Natural, apresenta múltiplas vantagens. Entre elas, a de assegurar a proteção superficial e a estabilização estrutural dos solos, e também, devido à sua característica de sistema vivo, a de desenvolver um ecossistema em equilíbrio dinâmico.²

A escolha do material vegetal constitui uma das etapas mais importantes nos projetos de Engenharia Natural. Portanto, é imprescindível que as plantas selecionadas possuam propriedades biotécnicas, as quais podem variar dependendo da situação particular de uso e conforme os aspectos edafoclimáticos, ecológicos e de reprodução da espécie. Deve-se considerar, ainda, o tipo de solução construtiva empregada.

Propriedade biotécnica pode ser definida como uma propriedade do material construtivo vivo, a qual, através de características morfomecânicas inerentes, desempenha uma função técnica (hidrológica ou mecânica).³

Dessa forma, a seleção das espécies para uma intervenção de Engenharia Natural deve ser feita com base nas suas características morfológicas e mecânicas inerentes. Além disso, deve-se dar preferência às espécies autóctones e que possuem reprodução fácil e de baixo custo.

A utilização de espécies autóctones, ou seja, originárias do local onde se pretende intervir, apresenta inúmeras vantagens, que vão além da adaptação edafoclimática à sua região de origem e do baixo custo de implantação. Essas espécies são mais resistentes a pragas e doenças, exigem pouca manutenção, ajudam a manter o equilíbrio biológico da paisagem e a diversidade dos recursos genéticos. Também constituem locais de refúgio, reprodução e muitas vezes fornecem alimento para a avifauna local, gerando um habitat equilibrado e repleto de biodiversidade.

¹ MENEGAZI, G. & PALMERI, F. *II dimensionamento delle opere di ingegneria naturalistica*. Direzione Regionale Infrastrutture, Ambiente e Politiche abitative – Regione Lazio, Roma, 2013.

² MORGAN, R. P. C. & RICKSON, R. J. *Slope Stabilization and Erosion Control – a bioengineering approach*. London: E & FN Spon, 1995.

³ SOUSA, R. dos S. *Metodologia para especificação de plantas com potencial biotécnico em Engenharia Natural*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 154 p., 2015.

Descrição das plantas

Com o intuito de organizar e disponibilizar o material aos profissionais que atuam na área de Engenharia Natural, Sousa⁴ desenvolveu uma metodologia com o objetivo de identificar e organizar as informações referentes ao potencial biotécnico das plantas.

A partir dessa metodologia, procedeu-se à caracterização detalhada de algumas plantas com potencial biotécnico comprovado por diversos pesquisadores: Plunter & Altreiter⁵; Vargas⁶; Monteiro⁷; Sutili⁸ e Denardi⁹. No presente artigo serão apresentadas apenas as principais espécies autóctones utilizadas em obras de Engenharia Natural no Brasil, sendo elas: *Calliandra brevipes* Benth., *Phyllanthus sellowianus* (Klotzch) Müll. Arg., *Salix humboldtiana* Willd., *Gymnanthes* (= *Sebastiania*) *schottiana* Müll. Arg., *Senna reticulata* (Willd.) H. S. Inwin & Barneby e *Terminalia australis* Cambess.

Para cada espécie são fornecidas informações sobre identificação, descrição morfológica, biologia reprodutiva, ecologia, distribuição geográfica, características morfomecânicas, campos de aplicação, local de aplicação e tipos de intervenções de Engenharia Natural.

Calliandra brevipes Benth.

A espécie é conhecida popularmente como sarandi, quebra-foice, topete-de-cardeal, angiquinho, esponja, esponjinha ou manduruvá. Pertencente à família Fabaceae, trata-se de um arbusto lenhoso e perenifólio de 1 a 2 metros de altura, muito ramificado e de copa densa. Casca externa áspera, de cor acinzentada em caules e ramos jovens e marrons nos mais velhos; casca interna esverdeada ou com “estrias” marrons em caules e ramos mais velhos. Folhas compostas, formadas por lâminas muito pequenas, de margens inteiras, dispostas numa estrutura em forma de “V” (semelhante a uma cangalha). Flores vistosas, cujo atrativo são numerosos filetes com dupla coloração (rosada e branca) que formam pequenos tufos. Legumes achatados, desprovidos de pelos, que encerram 4 a 8 sementes ovais (figura 1).

A floração ocorre de outubro a março e a frutificação durante o verão e outono. No Rio Grande do Sul, a espécie floresce em variadas épocas do ano. Reproduz-se por estacas e preferencialmente por sementes, pois dessa forma origina plantas mais vigorosas. Alguns experimentos demonstram, no entanto, que o prévio tratamento das estacas com fitorreguladores (AIB – Ácido Indolbutírico) promove o desenvolvimento de maior número de raízes por estaca.

⁴ SOUSA, R. dos S. *Op. cit.*

⁵ PLUNTER, K. & ALTREITER, W. *Ingenieurbiologische Maßnahmen am Rio Guarda-Mor in Südbrasilien – Untersuchung der biologisch-technischen Eigenschaften von Ufergehölzen*. Diplomarbeit. Universität für Bodenkultur Wien. Viena, Áustria, 164 p., 2004.

⁶ VARGAS, C. O. Características biotécnicas de *Phyllanthus sellowianus* Müll. Arg., *Salix x rubens* Schrank e *Sebastiania schottiana* (Müll. Arg.) Müll. Arg.. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 84 p., 2007.

⁷ MONTEIRO, J. S. *Influência do ângulo de plantio na propagação vegetativa de espécies utilizadas em Engenharia Natural*. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 109 p., 2009.

⁸ SUTILI, F. J. *Manejo biotécnico do Arroio Guarda-Mor: princípios, processos e práticas*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – UFSM, Santa Maria. 114 p., 2004. SUTILI, F. J. *Bioengenharia de solos no âmbito fluvial do Sul do Brasil – Espécies aptas, suas propriedades vegetativo-mecânicas e emprego na prática*. 94p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal). Universidade Rural de Viena, Viena, 2007.

⁹ DENARDI, L. *Anatomia e flexibilidade do caule de quatro espécies lenhosas para o manejo biotécnico de cursos de água*. 111p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

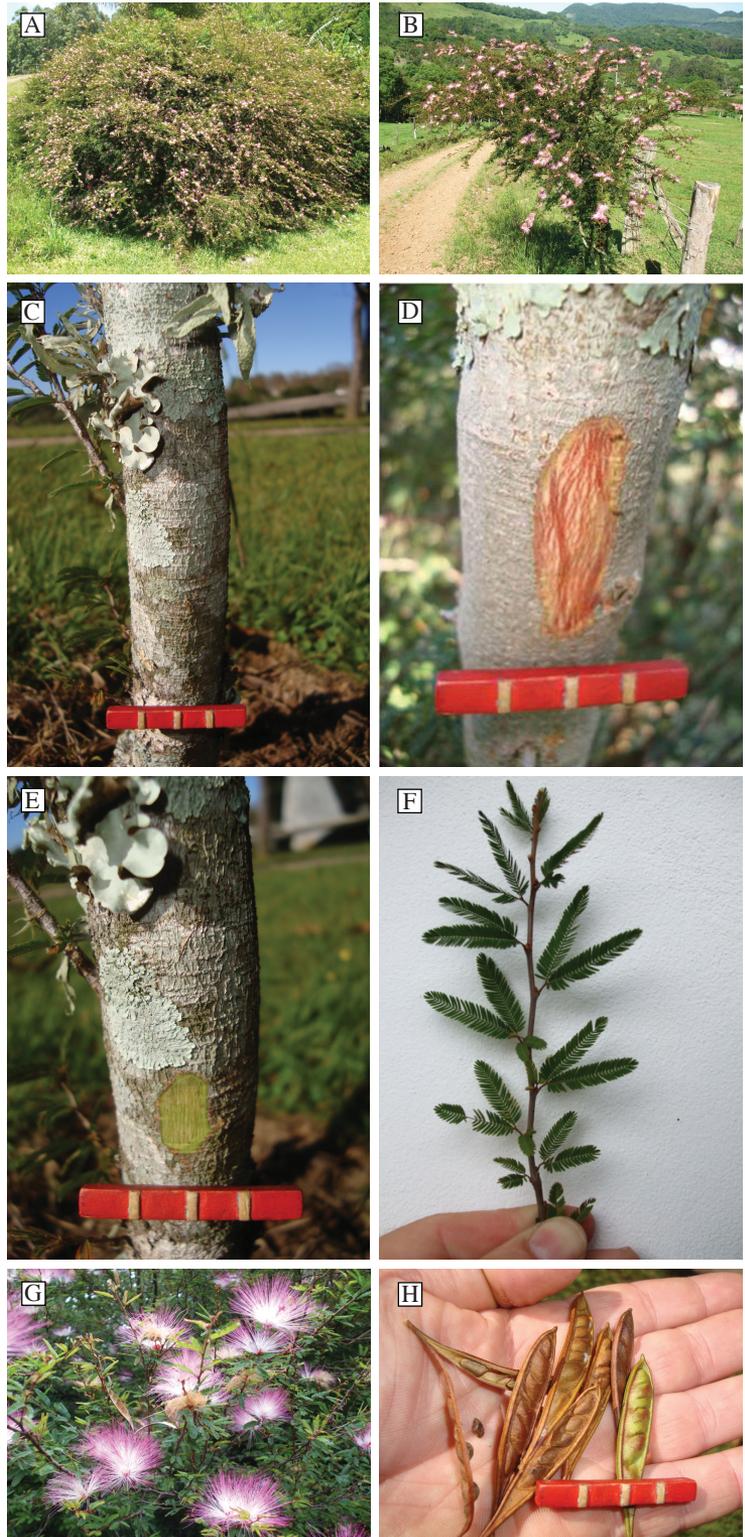


Figura 1:
Calliandra brevipes
(topete-de-cardeal):
A, B) Aspectos gerais da
planta; C) Casca externa
áspera e de cor acinzentada;
D, E) Casca interna com
estrias marrons (caule velhos),
ou então verde (caules jovens);
F) Folhas com lâminas muito
reduzidas, dispostas numa
estrutura em forma de “V”;
G) Flores agrupadas em tufos;
H) Frutos do tipo legume.
Escala = 4cm.
Fotografias: Luciano Denardi.

Habita naturalmente locais úmidos e margens de rios, suportando a força das águas das enchentes e a submersão temporária. Provida de denso sistema radicular, possui troncos delgados e flexíveis, morfologicamente adaptados à reofilia. Tolerante à geada e ao frio, a espécie participa da vegetação dos “sarandis”, juntamente com *Pouteria salicifolia*, *Terminalia australis*, *Gymnanthes schottiana* e *Phyllanthus sellowianus*. Pode ser cultivada isolada ou formando grupos, porém sempre a pleno sol.

Apresenta ampla ocorrência nas regiões Sul e Sudeste do Brasil, exceto no estado do Espírito Santo, e em alguns pontos isolados nas regiões Nordeste e Centro-Oeste do Brasil.¹⁰

Como características morfomecânicas, possui copa muito ramificada, densa, baixa, perene, flexível e com cobertura uniforme. Seu sistema radicular é denso, lateral e com grande quantidade de raízes finas.

Essa espécie pode ser empregada para estabilização hidráulica nas margens de cursos de água, controle da erosão superficial e para estabilização geotécnica. Em qualquer tipologia de problema deve ser dada preferência à sua utilização em forma de mudas.

Pode ser aplicada tanto em taludes fluviais como em taludes secos, inclusive nas áreas mais inclinadas (crista até metade do talude), devido ao seu porte baixo. Nos taludes fluviais, não é indicada para os locais abaixo do nível de canal pleno, pois pode não resistir a longos períodos de submersão.

Os tipos de intervenções de Engenharia Natural a que a espécie pode ser utilizada incluem semeadura manual, hidrossemeadura, banqueta vegetada, enrocamento vivo, grade viva e parede krainer.

Phyllanthus sellowianus (Klotzch) Müll Arg.

Pertencente à família Phyllanthaceae, esta espécie é conhecida popularmente por sarandi, sarandi-branco e filanto. Trata-se de um arbusto caducifólio de 2 a 3 metros de altura, caracterizado por numerosos ramos delgados, longos e copa paucifoliada. Casca externa acinzentada, áspera, marcada por esparsas lenticelas; casca interna esbranquiçada. As folhas, inseridas em ramos geralmente avermelhados e flexuosos, são simples, de margens inteiras, verde-escuras na face superior e relativamente mais claras na inferior. Flores e frutos apresentam dimensões muito reduzidas, que passam praticamente despercebidos a um olhar menos atento (figura 2).

¹⁰ KETTENHUBER, P. L. W. *Distribuição geográfica de espécies do bioma Mata Atlântica com potencial de uso em obras de Engenharia Natural em travessias duto-viárias*. 77 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Florestal), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria – RS. 2014.

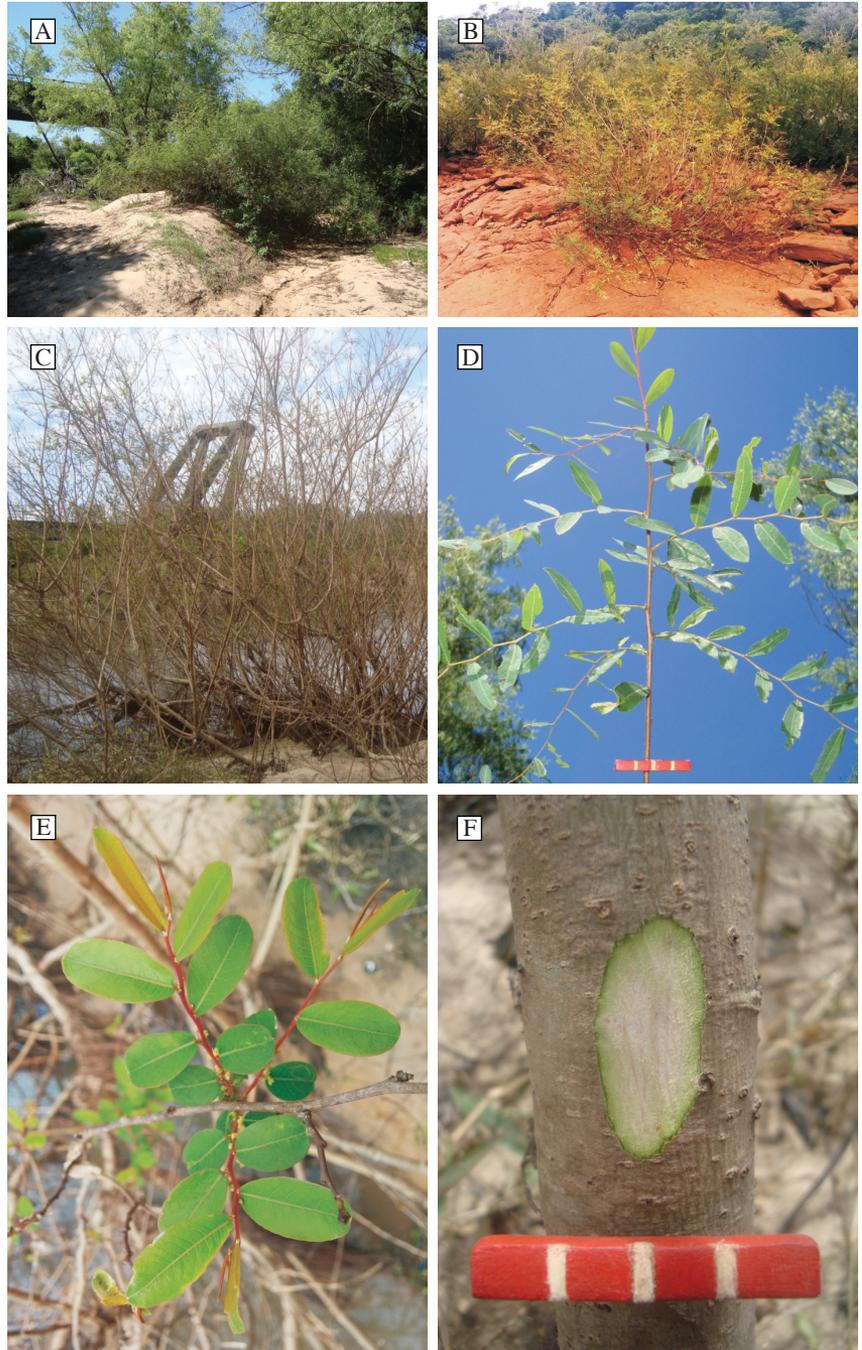


Figura 2:
Phyllanthus sellowianus
(sarandi-branco):
A, B) Indivíduos
crescendo no leito seco
de um curso d'água;
C) Indivíduos
completamente sem
folhas na margem de
um rio; D) Folhas
simples, com margens
inteiras, dispostas em
ramos avermelhados e
flexuosos (em zig-zag);
E) Ramos com flores
muito pequenas,
dispostas na axila das
folhas; F) Casca
externa acinzentada e
áspera, marcada por
lenticelas esparsas,
casca interna
esbranquiçada.
Escala = 4cm.
Fotografias A, C, D e
F: Luciano Denardi.
B e E: Rita Sousa.

Sua floração ocorre de setembro até fevereiro e a frutificação de novembro até março. A propagação vegetativa por meio de estacas é extremamente favorável nesta espécie. As taxas de sobrevivência e a emissão de brotos da parte aérea e do sistema radicular são excelentes, caracterizando-se por vigoroso desenvolvimento vegetativo, baixo custo de reprodução e servindo como fonte primária de material vegetal para outras obras.

Essa espécie reófila e de dispersão ampla, porém descontínua e irregular ao longo das margens ou ilhas rochosas dos rios, surge praticamente em todo o sul do Brasil até o estado do Mato Grosso do Sul, bem como no Uruguai, nordeste da Argentina e Paraguai. A espécie é heliófila e seletiva higrófila até xerófila, adaptada às variações extremas de umidade ou seca, desenvolvendo-se preferencialmente nos locais de corredeiras e cachoeiras dos rios. Frequentemente ocorre em associação com *Gymnanthes schottiana*, *Terminalia australis* e *Calliandra brevipes*.

Como características morfomecânicas, apresenta copa baixa e flexível. O sistema radicular é denso, profundo, lateral e de alta resistência à tração.

É adequada para resolver problemas de estabilização hidráulica, nas margens e leito de cursos de água, para controlar a erosão superficial (utilizando-se densidades altas de plantio para garantir a cobertura uniforme do solo), e também para estabilização geotécnica.

Pode ser utilizada desde a base até o topo dos taludes secos e fluviais, inclusive nas áreas mais inclinadas (crista até metade do talude), devido ao seu porte baixo. Também é indicada para áreas abaixo do nível de canal pleno, pois resiste a longos períodos de submersão.

As técnicas de Engenharia Natural em que a espécie pode ser utilizada incluem estacaria viva, entrançado vivo, feixes vivos, esteira viva, banquetas vegetadas, enrocamento vivo, defletores, grade viva, parede krainer, gabião vivo, terra reforçada e barragem de correção torrencial.

Salix humboldtiana Willd.

A espécie recebe variadas denominações pelo Brasil, entre elas: salseiro, salso, salgueiro, louro-da-várzea, ourana e chorão. Integrante da família Salicaceae, é uma árvore caducifólia de até 20 metros de altura, provida de ramos delgados e flexíveis, formando copa ampla e pouco densa. Nos indivíduos adultos a casca externa é espessa, profundamente fissurada e de coloração cinza-escuro, ao passo que a interna se apresenta rosada. Em exemplares jovens, a cas-

ca externa mostra-se áspera e de tonalidade cinza-claro, enquanto que a interna é fracamente esverdeada. Folhas simples, geralmente falcadas, com margens serreadas e pecíolo reduzido. Flores pequenas, amareladas e pouco atrativas, dispostas na extremidade dos ramos novos. Fruto capsular de dimensão reduzida. Sementes providas de um tufo de pelos sedosos e esbranquiçados (figura 3).

Apresenta diferentes épocas de floração e frutificação. A floração ocorre geralmente entre agosto e novembro; no Mato Grosso do Sul em julho, no Rio Grande do Sul de agosto a outubro e no Paraná de setembro a novembro. A maturação dos frutos é constatada normalmente do final da primavera até o término do verão. As sementes devem ser semeadas logo após a coleta, porém sua viabilidade é curta, durando aproximadamente duas semanas.

Essa espécie propaga-se facilmente por meio de estacas de caules e ramos. Alguns estudos já demonstraram a excelente capacidade de enraizamento e de emissão de brotos da parte aérea das estacas do salseiro, proporcionando baixo custo de reprodução e servindo como fonte primária de material vegetal para outras obras.

Trata-se de uma espécie heliófila e seletiva higrófila, que habita usualmente a margem de cursos de água. Ocorre naturalmente desde o México até a Argentina e Chile. No Brasil, sua distribuição uniforme vai desde o estado do Rio Grande do Sul até os estados de Minas Gerais e Mato Grosso Sul; surge, também, em alguns estados da região Norte do país (Acre, Amazonas e Pará).¹¹ Isolada ou formando densos agrupamentos, é uma das plantas mais difundidas em áreas de solos ainda não estruturados, muito úmidos e de elevada profundidade, com textura arenosa a areno-argilosa.

Como características morfomecânicas apresenta copa ramificada e flexível, sistema radicular denso, profundo, lateral e com alta resistência à tração.

É ideal para resolver problemas de estabilização geotécnica, uma vez que possui raízes que promovem ancoragem profunda, escoramento e arqueamento do solo. Sua utilização requer manutenção com podas periódicas para evitar o crescimento excessivo. Serve também para estabilização hidráulica nas margens e leito de cursos de água e para controlar a erosão superficial.

Pode ser empregada tanto em taludes fluviais como em taludes secos. Porém, não deve ser implantada na crista até a metade do talude, pois devido ao seu porte arbóreo causa sobrecarga no talude e aumento das solicitações pelo efeito do vento.

¹¹ KETTENHUBER, P. L. W.
Op. cit.

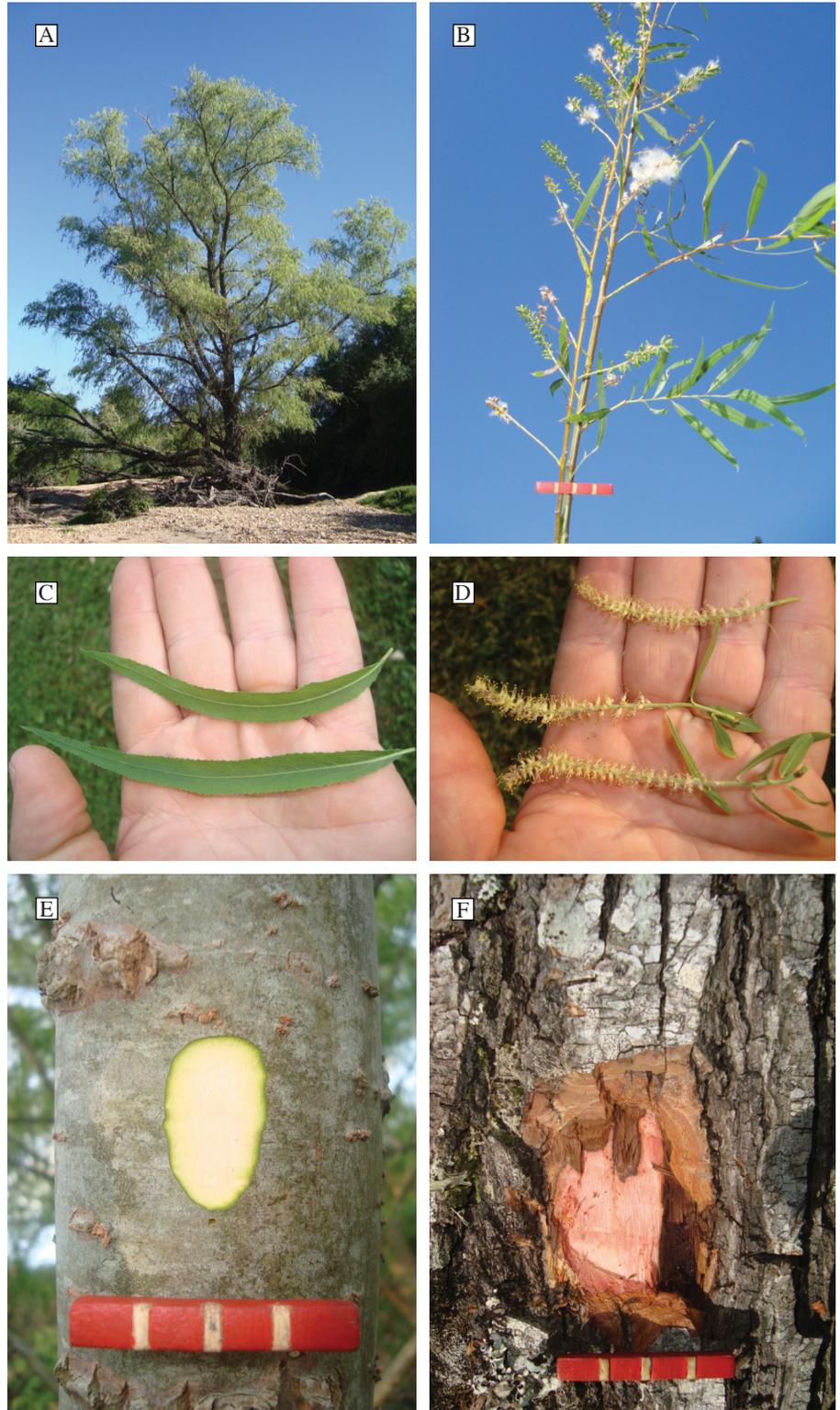


Figura 3:
Salix humboldtiana
(salseiro): A) Indivíduo
adulto habitando o leito
de um rio; B) Ramo
fértil, com destaque
para os tufos de pêlos
esbranquiçados que
envolvem as sementes;
C) Folhas simples,
falcadas, com margens
serreadas; D) Aspecto
das inflorescências
(conjunto de flores);
E) Casca externa áspera
e casca interna fraca-
mente esverdeada, em
exemplar jovem;
F) Casca externa com
fissuras profundas e
casca interna rosada, em
indivíduo adulto.
Escala = 4 cm.
Fotografias:
Luciano Denardi.

Os tipos de intervenções de Engenharia Natural nos quais esta espécie pode ser utilizada incluem estacaria viva, entrançado vivo, feixes vivos, esteira viva, banquetta vegetada, enrocamento vivo, defletores, grade viva, parede kramer e barragem de correção torrencial.

Gymnanthes schottiana Müll. Arg.

Espécie conhecida popularmente por sarandi, sarandi-de-espinho, sarandi-negro, sarandi-vermelho, amarelo, içaranduba, assobio-de-macaco e espinho-de-olho. Pertencente à família Euphorbiaceae, é um arbusto caducifólio de até 3,5 metros de altura, provido de numerosas ramificações e de copa densa. Casca externa áspera, acinzentada (cor de vinho em troncos e ramos jovens), marcada por numerosas lenticelas esbranquiçadas; casca interna esverdeada. Folhas simples, de margens inteiras, providas de uma ou duas pequenas glândulas (aparecem como manchas escuras) localizadas próximas ao pecíolo. Flores pequenas, amareladas e pouco atrativas. Frutos igualmente pequenos, marcados por sulcos longitudinais que dão o aspecto de gomos (figura 4).

A floração ocorre normalmente de setembro a dezembro, ao passo que a frutificação se estende até janeiro. A espécie pode ser facilmente propagada vegetativamente por meio de estacas de caules e ramos; além da elevada taxa de sobrevivência, as estacas emitem vigorosa brotação da parte aérea e do sistema radicular, apresentando baixo custo de reprodução e servindo como fonte primária de material vegetal para outras obras.

No Brasil, aparece naturalmente ao longo da margem de rios e ilhas rochosas das regiões Sul e Sudeste e em alguns locais da região Centro-Oeste.¹² Trata-se de uma planta heliófila, seletiva higrófila até xerófila, suportando variações extremas de umidade e seca. Como planta reófila, é capaz de suportar a força das águas durante as enchentes.

Do ponto de vista morfomecânico, caracteriza-se por sua copa densa, ramificada, baixa e flexível e por um sistema radicular denso, lateral, profundo, com grande quantidade de raízes finas e alta resistência à tração.

Trata-se de um espécie adequada para resolver problemas de estabilização hidráulica, nas margens e leito de cursos de água, para controlar a erosão superficial (utilizando-se densidades altas de plantio para garantir a cobertura uniforme do solo), e também para estabilização geotécnica.

¹² KETTENHUBER, P. L. W.
Op. cit.

Figura 4:
*Gymnanthes
schottiana* (sarandi-
de-espinho):

A) Indivíduos muito
ramificados, crescen-
do no leito seco de
um rio;

B) Indivíduos adultos
crescendo em uma
ilha de um
curso de água;

C) Aspecto de um
ramo, destacando a
coloração cor-
de-vinho e a presença
de espinhos;

D) Detalhes das
inflorescências
(conjunto de flores)
presentes na axila
das folhas;

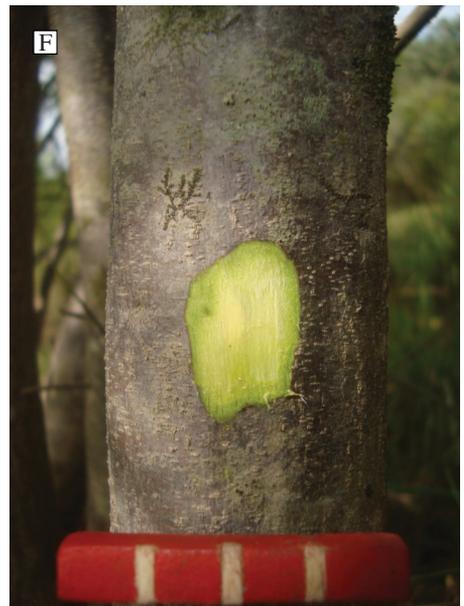
E) Frutos ainda
imaturos, com
aspecto de gomos;

F) Casca externa
áspera, cor-de-vinho,
e casca interna
esverdeada.

Escala = 4cm.

Fotografias A, B e
E: Rita Sousa.

C e F: Luciano
Denardi. D: Paula
Kettenhuber.



Pode ser implantada desde a base até o topo dos taludes secos e fluviais, inclusive nas áreas mais inclinadas (crista até metade do talude), devido ao seu porte baixo. Também pode ser aplicada nas áreas abaixo do nível de canal pleno, pois resiste a longos períodos de submersão.

As técnicas de Engenharia Natural que a espécie admite incluem estacaria viva, entrançado vivo, feixes vivos, esteira viva, banquetas vegetadas, enrocamento vivo, defletores, grade viva, parede krainer, gabião vivo, terra reforçada e barragem de correção torrencial.

Senna reticulata
(Willd.) H. S. Inwin & Barneby

Trata-se de uma espécie da família Fabaceae, conhecida popularmente por maria-mole, mata-pasto ou mangerio-ba-grande. Apresenta-se como árvore perenifólia de até 12 metros de altura, ou então como arbusto, com cerca de 3 a 4 metros. Se cultivados próximos uns dos outros, os indivíduos formam uma cobertura densa. Casca externa acinzentada ou enegrecida, áspera, marcada por numerosas lenticelas e cicatrizes foliares. Folhas compostas, formadas por oito a quatorze pares de lâminas oblongas, com margens inteiras e extremidade arredondada. As flores, amarelas e ornamentais, encontram-se reunidas no ápice dos ramos ou na axila das folhas. Os legumes são alongados, achatados e totalmente pretos quando maduros (figura 5).

Na região amazônica a espécie produz flores e frutos a partir de 9 a 12 meses de idade. A floração e a frutificação ocorrem no período das cheias (maio a julho), ao passo que as sementes são liberadas entre junho e agosto. As sementes apresentam elevada taxa de germinação (85%) quando não submersas. A propagação vegetativa por meio de estacas é favorável nesta espécie, apresentando baixo custo de reprodução e servindo como fonte primária de material vegetal para outras obras.

Com exceção dos três estados do Sul do Brasil (Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul), a espécie distribui-se por praticamente todo o país, principalmente na Região Amazônica.¹³ A planta habita preferencialmente solos arenos-argilosos, em terrenos inundáveis ou não, em áreas de pastagens e campos abertos, muitas vezes formando touceiras. Por seu rápido crescimento, alta tolerância de suas raízes a inundações e capacidade de rebrota, a espécie impede a formação de pastagem nas planícies amazônicas, características que justificam a denominação popular de “mata-pasto”.

¹³ KETTENHUBER, P. L. W.
Op. cit.

Do ponto de vista morfomecânico, apresenta copa ramificada baixa e perene. Sabe-se apenas que seu sistema radicular é denso e lateral; as demais informações são ainda desconhecidas.

A espécie é muito adequada para resolver problemas de estabilização hidráulica, nas margens de cursos de água, para controlar a erosão superficial (utilizando-se densidades altas de plantio para garantir a cobertura uniforme do solo), e também para estabilização geotécnica, uma vez que apresenta sistema radicular denso; no entanto, ainda não se conhece a profundidade de alcance de suas raízes.

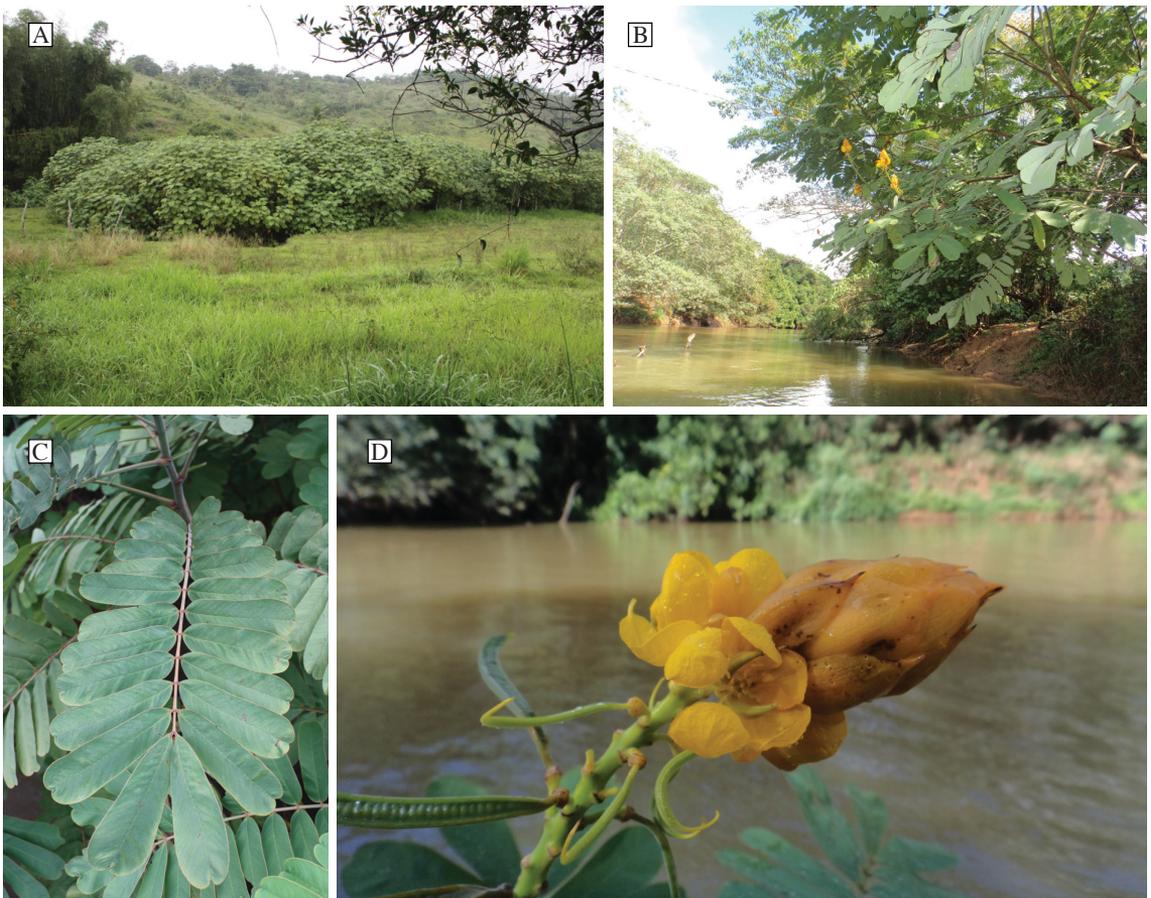


Figura 5: *Senna reticulata* (mata-pasto): A) População reunindo diversos indivíduos, formando uma cobertura densa sobre o solo; B) Aspecto de um indivíduo crescendo nas margens de um rio; C) Detalhe de uma única folha, em primeiro plano, que é formada por vários pares de lâminas oblongas, com ápice arredondado e margens inteiras; D) Aspecto das flores, reunidas no ápice de um ramo, e dos legumes, ainda imaturos. Fotografias: Rita Sousa.

Pode ser utilizada desde a base até o topo dos taludes secos e fluviais, inclusive nas áreas mais inclinadas (crista até metade do talude), devido ao seu porte relativamente baixo.

As técnicas de Engenharia Natural adequadas à espécie incluem estacaria viva, feixes vivos, esteira viva, banquetta vegetada, enrocamento vivo, grade viva, parede kramer e gabião vivo.

***Terminalia australis* Cambess.**

Pertencente à família Combretaceae, a espécie recebe os nomes populares de sarandi, sarandi-amarelo, amarelo, amarelinho e tanimbú. Trata-se de um arbusto ou árvore caducifólia de até 10 metros de altura, normalmente ramificada desde a base do tronco. Ramos finos e compridos (por vezes pendentes), formando copa pouco densa. Casca externa acinzentada ou marrom-claro, com fissuras pouco profundas; casca interna fortemente amarelada. Folhas simples, de margens inteiras, pilosas quando jovens e geralmente agrupadas no ápice dos ramos. Flores brancas ou amareladas, pequenas e pouco atrativas. Fruto seco e alado, marrom quando maduro, contendo uma única semente (figura 6).

A floração ocorre de maio a agosto, no Estado do Paraná, ao passo que no Rio Grande do Sul e Santa Catarina a floração tem início na primavera e a maturação dos frutos no verão. A coleta das sementes deve ser feita quando os frutos estiverem marrons. As sementes requerem tratamento pré-germinativo, devendo-se deixá-las imersas em água com temperatura ambiente por 24 ou 36 horas; a emergência tem início de 40 a 60 dias após a sementeira. A espécie também pode ser propagada vegetativamente por meio de estacas.

Terminalia australis é uma planta reófila e heliófila, muito comum nos taludes dos rios sujeitos a inundações periódicas; tolera baixas temperaturas e prefere solos com textura arenosa e areno-argilosa.

Ocorre naturalmente na Região Sul do Brasil e em alguns locais do Mato Grosso do Sul.¹⁴ No estado do Rio Grande do Sul, juntamente com *Pouteria salicifolia*, *Calliandra brevipes*, *Phyllanthus sellowianus* e *Gymnanthes schottiana*, chega a formar densos agrupamentos.

Como características morfomecânicas possui copa ramificada, baixa e flexível, sistema radicular denso, lateral, profundo e com grande quantidade de raízes finas.

¹⁴ KETTENHUBER, P. L. W.
Op. cit.

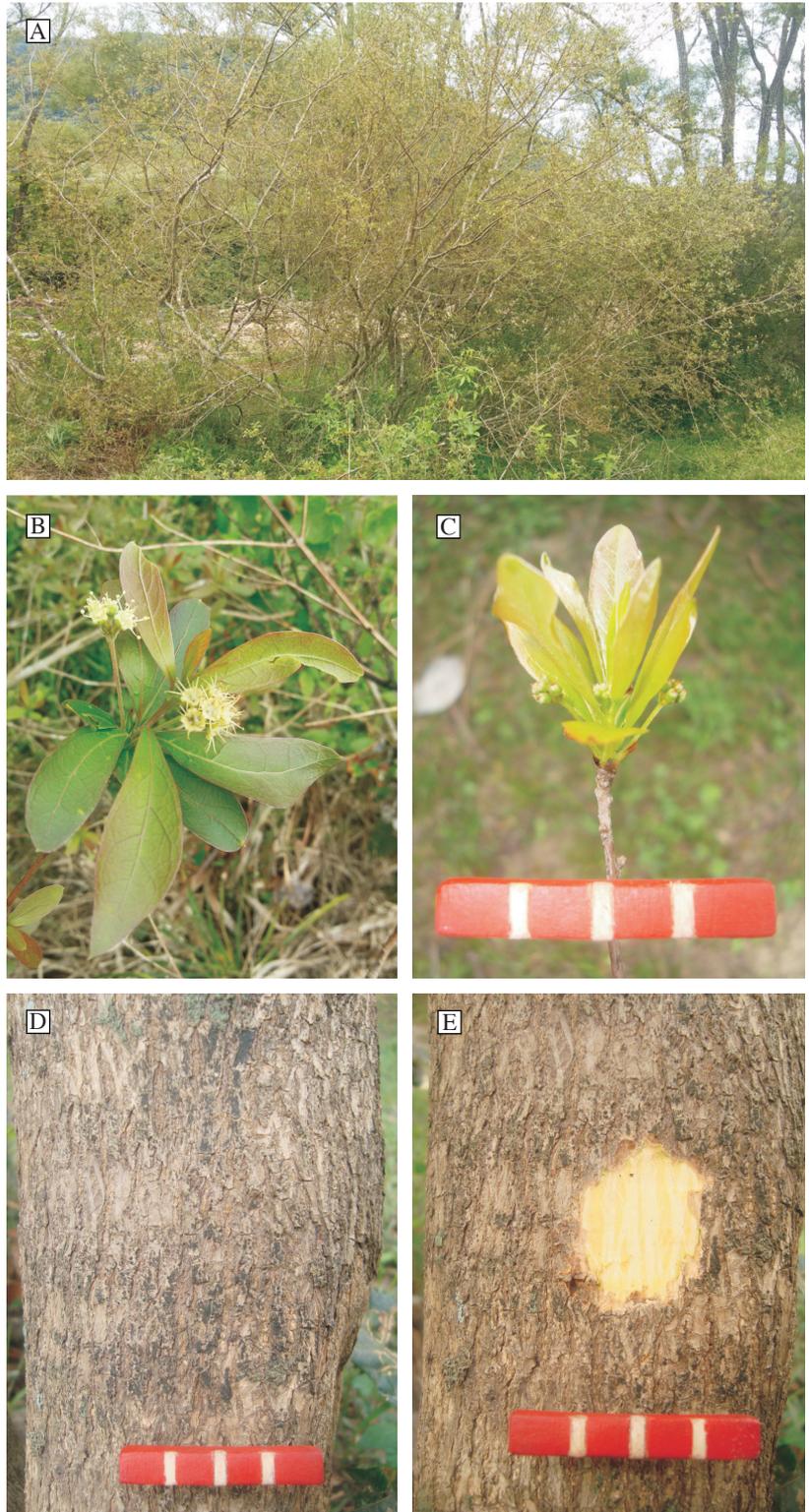


Figura 6:

Terminalia australis
(sarandi-amarelo):

- A) Aspecto geral de um indivíduo adulto muito ramificado às margens de um rio; B) Folhas simples, de margens inteiras, agrupadas no ápice do ramo; C) Detalhe de um ramo, com destaque para inflorescências (conjunto de flores) presentes na axila das folhas; D) Casca externa com fissuras pouco profundas; E) Casca interna fortemente amarelada. Escala = 4cm.

Fotografias A e B:

Paula Kettenhuber.
C, D e E: Luciano Denardi.

Paula Letícia Wolff Kettenhuber é graduada em Engenharia Florestal, mestre em Engenharia Florestal e doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal da Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul.
paulakettenhuber@gmail.com

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

Luciano Denardi é graduado em Engenharia Florestal, doutor em Engenharia Florestal pela Universidade Federal de Santa Maria e professor do Departamento de Ciências Florestais da Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul.
lucianodenardi@yahoo.com.br

Fabrcio 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

A espécie serve para resolver problemas de estabilização hidráulica, nas margens e leito de cursos de água, para controlar a erosão superficial (utilizando-se densidades altas de plantio para garantir a cobertura uniforme do solo), e também para estabilização geotécnica.

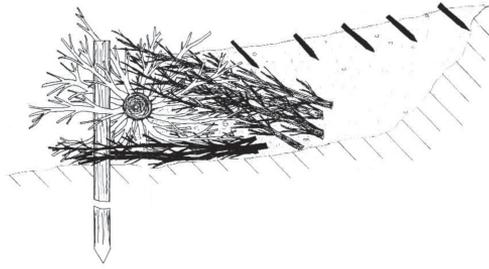
É indicada apenas para obras em taludes fluviais, pois sua ocorrência está intimamente associada aos cursos de água, podendo suportar longos períodos de submersão.

Os tipos de intervenções de Engenharia Natural nos quais essa espécie pode ser utilizada incluem estacaria viva, entrançado vivo, feixes vivos, esteira viva, banquetas vegetadas, enrocamento vivo, defletores, grade viva, parede Krainer e barragem de correção torrencial.

Considerações finais

A Engenharia Natural apresenta um conjunto de soluções construtivas utilizadas para proporcionar estabilidade e proteção de taludes, margens de rios e áreas em processo erosivo e baseia-se essencialmente nas propriedades biotécnicas das espécies vegetais.

As plantas descritas neste artigo são as primeiras espécies vegetais autóctones brasileiras investigadas quanto às suas características biotécnicas. Cabe destacar, entretanto, que a lista de plantas brasileiras com potencial biotécnico é certamente bem maior. Muitas outras estão em fase de estudos e as informações obtidas constituirão um catálogo que servirá para nortear a escolha e o uso mais adequado de plantas em obras de Engenharia Natural no Brasil.



ENGENHARIA NATURAL PARA ESTABILIZAÇÃO HIDRÁULICA DO RIO PARDINHO EM SANTA CRUZ DO SUL - RS

Paula Letícia Wolff Kettenhuber
Junior Joel Dewes
Fabrcio Jaques Sutili

No Brasil, a utilização das técnicas preconizadas pela Engenharia Natural é relativamente recente, o que justifica a grande demanda por pesquisas na área e, principalmente, a divulgação de estudos de caso da aplicação dessas técnicas em obras realizadas no país. Sendo assim, será descrita, a título de exemplo, a elaboração do projeto, a execução e evolução temporal de uma obra de estabilização hidráulica realizada em trecho de 80 metros da margem esquerda do Rio Pardinho, a jusante da barragem do Lago Dourado, no município de Santa Cruz do Sul, Rio Grande do Sul. O projeto foi realizado pelo Centro de Pesquisa Florestal e Ambiental (CEPEFLORA) da Universidade Federal de Santa Maria para a Companhia Riograndense de Saneamento (CORSAN), no ano de 2010.

Introdução

Os cursos de água apresentam, com frequência, problemas decorrentes do seu comportamento processual natural, que, por vezes, são agravados por ações antrópicas, ou delas decorrem. Um dos problemas recorrentes nas margens dos cursos de água é a corrosão, que se verifica principalmente pela retirada da base de apoio do talude, devido à velocidade do fluxo, ao turbilhonamento e à ação das ondas junto à faixa que acompanha o nível normal da água.¹

Tais problemas, que representam tanto perdas econômicas como situações de risco, podem, com o devido conhecimento, ser mitigados ou mesmo solucionados pela Engenharia Natural.²

A estabilização hidráulica é entendida como um dos campos de aplicação das técnicas de Engenharia Natural, que compreende os trabalhos de construção de estruturas físicas com materiais inertes, em combinação com material vegetal vivo, com vistas à estabilização e/ou recomposição das margens de corpos de água naturais ou artificiais, como rios, córregos, lagos, barragens, entre outros.

A seleção das técnicas a serem utilizadas nas obras é função de diferentes fatores, entre eles, o tipo de problema que ocorre no local, a inclinação do talude, a disponibilidade de plantas matrizes nos locais próximos, as características da vegetação, e a dinâmica do curso de água, incluindo frequência, volume e velocidade das vazões.

Este artigo tem o objetivo de descrever a execução de uma obra de estabilização hidráulica realizada em um trecho instável da margem esquerda do Rio Pardinho a jusante da barragem do Lago Dourado, no município de Santa Cruz do Sul (RS), desde a elaboração do seu projeto até os resultados atingidos após alguns anos.³

Caracterização do problema

A área de estudo está localizada no município de Santa Cruz do Sul, na região central do estado do Rio Grande do Sul. A obra foi realizada em um trecho de aproximadamente 100m na margem esquerda do Rio Pardinho, a jusante da barragem de captação de água da CORSAN (figura 1).

Esta margem apresentava sérios problemas de instabilidade, como se observa na figura 2A, resultantes do desvio do eixo do curso de água para o raio externo levemente curvo, neste local, pela construção de uma nova adutora a montante.

¹ DURLO, M. & SUTILI, F. *Bioengenharia – Manejo biotécnico de cursos de água*. 3ª. ed. Santa Maria: Pallotti, 2014.

² SUTILI, F. J. *Bioengenharia de solos no âmbito fluvial do Sul do Brasil – Espécies aptas, suas propriedades vegetativo-mecânicas e emprego na prática*. 94f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal). Universidade Rural de Viena, Viena, 2007.

³ SUTILI, F. J.; CADONÁ, S. C. & HERPICH, M. A. *Estabilização Biotécnica no Rio Pardinho. Memorial Descritivo de Execução*. Universidade Federal de Santa Maria, Frederico Westphalen, 2010.

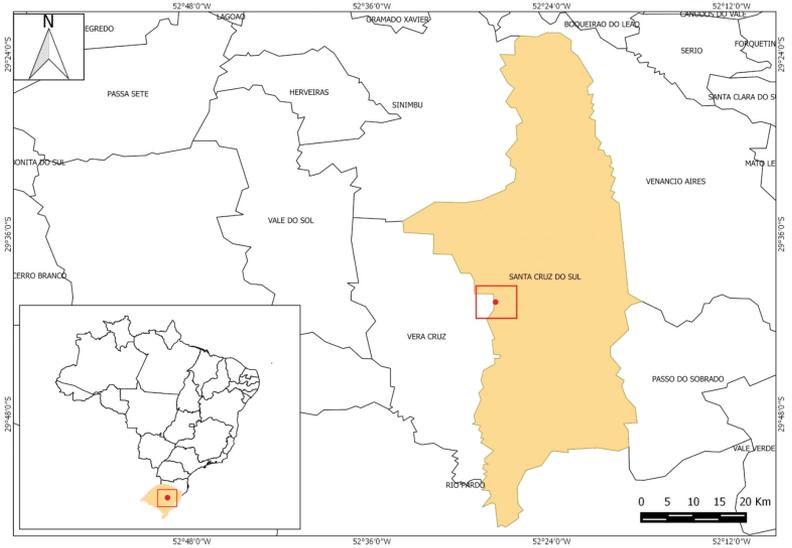


Figura 1: Mapa de localização da Barragem do Lago Dourado às margens do Rio Pardinho, no município de Santa Cruz do Sul - RS.

O desvio ocasionou um processo contínuo de corrosão, desconfinamento, deslizamento/desmoronamento e transporte de material devido à ação do fluxo de água no talude.

A presença de ângulos acentuados e a elevada altura do talude, de aproximadamente 7m, não permitiam o estabelecimento de vegetação espontânea (figura 2B). Por outro lado, a vegetação que ocupava o topo do talude, árvores de grande porte, originavam sobrecarga vertical, deslocando o centro de gravidade do talude para posições geotecnicamente menos estáveis, além de captar e transmitir a força do vento ao talude, criando um efeito de alavanca que seguramente agravava a dinâmica de desconfinamento, desencadeada pela correnteza do curso de água (figura 2C).

Soluções construtivas

Com o intuito de buscar uma solução para estes problemas, foi elaborado um projeto com técnicas de Engenharia Natural capazes de conter os processos de erosão, desconfinamento e instabilização que ocorriam no local. Para dimensionar a intervenção, realizou-se primeiramente um levantamento topográfico (figura 3), obtendo-se deste modo as curvas de níveis do trecho a ser estabilizado, conforme figuras 4 e 5. Também foi observada ocorrência local de espécies potencialmente úteis; nesse sentido, foram

encontradas: *Terminalia australis* (sarandi-amarelo), *Salix humboldtiana* (salso), *Schinus molle* (aroeira-salso), *Schinus terebinthifolius* (aroeira-mansa), *Pouteria salicifolia* (sarandi-mata-olho), *Phyllanthus sellowianus* (sarandi-branco), *Enterolobium contortisiliquum* (timbaúva).

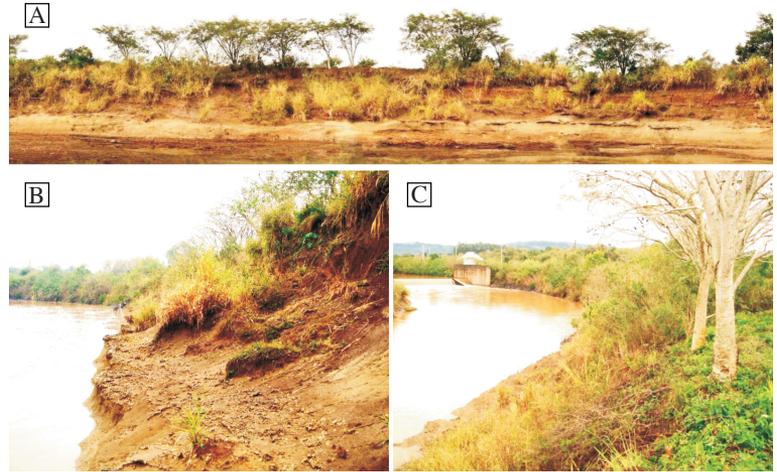


Figura 2: Caracterização dos problemas de instabilidade do local. A) Vista frontal do trecho a ser estabilizado. B) Vista lateral do talude. C) Presença de árvores de grande porte no topo do talude.

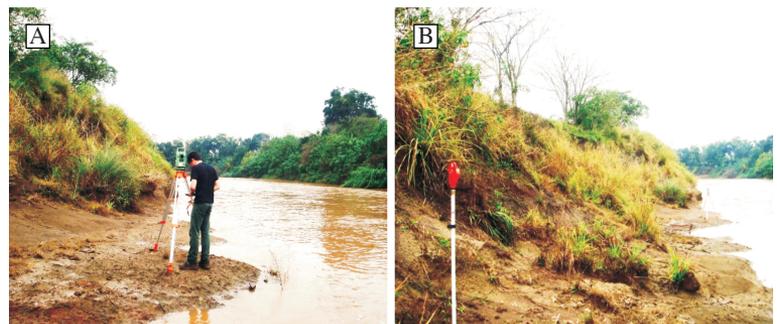


Figura 3: A, B) Levantamento topográfico do local.

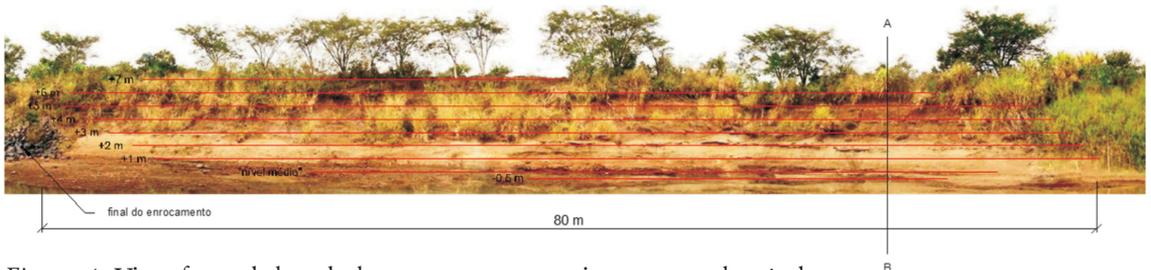


Figura 4: Vista frontal do talude com suas respectivas curvas de nível.

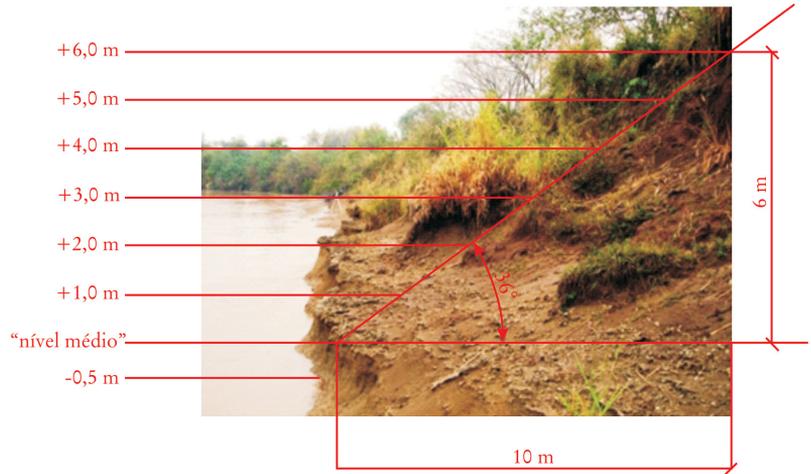


Figura 5: Vista em corte A-B do talude com suas respectivas curvas de nível.

A proposta geral para estabilização deste talude previa a utilização de obras longitudinais ao longo do trecho, visto que tais obras (estruturas construídas ao longo do curso de água) têm, como principais funções, reconstruir, proteger e estabilizar as margens. Isso pode ser conseguido tanto com o revestimento vegetal e/ou físico, buscando conferir às margens (taludes) maior resistência à força da água.⁴

⁴ DURLO, M. & SUTILI, F. *Op. cit.*

Como, no local, os efeitos da corrosão e dos deslizamentos evoluíram a tal ponto que o desenvolvimento da vegetação se tornou difícil, era necessário promover o estabelecimento da vegetação de cobertura a fim de se evitar a erosão superficial, além de alterar a inclinação do talude para garantir a estabilidade do mesmo. Para tal, projetaram-se intervenções de Engenharia Natural que combinassem o uso de materiais construtivos inertes com plantas, sendo que os materiais inertes atuam como estabilizadores do talude na fase inicial, permitindo o estabelecimento e desenvolvimento da vegetação, até que estas, através de suas raízes, sejam capazes de realizar esta função.

As soluções construtivas propostas para a primeira fase da obra, realizada durante o mês de abril de 2010, foram: enrocamento vegetado, banquetas de arbustos, ancoragem de salsos (*Salix humboldtiana*) e timbaúvas (*Enterolobium contortisiliquum*), retaludamento da parte superior da encosta, e por fim o plantio de mudas de *Calliandra brevipes* e estacas de *Phyllanthus sellowianus*, conforme apresentado na figura 6. A segunda fase da obra consistiu em uma medida vegetativa complementar, com o plantio de mudas nativas previsto para o início da primavera.

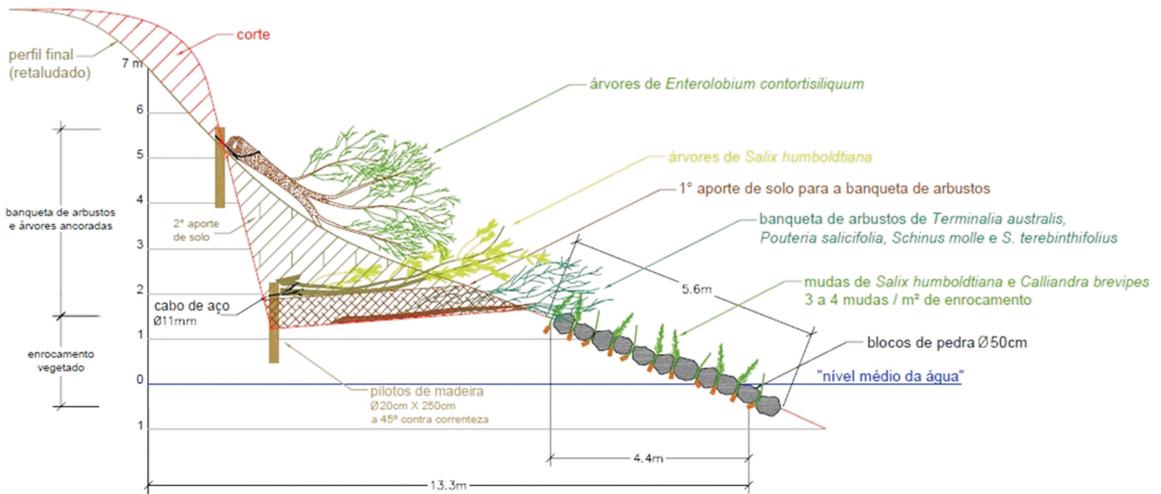


Figura 6: Vista em corte das soluções construtivas propostas na primeira fase da obra.

Enrocamento vegetado

O enrocamento vegetado corresponde a uma obra de defesa longitudinal contra a erosão da base da encosta da margem. A utilização de plantas nesta intervenção tem como objetivo melhorar as condições do local, favorecendo a colonização por outras espécies. Melhoram, igualmente, as características mecânicas do solo, integrando as rochas aplicadas e provocando o aumento da rugosidade hidráulica, o que reduz a velocidade da água e promove o depósito de sedimentos entre e sobre as rochas.

Para implementação desta técnica, primeiramente, foi necessário retaludar a base da margem, diminuindo-se sua inclinação para um ângulo entre 20 e 25° (figura 7A). O enrocamento foi instalado em toda a extensão da margem, iniciando-se um pouco abaixo do “nível médio”, em uma faixa de 5 a 6m do talude. Para cobrir todo o trecho de 450m², foram utilizados cerca de 200m³ de blocos de basalto com diâmetros variando entre 20 e 85cm (figura 7B).

À medida que o enrocamento estava sendo instalado, o mesmo foi vegetado com 900 mudas e 500 estacas das espécies *Calliandra brevipes* e *Salix humboldtiana*, respectivamente, com um ano de idade, a partir do nível médio do curso de água.

As mudas de *Calliandra brevipes* foram produzidas a partir de sementes e apresentavam aproximadamente 1m de altura (figura 7C). Já as mudas de *Salix humboldtiana*, provenientes de estaquia, apresentavam altura entre 1 e 2m (figura 7D). Essas, após serem seccionadas ao meio,

tiveram a parte superior plantada, como estaca, junto à linha d'água.

A densidade de plantio utilizada foi de 3 mudas/m², dispostas entre os blocos de rocha de modo que ficassem acomodadas no sentido da correnteza. Para abertura das covas, utilizaram-se enxadas de mão e cavadeiras. Para facilitar o plantio, alguns blocos foram afastados e posteriormente recolocados de forma a fixar e proteger as mudas (figuras 7E e 7F).

As mudas foram dispostas em linha, ao longo de toda a porção superior do enrocamento. Sempre que necessário, as mudas e estacas foram regadas com auxílio de baldes e caminhão pipa.



Figura 7: Execução do enrocamento vegetado. A) Retaludamento da base. B) Colocação dos blocos de basalto em toda extensão da base do talude. C) Mudanças de *Calliandra brevipes* utilizadas no enrocamento. D) Mudanças de *Salix humboldtiana* utilizadas no enrocamento. E, F) Plantio de mudas entre os blocos de rocha.

Banqueta de arbustos

As banquetas são degraus escavados transversalmente à inclinação do talude, onde é feito o plantio de estacas com capacidade de propagação vegetativa e/ou mudas, cobertas com solo. O plantio em banquetas funciona como obstáculo ao transporte de material fino dos solos e também pode ser utilizado como elemento de disciplinamento das águas superficiais.

No local, esta técnica ganhou utilização logo acima do enrocamento vegetado. O talude, após ser remodelado, criando uma banquetta com 5 metros de largura, recebeu arbustos das espécies *Pouteria salicifolia*, *Schinus molle*, *Schinus terebinthifolius* e *Terminalia australis* (figura 8A). Os exemplares destas espécies ocorriam naturalmente nas proximidades da obra, e, portanto, foram utilizados pela facilidade de obtenção e de propagação vegetativa. Posteriormente foram recobertos por uma camada de solo, com o intuito de facilitar sua propagação vegetativa (figura 8B).



Figura 8: Execução da banquetta de arbustos. A) Colocação dos arbustos sobre a banquetta. B) Aporte de solo sobre os arbustos.

Ancoragem de árvores inteiras

Esta técnica consiste na ancoragem de árvores inteiras fixadas a cabos de aço e prumos de madeira no declive da encosta, promovendo sua proteção superficial imediata (figura 9). As árvores criam estruturas de retenção junto às margens, aumentando a rugosidade hidráulica, o que conduz à diminuição da velocidade da água, favorecendo a deposição de material no local e assim diminuindo os processos erosivos.

Outra vantagem desta técnica é a facilidade de obtenção do material, pois utilizam-se árvores que ocorrem naturalmente no local. Na obra em questão, optou-se por utilizar as espécies *Salix humboldtiana* e *Enterolobium*

contortisiliquum, uma vez que a primeira foi encontrada em abundância ao longo do Rio Pardinho e já se conhecia seu potencial de propagação vegetativa; a segunda, além de ocorrer no próprio local, na crista do talude, necessitava ser removida pelos efeitos negativos que causava ao mesmo.

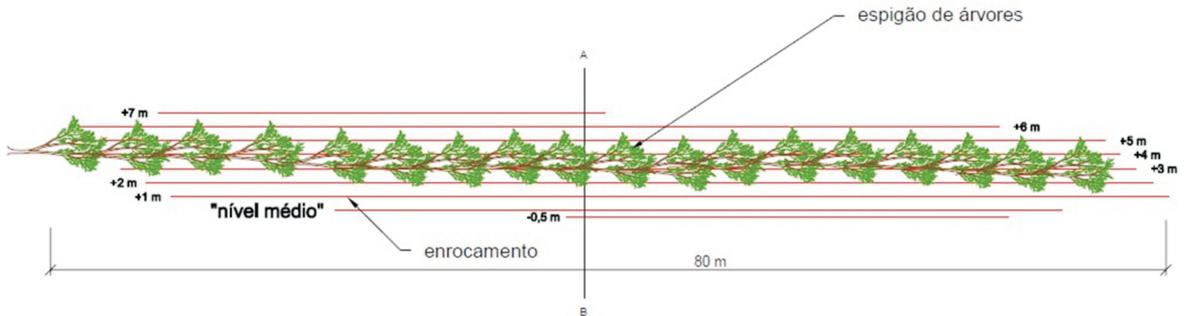


Figura 9: Ancoragem de árvores inteiras no declive da encosta.

Ancoragem de *Salix humboldtiana*

Sobre a banqueta de arbustos formou-se um segundo patamar onde foram ancoradas árvores da espécie *Salix humboldtiana*, conhecida popularmente como salso. Para tanto, ao longo da margem em tratamento, foram cravados 22 mourões de madeira (eucalipto) de 2,5m de comprimento e diâmetro de ± 17 cm. Estes foram instalados com o auxílio de uma escavadeira giratória, à profundidade de 1,5m, em ângulo de 45° sentido montante e interligados por cabo de aço de 11mm, ao longo da extensão do talude (figuras 10A e 10B).

As árvores de salsos foram coletadas da própria margem do Rio Pardinho, conforme Licença Ambiental nº 16/2010 da Secretaria Municipal de Meio Ambiente de Santa Cruz do Sul. Utilizaram-se apenas árvores instáveis e caídas que, após serem coletadas, foram transportadas para o local da obra. Tais árvores foram fixadas ao cabo de aço principal por meio de espigas menores (cortadas com aparelho de solda) e com grampos de ½ polegada (figuras 10C, 10D e 10E). Um segundo aporte de solo recobriu as árvores ancoradas (figura 10F).

Ancoragem de *Enterolobium contortisiliquum*

Sobre o novo aporte de solo, formou-se uma segunda linha de árvores, agora da espécie *Enterolobium contortisiliquum* (timbaúvas), retiradas (conforme licença ambiental) do topo do talude (figuras 11A e 11B) e fixadas a 15 prumos de madeira (figuras 11C e 11D).

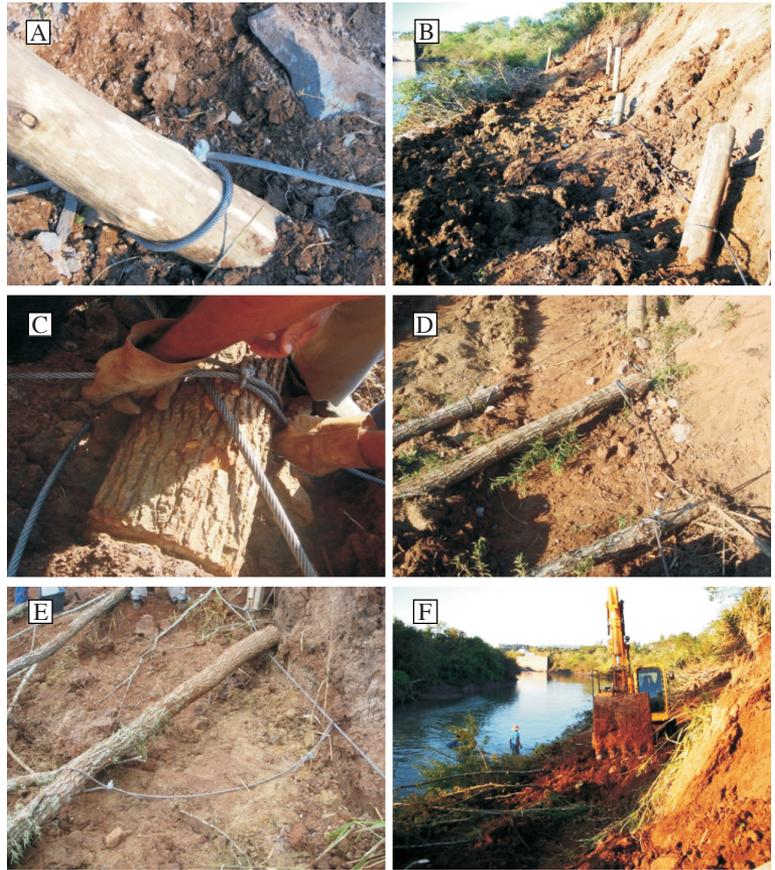


Figura 10: Execução da ancoragem de árvores de *Salix humboldtiana*. A, B) Pilotos de madeira cravados ao longo do talude interligados por cabo de aço. C, D, E) Árvores de *Salix humboldtiana* sendo fixadas ao cabo de aço principal por meio de espigas e grampos. F) Aporte de solo para recobrir as árvores ancoradas.

As timbaúvas de maior porte foram seccionadas, para melhor acomodá-las no sentido da correnteza. As árvores não receberam aporte de solo, pois não existia expectativa de sua propagação vegetativa.

Correção do ângulo do talude

Subsequentemente às demais intervenções descritas, foi realizado, com o auxílio de uma escavadeira, o chanframento do topo do talude, diminuindo-se, assim, a inclinação do “nível superior”, ao longo de toda sua extensão (figura 12). Tal medida de modelação da crista teve como objetivo estabilizar o talude e propiciar o desenvolvimento da vegetação espontânea e plantada no local.

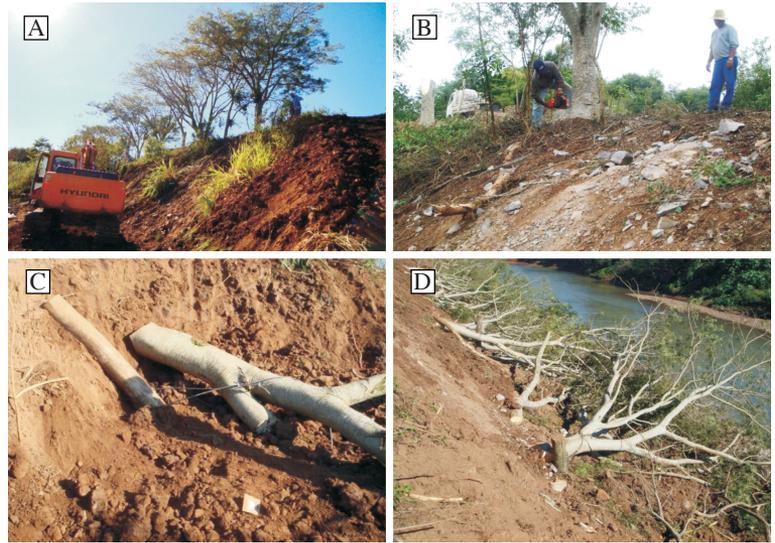


Figura 11: Execução da ancoragem de árvores de *Enterolobium contortisiliquum*. A) Árvores da espécie *E. contortisiliquum* presentes na crista do talude. B) Execução do corte das árvores. C, D) Árvores de *E. contortisiliquum* fixadas aos prumos de madeira.

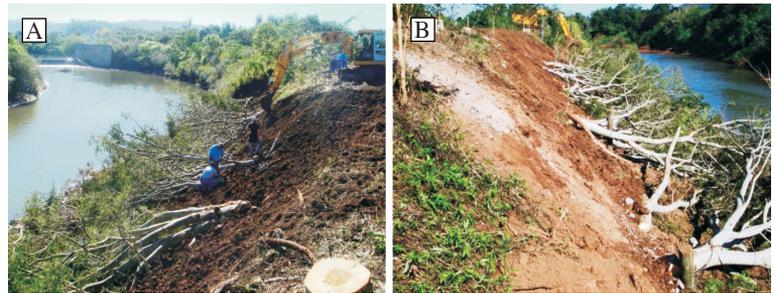


Figura 12: A, B) Correção do ângulo do topo do talude.

Plantio de mudas e estacas

Por fim, junto à ancoragem de timbaúvas, foram plantadas 100 mudas da espécie *Calliandra brevipes* e 100 estacas da espécie *Phyllanthus sellowianus* coletadas no município de Sinimbu (RS).

Segunda intervenção vegetativa

Após a conclusão da primeira fase da obra (figura 13A), durante os meses de inverno do ano de 2010, ocorreram eventos de precipitação intensa, que elevaram o nível de água até a cota mais alta do talude, cobrindo completamente a obra. Naquela ocasião, a força da água foi suficiente para remover o espigão de timbaúvas (*Enterolobium*

contortisiliquum) preso superficialmente à porção média do talude (figura 13B).

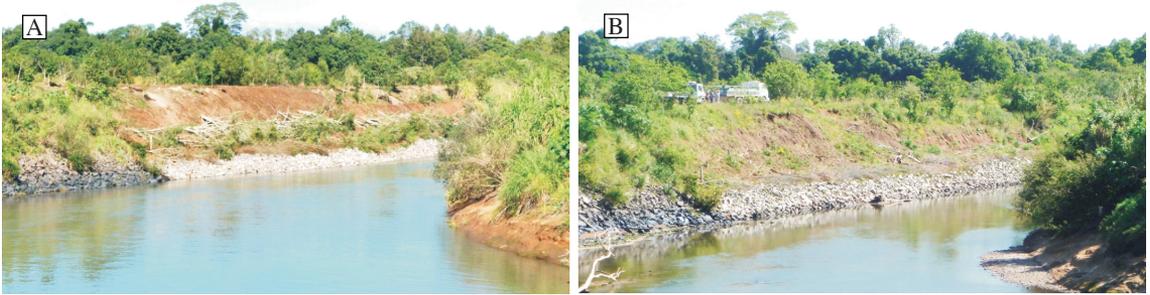


Figura 13: A) Vista geral do talude após a execução da primeira fase da obra (Abril/2010). B) Vista geral do talude após os eventos de enchente que removeram o espigão de árvores de *E. contortisiliquum* (Agosto/2010).

As demais intervenções vegetativas e o enrocamento vegetado sofreram apenas pequenos danos, resistindo bem ao período de inundação.

No projeto havia a previsão de uma segunda intervenção vegetativa no início da primavera daquele ano, já que a primeira fase da obra fora implantada no início da estação de inverno (mês de abril/2010), prevendo-se que as plantas apresentariam baixo desenvolvimento no período. Assim, esta medida de caráter complementar mostrou-se ainda mais necessária após os eventos de fortes precipitações ocorridos no inverno. A intervenção vegetativa complementar foi realizada na primavera do mesmo ano (mês de outubro/2010), quando foram plantadas 1.550 mudas de espécies nativas, com vistas a aumentar a diversidade biológica do local (figura 14).

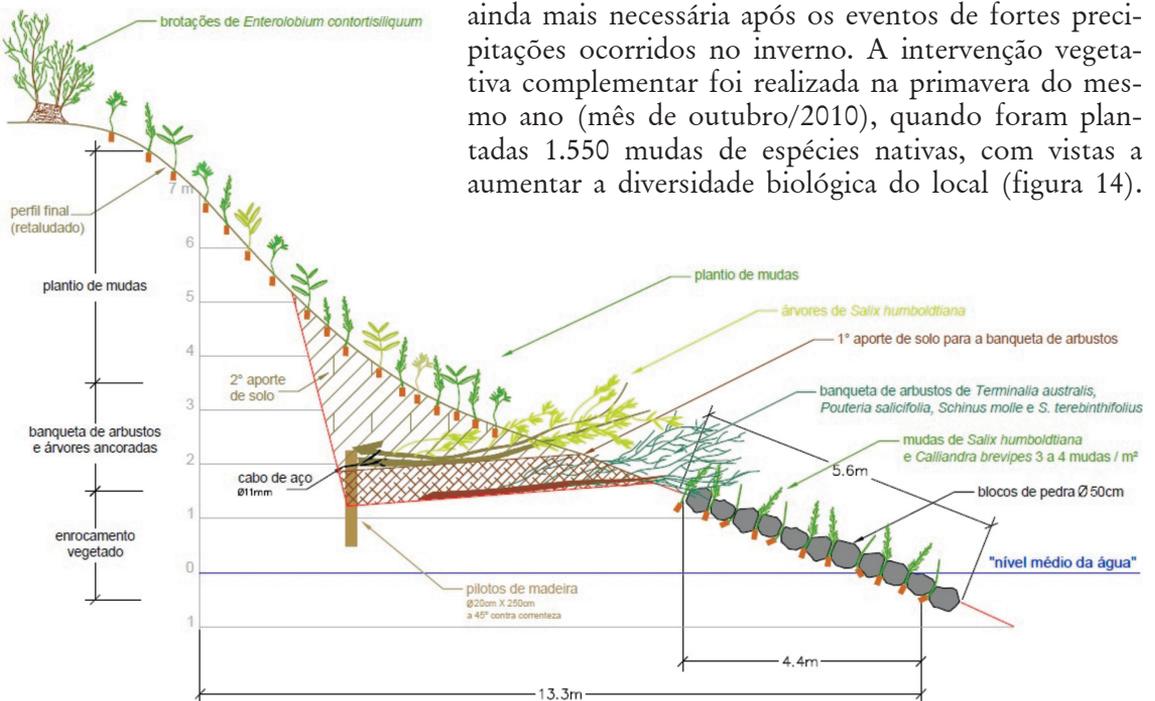


Figura 14: Vista em corte da segunda intervenção vegetativa.

Resultados

Esta obra de estabilização hidráulica no Rio Pardinho vem sendo monitorada com o objetivo de avaliar a estabilidade do talude, bem como a sobrevivência e desenvolvimento da vegetação no local.

Como previsto, a implantação no início da estação de inverno gerou a necessidade de uma medida vegetativa complementar, realizada na primavera do mesmo ano. Esta foi ainda mais necessária pelos eventos de enchentes que ocorreram durante o inverno daquele ano. Os mínimos prejuízos verificados evidenciaram que, apesar dos riscos, pode-se obter sucesso em intervenções implantadas no início do inverno, desde que planejadas para resistirem ao período de cheias, garantindo a manutenção da vegetação implantada.

Ainda no final do ano de 2010, já era visível o predomínio de áreas de depósito de sedimentos, na porção enrocada e entre a banqueteta de arbustos (figura 15), atestando a estabilidade do local dada pelo efeito de aumento da rugosidade hidráulica e consequente diminuição da velocidade da água e da tensão de erosão no local.



Figura 15: A, B) Depósito de sedimentos entre e sobre as rochas do enrocamento vegetado. C, D) Depósito de sedimentos entre os arbustos na banqueteta.

O material vegetal levado a campo em abril de 2010 iniciou sua brotação (como previsto) somente no final de

agosto do mesmo ano. As brotações foram atacadas por formigas cortadeiras, controladas imediatamente com aplicação de iscas formicidas. Após o controle, as espécies *Salix humboldtiana*, *Terminalia australis*, *Morus sp.*, *Schinus terebinthifolius* e *Phyllanthus sellowianus*, retomaram vigorosamente a brotação (figura 16). O mesmo ocorreu com as cepas de *Enterolobium contortisiliquum* e de todos os indivíduos das outras espécies reduzidas ao toco para terem sua porção aérea utilizadas na confecção da banqueta de arbustos. Mesmo espécies que não se desenvolveram da forma esperada na banqueta, como o sarandi-mata-olho (*Pouteria salicifolia*) e aroeira-mansa (*Schinus molle*) brotaram vigorosamente nas cepas originais.



Figura 16: Espécies com brotações no final do inverno. A) *Salix humboldtiana*. B) *Schinus terebinthifolius*. C) *Phyllanthus sellowianus*. D) *Terminalia australis*.

⁵ SUTILI, F. J.; CADONÁ, S. C. & HERPICH, M. A. *Estabilização Biotécnica no Rio Pardinho. Vegetação – 1ª avaliação*, Dez. 2010. Universidade Federal de Santa Maria, Frederico Westphalen, 2010.

⁶ STEPHAN, H. *A pull out test of Phyllanthus sellowianus and Sebastiania schottiana and development of soil engineering constructions in southern Brazil*. 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Natural). Universidade Rural de Viena, Viena, 2013.

Para melhor avaliar a sobrevivência e o desenvolvimento da vegetação, foram demarcadas parcelas ao longo do talude, totalizando 20% da área total. A avaliação foi realizada separadamente para cada estrutura da obra e também para a área total, no final do ano de 2010⁵ e repetida no ano de 2013⁶.

Enrocamento vegetado

Conforme a primeira avaliação no enrocamento vegetado, constatou-se que quatro espécies colonizavam o local:

Calliandra brevipes (56% dos indivíduos), *Salix humboldtiana* (43%), algumas plantas da espécie *Machaerium paraguariense* (0,5%) e de *Phyllanthus sellowianus* (0,5%) (figura 17A). Estas espécies, em conjunto, constituem uma densidade média de 2 mudas por metro quadrado de enrocamento. Com uma densidade inicial de 3 mudas por metro quadrado, em 8 meses, 34% das mudas foram perdidas. A perda ocorreu principalmente na porção mais próxima ao nível normal da água, devido à morte ocasionada por longos períodos de submersão ou pelo arranquio e arraste das mudas pela força da água.

Na segunda avaliação realizada no ano de 2013, foram registrados 1.631 indivíduos das espécies *Calliandra brevipes* (80% dos indivíduos), *Phyllanthus sellowianus* (10%), *Salix humboldtiana* (5%) e *Terminalia australis* (5%), como pode ser observado na figura 17B. A espécie *Machaerium paraguariense* não foi mais encontrada no local. Assim, após 2 anos da realização da obra, a densidade de mudas por metro quadrado passou de 3 para 3,6 mudas/m², apresentando um aumento de 16,5% no número de indivíduos no local.

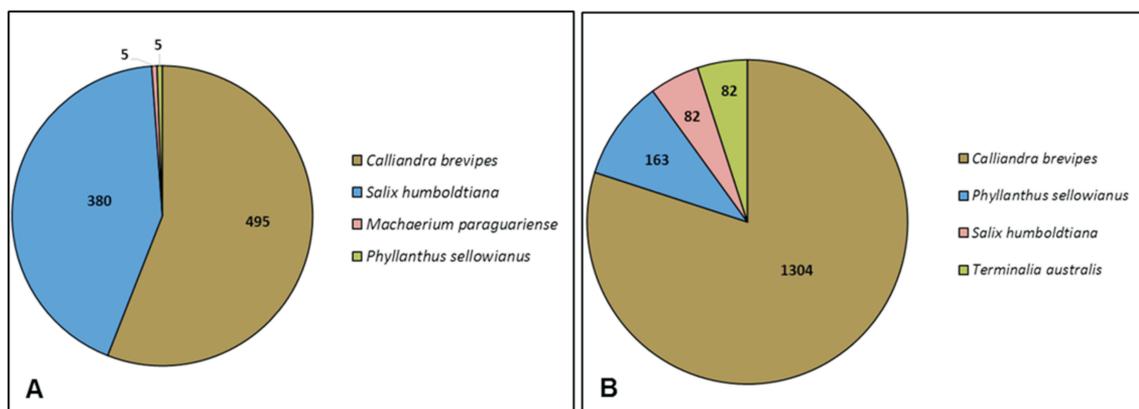


Figura 17: A) Número de indivíduos por espécie presentes no enrocamento vegetado no ano de 2010. B) Número de indivíduos por espécie presentes no enrocamento vegetado no ano de 2013.

Na parte inferior do enrocamento, mais próximo do nível médio da água, as espécies predominantes foram *Calliandra brevipes* e *Phyllanthus sellowianus*, além de alguns indivíduos de *Salix humboldtiana*, o que atesta uma resistência maior à ação hídrica destas espécies e sua aptidão de crescer junto à linha da água, em especial a espécie *P. sellowianus*. Na porção superior do enrocamento havia forte predominância da espécie *C. brevipes*.

Banqueta de arbustos e ancoragem de *Salix humboldtiana*

Na avaliação realizada no final de 2010, foi possível observar que as brotações provenientes da banqueteta de arbustos e dos salseiros ancorados concentraram-se na primeira metade da obra, sentido montante-jusante, e ao final desta. Conforme previsto, a brotação de salso (*Salix humboldtiana*) foi a mais presente (63,5%) e concentrou-se na porção central do trecho em tratamento. *Phyllanthus sellowianus* (14,7%) aparece na porção inicial no sentido montante-jusante, próximo à linha da água (devido ao plantio de alguns ramos e estacas neste local); *Schinus terebinthifolius* apresentou 12,7% dos indivíduos; *Morus* sp., 6,7%, provenientes de um único exemplar utilizado na banqueteta de arbustos; *Terminalia australis* representou 1,4% e *Schinus molle* 1,4% (figura 18A).

Essa distribuição desuniforme das brotações das diferentes espécies ocorre devido ao fato de cada porção da banqueteta de arbustos ter sido formada predominantemente por uma ou outra espécie, sendo que as faixas que apresentaram menor percentagem de brotação eram formadas especialmente pelas espécies *Schinus molle*, *Pouteria salicifolia* e *Schinus terebinthifolius*.

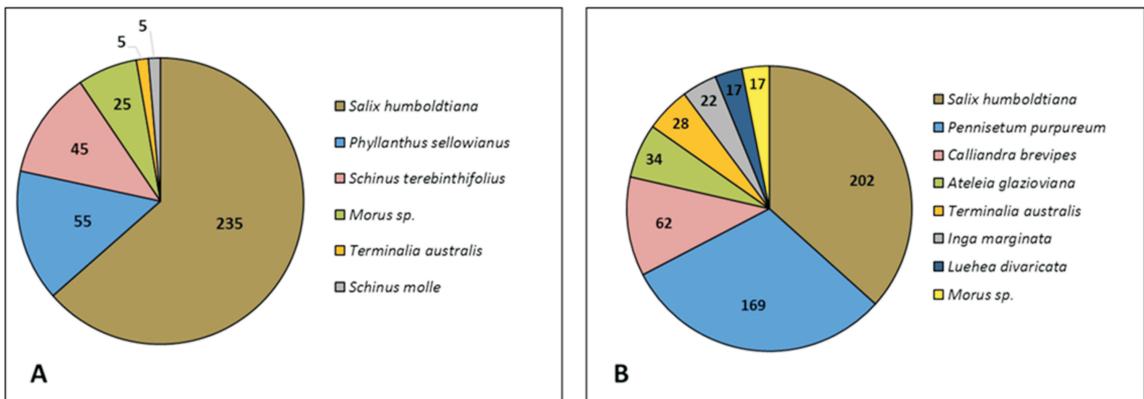


Figura 18: A) Número de indivíduos por espécie presentes na banqueteta de arbustos e salsos ancorados no ano de 2010. B) Número de indivíduos por espécie presentes na banqueteta de arbustos e salsos ancorados no ano de 2013.

O levantamento da vegetação após dois anos (2013) mostrou maior diversidade de espécies no local; no entanto, o número de indivíduos de *Salix humboldtiana* diminuiu para uma proporção de 37%, estes ainda concentrados na porção central do talude. A espécie *C. brevipes* correspon-

deu a 11,2% dos indivíduos encontrados no local, apresentando grande capacidade de disseminação na área. A vegetação espontânea, que surgiu ao longo do tempo em toda extensão do talude, era composta principalmente por espécies da família Poaceae, destacando-se *Pennisetum purpureum* com 31% dos indivíduos na área. Também foram encontradas as espécies *Ateleia glazioviana* (6,1%), *Terminalia australis* (5%), *Inga marginata* (4%), *Luebea divaricata* (2,8%) e *Morus nigra* (2,8%) (figura 18B). As espécies *P. sellowianus*, *S. molle* e *S. terebinthifolius*, por sua vez, não foram mais observadas no local.

Plantio de mudas

As mudas levadas a campo no início da primavera de 2010 tiveram mortalidade de apenas 2,6%, conforme levantamento realizado no final do mesmo ano. Neste levantamento foram contabilizadas 273 plantas na parte superior do talude. Esse número diminuiu para 127 plantas em 2013, representando uma mortalidade de 54,6% do total de indivíduos plantados.

Apesar da alta mortalidade das mudas, pode-se verificar uma boa taxa de cobertura do solo, de aproximadamente 41%, a qual se deve à presença da vegetação espontânea na porção superior do talude, principalmente da espécie *P. purpureum*. As espécies encontradas na porção superior do talude nos anos de 2010 e 2013, e suas respectivas quantidades, destacando-se as espécies que surgiram espontaneamente na área entre o primeiro e o segundo levantamento, podem ser visualizadas na tabela 1.

A distribuição das espécies encontradas por família botânica em todas as intervenções executadas no talude, no ano de 2013, estão representadas na figura 19. A grande ocorrência de *Calliandra brevipes* por todo o trecho faz da família Fabaceae a mais importante, seguida da família Salicaceae, à qual pertence a espécie *Salix humboldtiana*, e da família Phyllanthaceae, à qual pertence a espécie *Phyllanthus sellowianus*. Estas são, portanto, as espécies que melhor suportaram as condições adversas do local, como a força da correnteza, a submersão temporária e o aterramento parcial.

Como avaliação final da obra, apresenta-se a evolução do desenvolvimento da vegetação ao longo do tempo. A figura 20 apresenta a evolução temporal da obra e a figura 21 a mesma margem dois anos depois, estabilizada e com densa vegetação.

Tabela 1: Número de indivíduos por espécie na porção superior do talude (ver figura 14) nos anos 2010 e 2013. (em verde, espécies de colonização espontânea)

Família	Espécie	Nome comum	2010	2013
			Nº Ind.	Nº Ind.
Fabaceae	<i>Calliandra brevipes</i>	Caliandra-rosa	48	24
	<i>Ateleia glazioviana</i>	Timbó	30	19
	<i>Bauhinia forficata</i>	Pata-de-vaca	22	9
	<i>Machaerium paraguayense</i>	Farinha-seca	17	-
	<i>Inga marginata</i>	Ingá-feijão	11	12
	<i>Enterolobium contortisiliquum</i>	Timbaúva	-	1
	<i>Lonchocarpus muehlbergianus</i>	Rabo-de-bugio	-	3
	<i>Inga sessilis</i>	Ingá-macaco	4	-
	<i>Parapiptadenia rigida</i>	Angico	4	4
Salicaceae	<i>Salix humboldtiana</i>	Salso	12	2
	<i>Banara parviflora</i>	Olho-de-pomba	3	-
Phyllanthaceae	<i>Phyllanthus sellowianus</i>	Sarandi-branco	4	-
Anacardiaceae	<i>Schinus terebinthifolius</i>	Aroeira-vermelha	8	4
	<i>Schinus molle</i>	Aroeira-salsa	3	3
Asteraceae	<i>Baccharis dracunculifolia</i>	Vassoura	-	8
Myrtaceae	<i>Eugenia myrcianthes</i>	Pessegueiro-do-mato	14	7
	<i>Acca sellowiana</i>	Gioaba-serrana	11	2
	<i>Myrcianthes pungens</i>	Guabiju	8	-
	<i>Psidium cattleianum</i>	Aracá	7	3
	<i>Eugenia involucrata</i>	Cerejeira	5	-
	<i>Eugenia uniflora</i>	Pitangueira	4	1
	<i>Eugenia rostrifolia</i>	Batinga	3	-
	<i>Calyptanthus grandifolia</i>	Guamirim	1	1
Sapindaceae	<i>Cupania vernalis</i>	Camboatá-vermelho	13	5
	<i>Allophylus edulis</i>	Chal-chal	12	3
	<i>Matayba elaeagnoides</i>	Camboatá-branco	3	-
Rosaceae	<i>Prunus myrtifolia</i>	Pessegueiro-do-mato	-	8
Tiliaceae	<i>Luebea divaricata</i>	Açoita-cavalo	5	4
Combretaceae	<i>Terminalia australis</i>	Amarilho	-	1
Erythroxylaceae	<i>Erythroxylum argentinum</i>	Cocão	4	1
Lauraceae	<i>Nectandra megapotamica</i>	Canela-preta	-	1
	<i>Aiouea saligna</i>	Canela-sebo	2	-
Aquifoliaceae	<i>Ilex paraguayensis</i>	Erva-mate	-	1
Bromeliaceae	<i>Bromelia balansae</i>	Caraguatá	-	1
Zingiberaceae	<i>Hedychium coronarium</i>	Cardamon	-	1
Meliaceae	<i>Trichilia clausenii</i>	Catiguá-vermelho	4	-
	<i>Trichilia elegans</i>	Catiguá-vermelho	2	-
Lythraceae	<i>Lafoensia pacari</i>	Dedaleiro	3	-
Melastomataceae	<i>Tibouchina mutabilis</i>	Manacá	3	-
Anonaceae	<i>Annona cacans</i>	Araticum	2	-
Boraginaceae	<i>Cordia ecalyculata</i>	Guaçatumba	1	-
Poaceae	<i>Pennisetum purpureum</i>	Capim-elefante	-	130
Total geral			273	259

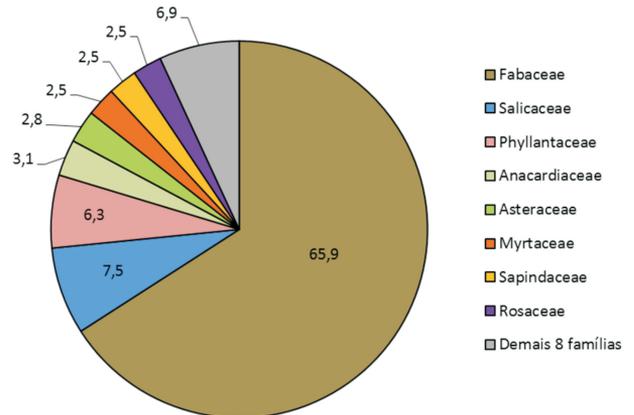


Figura 19: Distribuição por família botânica das espécies encontradas em todas as intervenções executadas no talude, na segunda avaliação no ano de 2013.

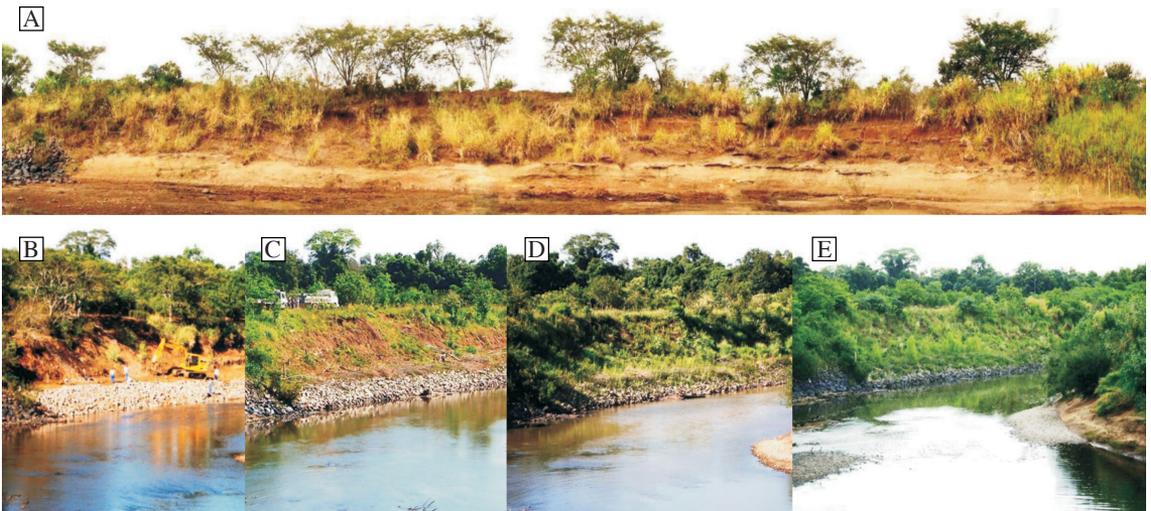


Figura 20: Evolução da obra de Engenharia Natural ao longo do tempo. A) Vista do talude fluvial a ser estabilizado (verão/2010). B) Execução da obra (abril/2010). C) Vista do talude fluvial após a execução da obra e eventos de fortes precipitações (inverno/2010). D) Vista do talude fluvial na primeira avaliação (final de 2010). E) Vista do talude fluvial na segunda avaliação (início de 2013).

Considerações finais

A Engenharia Natural afirma-se como importante ferramenta técnica para a estabilização e contenção de processos erosivos em ambiente fluvial. A correta aplicação das técnicas construtivas voltadas às características locais do problema garante um controle eficiente das forças ambientais instabilizantes e permite o restabelecimento da vegetação nativa, trazendo inúmeros benefícios aos ambientes onde são implantadas.



Figura 21: Vista do talude fluvial dois anos após a execução da intervenção, estabilizado e com presença de densa vegetação.

Paula Letícia Wolff Kettenhuber é graduada em Engenharia Florestal, mestre em Engenharia Florestal e doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal da Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul.

paulakettenhuber@gmail.com

Júnior Joel Dewes é graduado em Engenharia Florestal e mestrando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal da Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul.

juniordewes2011@gmail.com

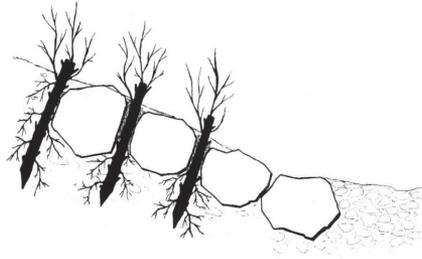
Fabrcio Jaques Sutili é graduado em Engenharia Florestal, doutor em Engenharia Natural pela Universidade Rural de Viena e professor do Departamento de Ciências Florestais da Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul.

fjsutili@gmail.com

O enrocamento vegetado proporcionou a estabilização da base do talude, com aumento da rugosidade hidráulica na margem do rio e conseqüente diminuição da velocidade e força da água sobre o mesmo, além de abrigar e promover o desenvolvimento da vegetação junto à linha da água. A utilização de plantas, principalmente nesta técnica, possui a vantagem de aumentar ainda mais a estabilidade das estruturas inertes (em pedra) dimensionadas.

Da mesma forma, as estruturas projetadas para a porção superior do talude se mostraram eficientes pelo fato de promoverem o restabelecimento e o desenvolvimento da vegetação nativa, refletindo-se em aumento da diversidade florística e faunística. Tais transformações proporcionaram rápida cobertura do solo e, em conseqüência, diminuição dos processos erosivos superficiais.

Os projetos realizados com base nos princípios da Engenharia Natural visam trazer tanto ganhos técnicos por meio da combinação de estruturas vivas e inertes, quanto benefícios estético-paisagísticos, através do rápido crescimento da vegetação e da inserção da obra na fisionomia paisagística local. Além disso, tais intervenções são compreendidas como um sistema construtivo vivo, sendo esperado que a eficiência da obra aumente com o passar do tempo.



ENGENHARIA NATURAL
PARA ESTABILIZAÇÃO HIDRÁULICA
DE TRAVESSIA DUTOVIÁRIA
NO ESPÍRITO SANTO
CASO 1

Rita dos Santos Sousa
Charles Rodrigo Belmonte Maffra
Fabrcio Jaques Sutili

Soluções de Engenharia Natural constituem alternativa técnica apropriada para manter a proteção e a estabilidade de faixas dutoviárias, além de melhorarem as condições ambientais e ecológicas locais. O projeto elaborado pelo Laboratório de Engenharia Natural (Universidade Federal de Santa Maria) e descrito nesse artigo, apresenta a execução e a evolução temporal de uma obra de Engenharia Natural em travessia de dutos no município de Cariacica, Espírito Santo. Exposição de duto e perda de estabilidade de leito e das margens foram os problemas tratados na travessia. A solução adotada consistiu de duas medidas: a estabilização hidráulica por meio de readequações no eixo, leito e margens, e o aumento da rugosidade hidráulica proporcionado principalmente pelo efeito técnico da vegetação implantada. Após um ano de implementação dessas medidas, além da efetiva proteção do duto, os resultados mais evidentes foram a redução da competência do fluxo, a perenização do canal e a deposição de sedimentos e também de propágulos da vegetação de regiões de montante.

1 Introdução

O objetivo deste trabalho é apresentar, por meio de um estudo de caso, os mais recentes avanços da Engenharia Natural no Brasil, no que diz respeito ao desenvolvimento de projetos e execução de obras. O estudo específico trata de uma obra executada por uma empresa de transporte de petróleo e gás, cujo gasoduto atravessa um córrego de montanha em travessia submersa, local que constitui faixa de servidão de transporte dutoviário de gás no estado do Espírito Santo, região sudeste do Brasil.

Travessias são pontos onde os dutos cruzam rios, lagos, açudes, canais e áreas permanentemente ou eventualmente alagadas ou por onde a passagem do duto é necessariamente aérea.¹ Esses locais, condicionados pela dinâmica fluvial e frequentemente modificados pela instabilidade de leitos e taludes, constituem situações de risco à integridade dos dutos e, eventualmente, dos cabos de fibra óptica que compartilham as mesmas faixas. O projeto para estabilização hidráulica e recuperação da área foi elaborado no ano de 2012 pelo Laboratório de Engenharia Natural da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), e a execução de obra decorreu em novembro de 2013.

A área de estudo localiza-se nas coordenadas 20°18' 13,50" Sul e 40°27' 7,80" Oeste, a altitude aproximadamente de 110 metros, no município de Cariacica, Espírito Santo (figura 1).

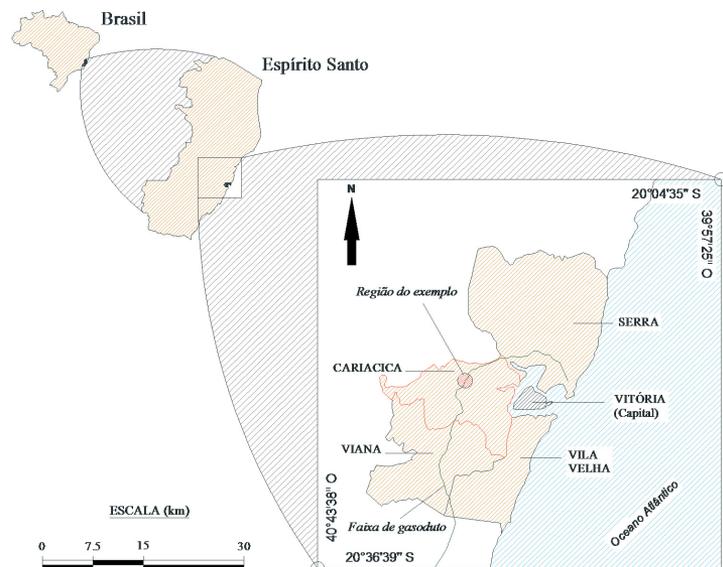


Figura 1: Localização da área de intervenção. Fonte: Adaptado de TRANSPETRO²

¹ NORMAS TÉCNICAS PETROBRAS. N 2726: Terminologia de dutos. Rio de Janeiro, 2012.

² PETROBRAS TRANSPORTES S. A. (TRANSPETRO). Disponível em: <http://www.transpetro.com.br>. Acesso em 15 de dezembro de 2012.

2 Caracterização do problema

2.1 Descrição do problema

O problema consiste na exposição do trecho de um duto de transporte de gás (figura 3) devido à erosão do leito e das margens em um córrego de montanha. A exposição do gasoduto ocorreu na segunda semana do mês de janeiro de 2012, após um período de chuvas intensas, como pode ser observado no hietograma da figura 2 para a estação pluviométrica mais próxima ao local de ocorrência. Registrou-se uma precipitação acumulada de 260mm na semana entre os dias 3 e 10 de janeiro, e um pico de 100mm acumulado para o dia 6 de janeiro.

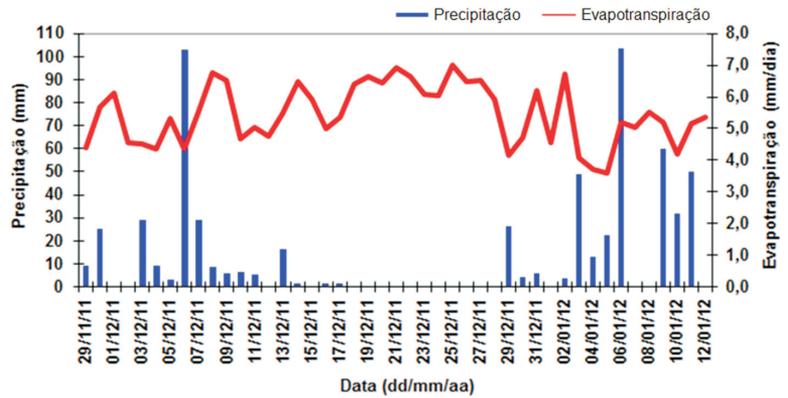


Figura 2: Hietograma para a estação pluviométrica de Viana para o período de 29/11/11 a 12/01/12. (Fonte: Incaper³)

³ INSTITUTO CAPIXABA DE PESQUISA, ASSISTÊNCIA TÉCNICA E EXTENSÃO RURAL (INCAPER). Disponível em: <http://www.incaper.es.gov.br>. Acesso em 2012.

A estabilidade do fluxo do curso de água foi afetada diretamente por fatores hidrológicos e locais. No caso dos fatores hidrológicos, destaca-se o regime torrencial provocado principalmente pelas condições climáticas tropicais com verões chuvosos e pelas características físicas da bacia hidrográfica. Os eventos pluviométricos mais intensos do verão associados às características montanhosas da bacia hidrográfica induzem fluxos torrenciais cuja instabilidade pode levar à erosão das margens e do fundo do leito. Entre os fatores locais, merecem referência as obstruções do talvegue provocadas pela queda de blocos das vertentes do vale. Esse material causa instabilidade no eixo da torrente, que, por estrangulamento, pode sofrer alterações, levando à ocorrência de problemas de corrosão e desconfinamento de margens (figura 4).



Figura 3: Aspectos do canal junto ao duto. As imagens A e B mostram um canal alterado pela energia do fluxo da água. Leito e margens escavados, fragmentos de rochas de grandes dimensões arrastados e margens com inclinações acentuadas. A estabilidade da faixa foi prejudicada e a segurança do duto, exposto juntamente com a fibra óptica, poderia ser comprometida se o processo persistisse.



Figura 4: Aspectos do canal a jusante do duto. As imagens A e B mostram um canal relativamente estreito e bem demarcado, taludes com inclinação acentuada e rochas de grandes dimensões. Essas características são típicas em torrentes de montanha.

O eixo da torrente normalmente ocorria entre as rochas 6 e 8, sendo que, logo após as precipitações que expuseram o duto, este eixo passou a desenvolver-se entre as rochas 8 e 9 atingindo diretamente o duto (figura 5).

2.2 Caracterização da área, bacia hidrográfica e curso de água

A área está localizada em região com relevo bastante acidentado, caracterizada geotecnicamente pela presença de tálus e blocos de rocha de granulometria extremamente

irregular provenientes da queda dos maciços rochosos das vertentes ou transportados pelo curso de água responsável pela drenagem da bacia. O curso de água apresenta variação elevada da vazão em função da rápida resposta às chuvas intensas. Em períodos de estiagem, a vazão perene se reduz a níveis que podem ser desprezados no dimensionamento hidráulico do problema. Desse modo, quanto à continuidade do fluxo, o rio é classificado como perene. Tais características configuram um comportamento torrencial de montanha (figura 4). Ao longo do curso de água, a presença de mata ciliar é descontínua, havendo trechos em que a vegetação nativa cede espaço a plantações de bananeiras e pastagens. No trecho em questão, o curso de água encontra a faixa de dutos, coberta por gramíneas e leguminosas herbáceas.

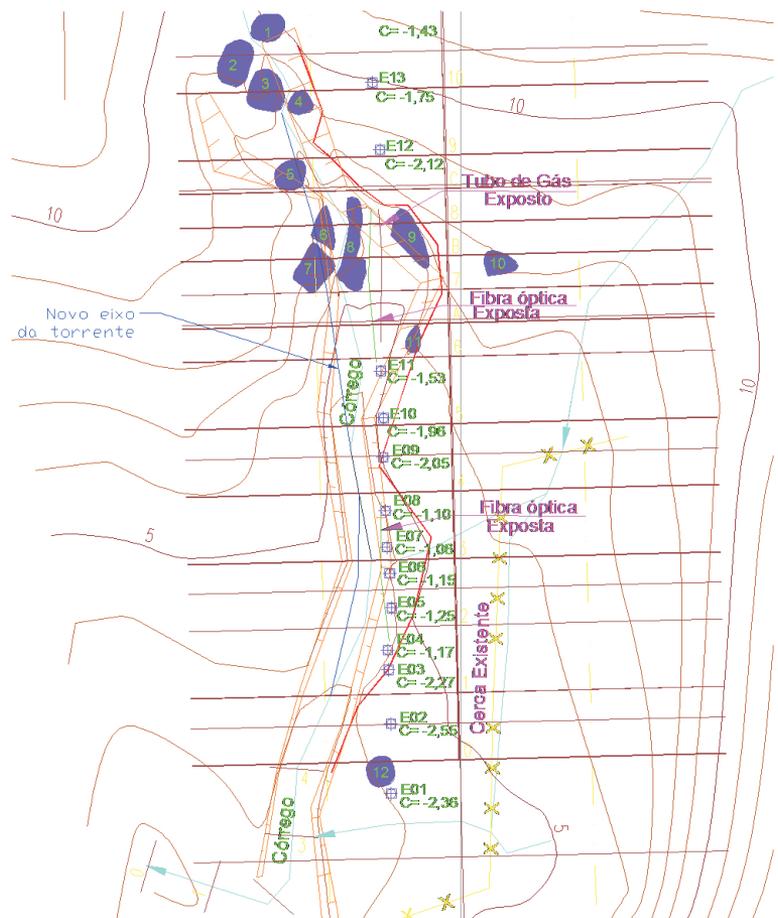


Figura 5: Levantamento topográfico do local de intervenção, com localização das respectivas seções e das rochas.



⁴ GOOGLE. *Google Earth*. (Roça Velha/Espírito Santo). Acesso em 2012.

Figura 6: Bacia hidrográfica do ponto de ocorrência. (Fonte: Google⁴)

A bacia hidrográfica, delimitada pelo local de exposição do duto, admitido como seção de controle, apresenta uma área (A) pequena igual a $0,460\text{km}^2$, um talvegue (L) curto de 900m e uma inclinação média de comportamento acentuado igual a $17,4\%$. A bacia possui um índice de circularidade alto ($0,65$), caracterizando uma unidade com forma arredondada. As suas características físicas podem ser vistas na imagem de satélite da figura 6 e no perfil longitudinal do talvegue da figura 7.

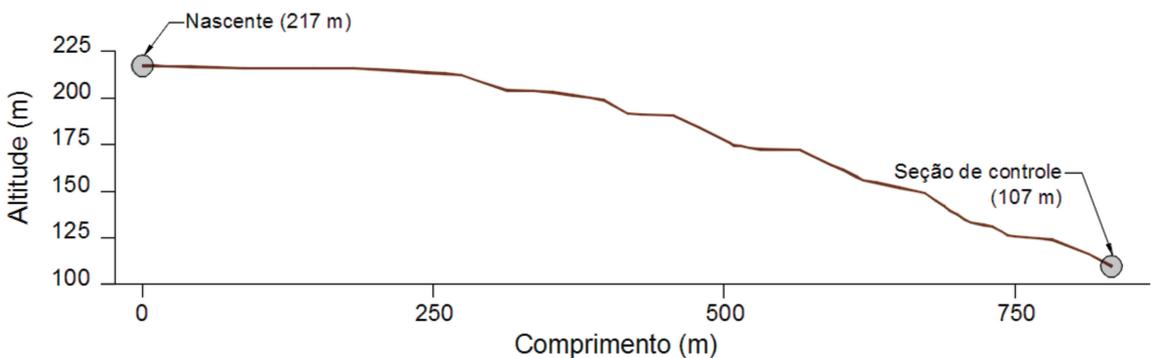


Figura 7: Perfil longitudinal do curso de água, da nascente até a seção estudada.

O fator de forma e a densidade de drenagem, associados ao formato arredondado da bacia, indicam uma área excepcionalmente bem drenada, com tempo de concentração pequeno, podendo apresentar grandes picos de cheias em

resposta a eventos pluviométricos mais intensos. O tempo de concentração, adotado como tempo de duração para determinação da chuva de projeto, pode ser estimado de acordo com o método Califórnia Culvert Practice⁵:

⁵ RUSSO Jr., W. *Hidrologia aplicada e projeto de drenagem para faixas de dutos*. Rio de Janeiro, 2011.

$$t = 57 \left(\frac{L^3}{\Delta h} \right)^{0,385} = 57 \left(\frac{0,9^3}{110} \right)^{0,385} = 8 \text{ min} \quad \text{Equação 1}$$

Onde: Δh é o desnível do talvegue em metros.

Como se observa no resultado da equação 1, a resposta da bacia a um evento pluviométrico é bastante rápida, adotando-se, portanto, nos cálculos da chuva de projeto, uma duração igual a 8 minutos.

A vegetação na área da bacia se caracteriza por zonas de mata e algumas áreas de plantação de bananeiras e pastagens. Com base nessas características, o coeficiente de deflúvio adotado para o cálculo da chuva efetiva será igual a 0,4.⁶

⁶ DNIT – IPR-724 – *Manual de Drenagem de Rodovias*. Brasília, 2006.

A fórmula de Manning é um desenvolvimento empírico para determinação do coeficiente de rugosidade da equação de escoamento analítica de Chézy, e pode ser escrita como:

$$Q = vA_m = \frac{1}{n} I^{\frac{1}{2}} R_h^{\frac{2}{3}} A_m \quad \text{Equação 2}$$

Onde: v é a velocidade do escoamento, A_m é a área molhada da seção transversal, n é o coeficiente de rugosidade de Manning, I é a inclinação do fundo do leito e R_h é o raio hidráulico da seção transversal, calculado como:

$$R_h = \frac{A_m}{P_m} \quad \text{Equação 3}$$

Onde: P_m é o perímetro molhado da seção transversal.

A verificação hidráulica utiliza o princípio de canais siameses, uma vez que, durante a vazão de projeto, o canal natural pode extravasar em certas seções e o escoamento se comporta como um fluxo em canais de diferentes características.

Com base nas características da bacia hidrográfica e do curso de água, pode-se estimar a vazão utilizando-se o método racional (válido para $A < 5 \text{ Km}^2$) matematicamente expresso por:

$$Q = ciA \quad \text{Equação 4}$$

Onde: Q é a vazão, c o coeficiente de deflúvio, i a intensidade da chuva de projeto e A é a área da bacia.

A intensidade de chuva em mm/h pode ser estimada com a curva IDF da região⁷:

$$i = \frac{4003,611T^{0,203}}{(t + 49,997)^{0,931}} \quad \text{Equação 5}$$

Onde: t é o tempo de concentração e T o período de retorno da chuva para a qual se calcula a intensidade.

A vazão de projeto foi determinada utilizando-se as equações apresentadas para uma chuva com período de retorno de 25 anos, resultando numa vazão de projeto igual a Q=10,1 m³/s. As características das seções foram obtidas por meio de levantamento topográfico na área de interesse, com seções distribuídas a cada 5m ao longo do eixo do curso de água. O coeficiente de Manning adotado (igual a 0,05⁸) é típico para os casos de arroios e rios com bancos e poços pouco profundos, presença de blocos de rochas e margens em más condições; para o caso de margens vegetadas, foi utilizado o valor 0,10 equivalente a vegetação herbácea e gramínea. O coeficiente de Manning equivalente foi calculado assumindo-se que a força total de resistência ao escoamento, originada pelo efeito de cisalhamento junto ao perímetro Pm, é igual à soma de todas as forças de resistência em cada subárea de perímetro Pmi; desse modo, a rugosidade equivalente é dada por:

$$n_e = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_{mi} n_i^2)}{P}} \quad \text{Equação 6}$$

Também foram estimadas as condições de transporte do fluxo, por meio do cálculo das dimensões máximas do material transportado durante uma cheia com a vazão de projeto no caso das características atuais do curso de água. Para esse fim, utilizou-se a seguinte equação:⁹

$$b = \frac{v^2 \mu \gamma}{2gf(\gamma_1 - \gamma) \cos \alpha} \quad \text{Equação 7}$$

Onde: b – dimensão dos blocos transportados no sentido do fluxo; v – velocidade do fluxo de água; μ – fator de forma – 1,46; g – aceleração da gravidade (m/s²); f – coeficiente de atrito entre o sólido e o leito – 0,76; γ – peso específico da água – 10 kN/m³; γ₁ – peso específico da rocha – 26,75 kN/m³; α – ângulo de inclinação do terreno.

⁷ SILVA, D. D.; PINTO, F. R. L. P.; PRUSKI, F. F. & PINTO, F. A. Estimativa e espacialização dos parâmetros da equação de intensidade-duração-frequência da precipitação para os Estados do Rio de Janeiro e Espírito Santo. *Revista de Engenharia Agrícola*, v. 18, p. 11-21, 1999.

⁸ PORTO, R. M. *Hidráulica básica*. 4^a ed., São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, USP, 2004. 519 p.

⁹ DURLO, M. & SUTILI, F. J. *Bioengenharia: Manejo Biotécnico de cursos de água*. Porto Alegre: EST, 2005.

Os resultados obtidos revelam altas velocidades de escoamento ($v_{\text{média}} = 4,10 \text{ m/s}$), em função principalmente de uma inclinação elevada e também de valores altos de raios hidráulicos. O curso de água apresenta competência para deslocar uma rocha de 0,99m (valor médio). De acordo com Porto¹⁰, a velocidade média no fundo e margens para se evitar a erosão do material das paredes e do fundo, deve ser inferior a 1,83m/s, no caso de material cascalhado.

O escoamento pode ser classificado quanto à rugosidade, em função dos parâmetros geométricos e de velocidade do escoamento. O número de Reynolds da rugosidade é um parâmetro pelo qual se verifica a confiabilidade da aplicação da equação de Manning ao problema, e calculado pela seguinte expressão:

$$Re_r = \left(\frac{n}{0,039} \right)^6 \frac{v_a}{10^{-3}} \quad \text{Equação 8}$$

Onde: v_a é a velocidade de atrito dada por:

$$v_a = \sqrt{gR_h I} \quad \text{Equação 9}$$

Através do valor obtido, o escoamento é rugoso, sendo válida a equação de Manning, quando $Re_r > 70$. O escoamento também pode ser classificado em relação à velocidade crítica. Quando a velocidade de escoamento for maior que a crítica, é classificado como rápido, torrencial ou supercrítico; quando menor, é chamado fluvial, lento ou subcrítico. Essa verificação pode ser feita indiretamente por meio do Número de Froude, dado pela expressão:

$$Fr = \frac{v}{v_{cr}} = \frac{v}{\sqrt{gy}} \quad \text{Equação 10}$$

Onde: v_{cr} é a velocidade crítica e y é a altura da lâmina de água.

O escoamento é torrencial quando $Fr > 1$ e fluvial quando $Fr < 1$. Os resultados mostram que o escoamento atende à condição de rugosidade para todas as seções, e é torrencial em todas, sendo menor na seção 6, onde o número de Froude é ligeiramente superior a 1; isso se deve ao ressalto e ao poço formado pela erosão logo a montante desse trecho. Deste modo, todas as seções têm velocidade de escoamento, para a vazão de projeto, maiores que a velocidade crítica, indicando que o fluxo tem grande quantidade de energia cinética, podendo deslocar materiais sólidos de grandes proporções e também de alto poder erosivo. Por

¹⁰ PORTO, R. M. *Hidráulica básica. Op. cit.*

esse fato, a descarga durante as cheias tende a se transformar em energia cinética através do aumento da velocidade.

3 Soluções construtivas

São apresentadas, a seguir, as tipologias construtivas adotadas para solucionar o problema existente no local, bem como as condições hidráulicas para o novo perfil do curso de água.

3.1 Medidas de tratamento

A seleção das medidas de tratamento baseou-se no estudo do comportamento dinâmico dos processos erosivos, nas características da torrente, nos critérios de integridade do duto e da faixa e na sua posição em relação à bacia hidrográfica. Foram consideradas as alterações no regime fluvial a montante e a jusante do trecho de intervenção. Diante dessas questões, optou-se por uma solução que empregasse métodos e conceitos da Engenharia Natural. Essa abordagem utiliza-se de materiais construtivos vivos (plantas), selecionados de tal modo que possuam características morfológicas e mecânicas capazes de se traduzir em efeitos técnicos responsáveis pela eliminação ou pela redução dos resultados adversos provenientes dos processos erosivos deflagrados nas margens e leito do curso de água. Desse modo, as plantas com potencial biotécnico prestam-se como material construtivo vivo, no sentido de que atuam tanto nas causas dos processos como também, de modo sintomático, na redução da susceptibilidade aos seus efeitos.

Para estabilização do eixo da torrente em geral, recomendaram-se estruturas de controle de fluxo, que atuam diretamente nos parâmetros de velocidade, direção e profundidade da lâmina de água.

Para o controle do alargamento provocado pela erosão das margens, recomendou-se a utilização de obras longitudinais ao curso de água. Foi adotada a técnica de enrocamento vegetado no trecho entre as estacas 3 e 8, em ambas as margens, bem como na margem esquerda, entre as estacas 9 e 11, para proteção dos locais onde os cabos ópticos foram expostos (figura 8).

Para o controle da erosão de fundo, recomendaram-se obras transversais ao fluxo de água, reduzindo ou controlando o perfil de escoamento, por meio da redução de sua inclinação. Nesse sentido, foi executada a escavação de dois ressaltos, o primeiro de 1,75m de altura, localizado entre as estacas 3 e 4 (figura 9), e o segundo de 1,0m entre as

estacas 5 e 6 (figura 10). No final do trecho de intervenção, foi colocada uma barragem de 0,75m de altura localizada na estaca 8. Como medida de proteção a essas estruturas foram colocadas soleiras a jusante das mesmas (figura 11). Tais medidas visaram a redução da inclinação longitudinal para valores máximos iguais a 2%, de modo que as velocidades de escoamento sejam inferiores aos valores recomendados para o material local.

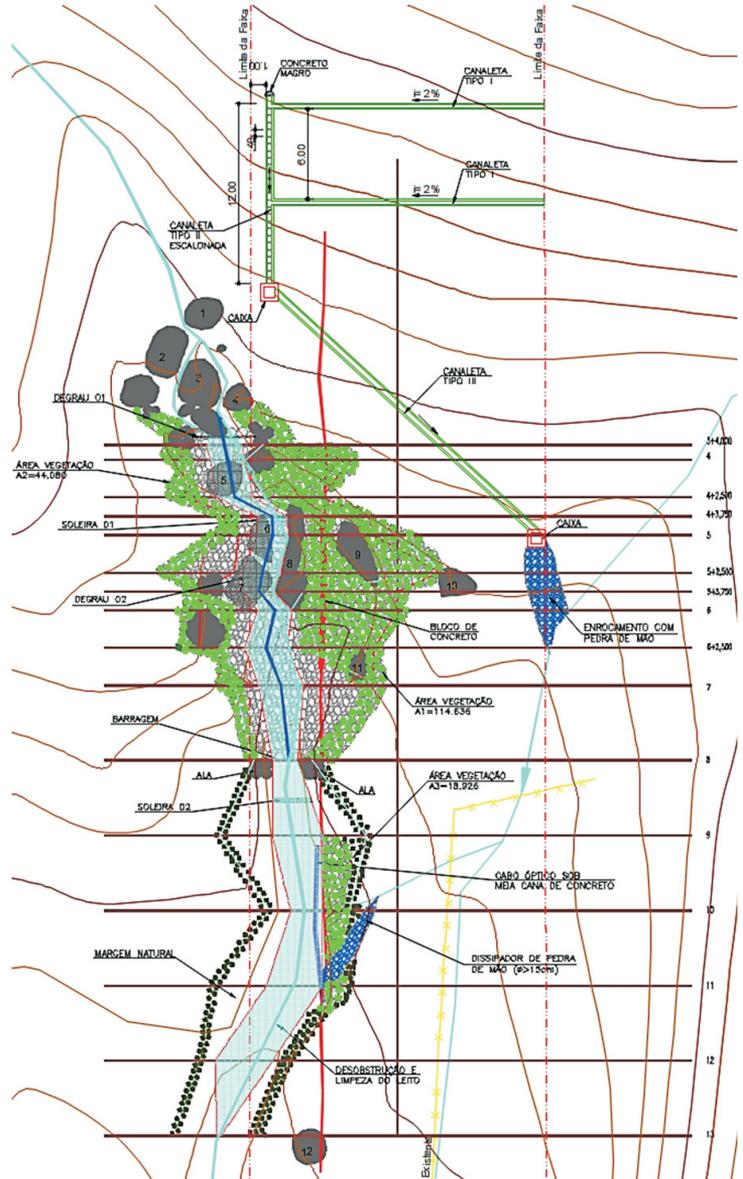


Figura 8: Levantamento topográfico com localização das rochas e intervenções executadas.

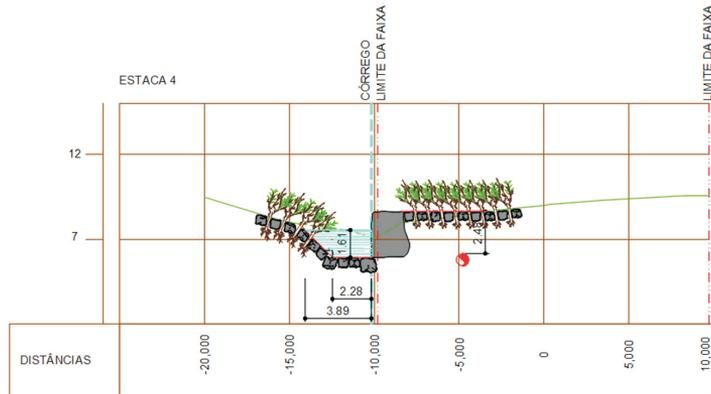


Figura 9: Exemplo de uma seção transversal localizada na estaca 4.

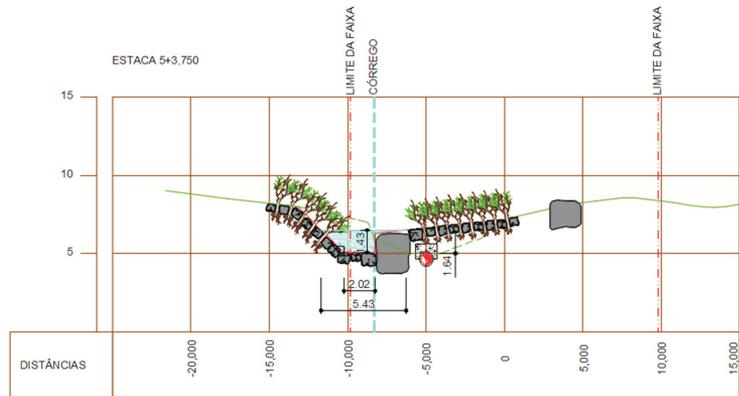


Figura 10: Exemplo de uma seção transversal localizada na estaca 5+3,750.

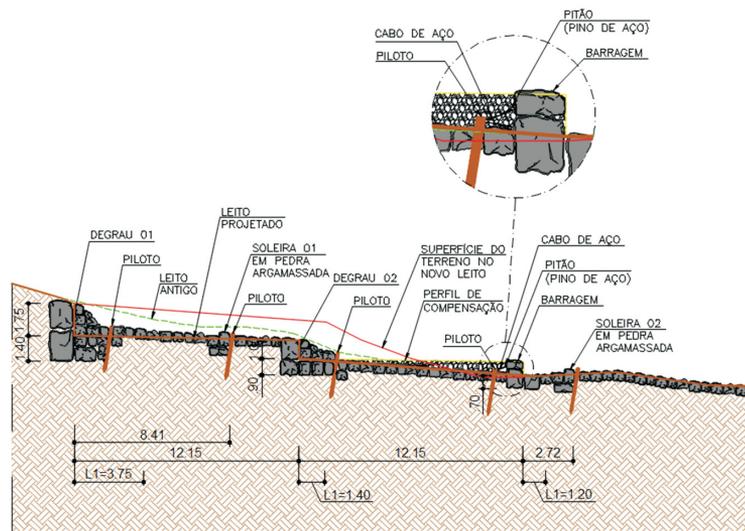


Figura 11: Aspectos executivos da construção do novo eixo do curso de água.

Em função da proximidade entre os eixos do duto e da torrente, foi necessário o desvio do eixo da torrente num trecho de aproximadamente 25m de extensão. Como resultado, o duto estará sob uma das margens do curso de água, protegido pelo enrocamento vegetado. A diretriz do novo perfil do curso de água passa por um local onde se encontravam três blocos de rochas (números 5, 6 e 7) que foram desmontados (figura 8). O material do desmonte foi utilizado na execução do enrocamento.

A estabilidade hidráulica do novo perfil do curso de água pode ser verificada aplicando-se os mesmos cálculos empregados no capítulo anterior, agora com as novas seções do perfil e novos coeficientes de rugosidade do material, desconsiderando-se, no entanto, o efeito da vegetação no enrocamento, ou seja, o coeficiente de rugosidade de Manning igual a 0,060. A inclinação das paredes transversais no novo trecho do canal foram dimensionadas levando-se em conta os valores limites recomendados por Porto¹¹ para o material das margens: até 60° para enrocamento e 90° no caso de paredes escavadas em blocos rochosos. Foram desprezados os efeitos das raízes nos blocos rochosos.

Observou-se uma redução nos valores de velocidade do escoamento e um consequente aumento na cota de inundação. Como resultado, o diâmetro do material sólido transportado foi reduzido; com isso, o enrocamento foi dimensionado com matacões com dimensões maiores ou iguais a 0,26m.

A comparação das características hidráulicas entre o novo perfil e o antigo pode ser obtida por meio de seus valores médios, listados resumidamente na tabela 1. Eles revelam grandes reduções nos valores de inclinação, de velocidade e de dimensão do material transportado. Houve pequeno aumento nas cotas de inundação e aumento moderado no raio hidráulico, em função da inundação da seção. A inundação pode ser permitida neste caso, uma vez que é efêmera devido à declividade natural do terreno. Além disso, não há benfeitorias dentro do raio previsto de inundação.

As condições de escoamento para o novo regime foram calculadas e mostraram que todas as seções têm regime de escoamento rugoso e fluvial, ou seja, o excesso de vazão durante as cheias causará aumento de energia de pressão hidrostática pelo aumento da lâmina de água e não o aumento da energia cinética pela aceleração do fluxo.

Por fim, deve-se garantir a estabilidade das obras transversais, admitindo-se que a erosão de fundo não deva escavar além da base dessas fundações.

¹¹ PORTO, R. M. *Hidráulica básica*. Op. cit.

Tabela 1: Comparação das condições hidráulicas médias para o perfil antigo e novo.

Parâmetros	Perfil antigo	Perfil novo	Variação(%)
Inclinação	0,16	0,02	-87,85
Raio Hidráulico (m)	0,40	0,73	82,50
Velocidade (m/s)	4,10	1,77	-56,83
Rocha deslocada (m)	0,99	0,18	-81,82
Nível de inundação (m)	5,21	6,16	18,23

As estruturas tiveram sua estabilidade verificada e foram apoiadas em pilotos de madeira (ou metal) e pinos metálicos de encaixe. No trecho não tratado, o leito foi limpo, com as rochas retiradas sendo apoiadas nas margens para melhoria das condições de escoamento.

3.2 Descrição das intervenções e técnicas executadas

3.2.1 Desmonte de rochas

Em decorrência da necessidade da mudança do eixo da torrente, uma quantidade aproximada de três blocos de rochas com um volume final de 50m³ foi desmontado. O material do desmonte produziu matacões um pouco maiores que 0,26m, em função das novas condições de transporte hidráulico estabelecidas para a obra, a fim de se produzir material suficiente para utilização na área projetada com enrocamento vegetado.

O processo foi executado a frio com argamassa expansiva para desmonte dos blocos de rochas na diretriz do novo eixo. As fotografias do desmonte de rocha e produção do enrocamento para reformulação das margens e eixo da torrente estão representadas na figura 13.

3.2.2 Proteção mecânica do gasoduto e cabos ópticos

Em função da necessidade do desmonte de blocos de rochas para modificação do leito do curso de água, procedeu-se à proteção mecânica do duto quanto a possíveis quedas de blocos sobre o mesmo, bem como das cargas estáticas durante a conformação da nova margem sobre o duto. Com esse propósito, foi projetado um bloco de concreto armado envolvendo o duto conforme projeto específico. A fim de não funcionar como uma estrutura de contenção, transferindo esforços de possíveis movimentos de tálus para a tubulação, o bloco de concreto teve sua rigidez diminuída por ser dimensionado em seções de comprimento médio de 2m e juntas de dilatação entre as mesmas.

Além disso, as alturas foram decrescidas à medida que a inclinação do duto foi reduzindo a porção exposta de sua seção transversal. Os cabos ópticos expostos no mesmo trecho foram concretados junto ao duto, utilizando-se uma proteção de EPS para o caso de eventuais deformações excessivas provocadas durante a concretagem dos blocos.

No trecho onde somente o cabo óptico se encontrava exposto, os mesmos foram reenterrados sob a proteção de uma meia-cana de 20cm de diâmetro de concreto.

3.2.3 Enrocamento vegetado

Foram enrocados 300m² de área (250m² vegetados e 50m² não vegetados). Considerando a dimensão mínima das rochas do cálculo hidráulico igual a 0,26m, foram empregados 62,5m³ de rochas no enrocamento. Utilizou-se uma densidade de 6 plantas por metro quadrado de enrocamento, resultando em um total de 1.500 mudas. A alta densidade de plantas busca uma colonização vegetal rápida do ambiente em tratamento e considera a possível mortalidade de parte delas. A reposição da vegetação foi considerada somente para as áreas onde a mortalidade ultrapassar os 50%, após 6 meses a partir da data de plantio.

A alta densidade de plantio inicial e os cuidados contínuos com adubação, irrigação, combate às formigas (somente em caso de provável comprometimento do plantio), justificam-se também pela dificuldade de realização de replantios posteriores.

O plantio foi executado concomitantemente à execução do enrocamento, visando facilitar o plantio e a acomodação das mudas entre os blocos de rocha. À medida que os blocos foram sendo dispostos, as mudas foram aplicadas entre estes, revegetando-se integralmente as margens até o limite apresentado em projeto (figura 8). O fundo do curso de água teve o enrocamento lançado sem vegetação.

Durante o plantio, cada muda foi acomodada com seu sistema radicular em contato com o solo e adubada no momento do plantio com uma dose única de 50g de NPK (10-20-20). Juntamente com a adubação, foi realizada a aplicação de polímero hidroretentor (hidrogel), em uma dose de 300ml de solução preparada, por muda. Após o término do plantio, as mudas foram irrigadas, dando-se preferência para horários durante o início da manhã ou no fim da tarde com aplicação de aproximadamente 1 litro de água por planta. Sempre que a precipitação pluviométrica ficou abaixo de 10mm acumulados no período de 30 dias, realizou-se nova irrigação.

No plantio, todas as mudas foram inclinadas entre 30 e 45° no sentido da correnteza (figura 12).

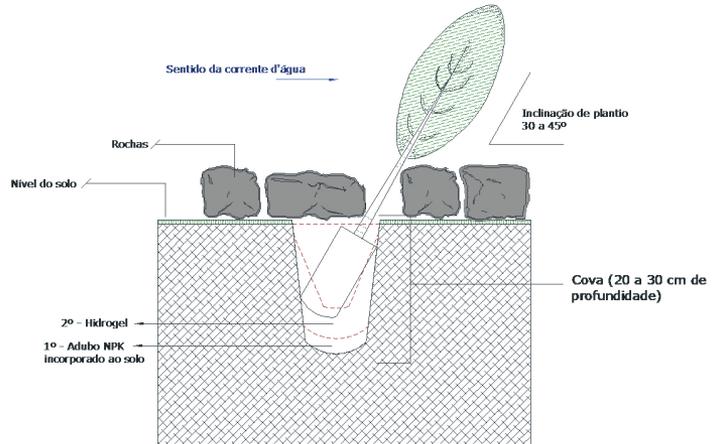


Figura 12: Aspectos da cova para o plantio das mudas.¹²

¹² Os detalhes referentes à construção do novo leito do curso de água, execução dos degraus, soleiras, enrocamento e plantio podem ser observados nas figuras 14, 15, 16 e 17. O enrocamento finalizado já com as plantas pode ser observado na figura 18.

3.2.4 Drenagem

Um sistema de drenagem foi executado nas proximidades da ocorrência do duto exposto, visando a redução dos volumes excedentes da precipitação sobre os taludes em contato com o duto enterrado. Assim foram construídos 40m de canaleta tipo I com seção retangular de 0,20 x 0,10m e 45m de canaletas tipo II, com seção 0,25 x 0,15m, sendo 12m escalonados com barreiras de concreto a cada 0,40m de comprimento. Também foram montadas duas caixas de passagem em alvenaria de 0,72 x 0,72 e profundidade de 0,95m. Por fim, foram feitos dois trechos de enrocamento com 0,25m de profundidade e 18m² de área, resultando num total de 4,5m³ de pedra de mão com diâmetro maior ou igual a 15cm. A implantação do sistema de drenagem está representada na figura 8.

3.2.5 Recomposição da faixa e serviços finais

Um trecho de aproximadamente 100m de comprimento e 4m de largura, utilizado para acesso, foi recuperado após a implantação da obra, através da execução de trabalhos de escarificação, sementeira, recomposição de leiras e canaletas em todo o trecho. A sementeira foi seguida de colocação de biomanta antierosiva de palha bidimensional. No final, foram retirados todos os materiais não pertencentes à obra, tais como restos de madeira, formas, barreiras de sedimentos, geossintéticos e outros. As cercas foram refeitas e depressões nas vias de acesso provocadas por trânsito de veículos e equipamentos da obra foram recuperadas.



Figura 13: Processo de desmonte e retirada de rochas para reformulação das margens e eixo da torrente.



Figura 14: Reconformação do novo leito e margens após desmonte de rochas.



Figura 15: Detalhes executivos dos degraus e soleiras.



Figura 16: Execução do enrocamento do leito do curso de água.



Figura 17: Execução do enrocamento vivo nas margens do curso de água.



Figura 18: Enrocamento vivo finalizado.



Figura 19: Evolução da obra de Engenharia Natural.

3.3 Vegetação utilizada

As espécies vegetais utilizadas para execução da obra estão reunidas na tabela 2 e foram plantadas segundo a distribuição do seu grupo específico. As espécies identificadas com a letra A foram plantadas em ambas as margens, na faixa mais próxima ao curso de água. As do grupo B foram plantadas em qualquer posição da área em tratamento e as do grupo C foram plantadas exclusivamente na margem direita do curso de água numa posição mais distante da linha d'água. Respeitando-se o plantio em faixas, dentro destas a distribuição das espécies foi aleatória, evitando-se a concentração (número excessivo) de uma mesma espécie em núcleos ou linhas de plantio.

Tabela 2: Lista de espécies utilizadas e respectivas quantidades.

Grupo	Espécies	Nome comum	Quantidade
A	<i>Sebastiania schottiana</i>	Sarandi-vermelho	400
A	<i>Chloroleucon tortum</i>	Jurema	300
A	<i>Calliandra haematocephala</i>	Caliandra	48
Subtotal			748
B	<i>Bauhinia forficata</i>	Pata-de-vaca	40
B	<i>Schinus terebinthifolius</i>	Aroeira-vermelha	300
B	<i>Inga</i> sp.	Ingá	300
Subtotal			640
C	<i>Protium heptaphyllum</i>	Amescla	40
C	<i>Salix humboldtiana</i>	Salgueiro	100
C	<i>Genipa americana</i>	Jenipapo	20
C	<i>Gallesia integrifolia</i>	Pau-d'alho	20
C	<i>Parapiptadenia</i> sp.	Angico-vermelho	20
C	<i>Anadenanthera peregrina</i>	Angico-curtidor	20
C	<i>Ficus gameleira</i>	Gameleira	20
Subtotal			240
Total geral			1.628

4 Resultados

A evolução da obra ao longo do período de um ano pode ser observada na figura 19: na fotografia (A) vê-se o local antes da implantação da obra, com o gasoduto e cabos de fibra ótica expostos; a fotografia (B) mostra o detalhe do degrau e enrocamento no leito durante a sua execução; na

fotografia (C) observa-se o local 8 meses depois, onde se pode constatar a deposição de material fino, que ocorre devido à redução da velocidade do fluxo de água; na fotografia (D), 1 ano após a execução da obra, verifica-se o desenvolvimento da vegetação implantada, bem como dos propágulos depositados com o material fino. Esses efeitos são proporcionados pela formação de um novo perfil de



Figura 20: Detalhe do desenvolvimento das plantas no enrocamento.

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

ritasousa.ufsm@gmail.com

Charles Rodrigo Belmonte Maffra é graduado em Engenharia Florestal, mestre em Engenharia Florestal e doutorando no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal da Universidade Federal de Santa Maria.

charles.maffra@gmail.com

compensação originaldo após implantação da obra, devido à redução da inclinação.

Na figura 20 é apresentado detalhe do desenvolvimento das mudas aplicadas no enrocamento vivo após 1 ano. O desenvolvimento da vegetação proporciona o aumento da rugosidade hidráulica, diminuindo a velocidade da água junto ao enrocamento, aumentando ainda mais a estabilidade da pedra dimensionada.

Nas figuras 21 e 22 vêem-se esquemas de evolução geral da área de intervenção durante a implantação da obra (A) e um ano após sua execução (B).

5 Considerações finais

A implantação de obras baseadas em técnicas de Engenharia Natural é fundamental para a adequada proteção, estabilização e renaturalização de cursos de água. As principais funções técnicas obtidas com essas intervenções foram: a proteção do gasoduto e cabos de fibra óptica; a estabilização em profundidade através do sistema radicular das plantas; a proteção superficial do solo (precipitação e água proveniente do escoamento superficial); a redução da velocidade da água ao longo das margens e fundo do curso de água devido à formação de um novo perfil de compensação e aumento da rugosidade hidráulica; e o aumento da coesão superficial e profunda do solo.



Figura 21: Vista geral da área de intervenção (fotografias de jusante para montante).

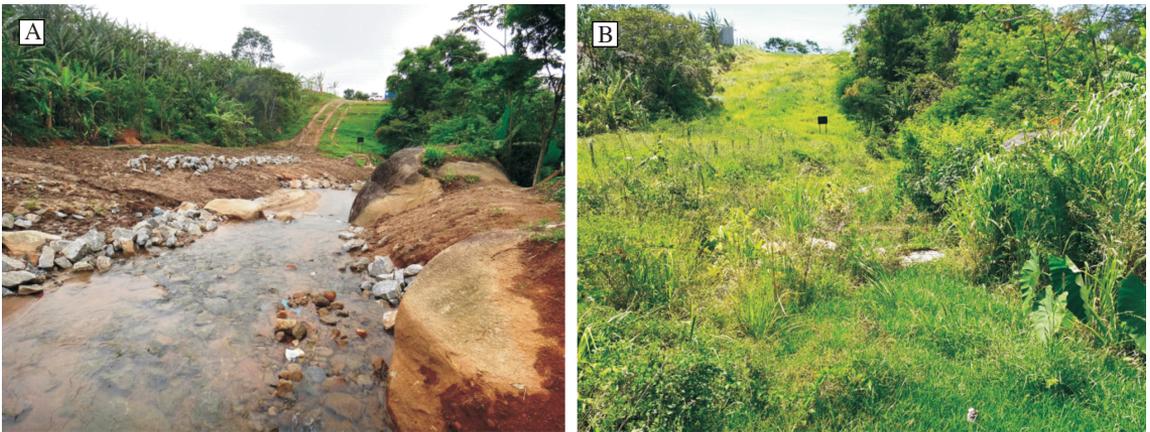


Figura 22: Vista geral da área de intervenção (fotografias de montante para jusante).

Fabrcio Jaques Sutili é graduado em Engenharia Florestal, doutor em Engenharia Natural e professor do Departamento de Ciências Florestais da Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul.
fjsutili@gmail.com

O recurso à utilização de técnicas de Engenharia Natural, além dos benefícios técnicos, proporciona várias melhorias nas funções ecológicas, como o restabelecimento da vegetação nativa e o aumento da biodiversidade florística e faunística; quanto às funções estéticas, induz à melhoria da paisagem danificada, pela intervenção dutoviária.

Uma vez que as obras de Engenharia Natural caracterizam-se por uma eficiência técnica crescente, espera-se, com o passar do tempo, que continuem a atender aos critérios para as quais foram projetadas.

Há mais de 90 anos
participamos da vida
de milhares de leitores,
escritores, editoras e empresas.



Para marcar sua história

Rua Padre Alziro Roggia, 115 - Bairro Patronato - Fone: 55 3220.4500
grafica@pallottism.com.br