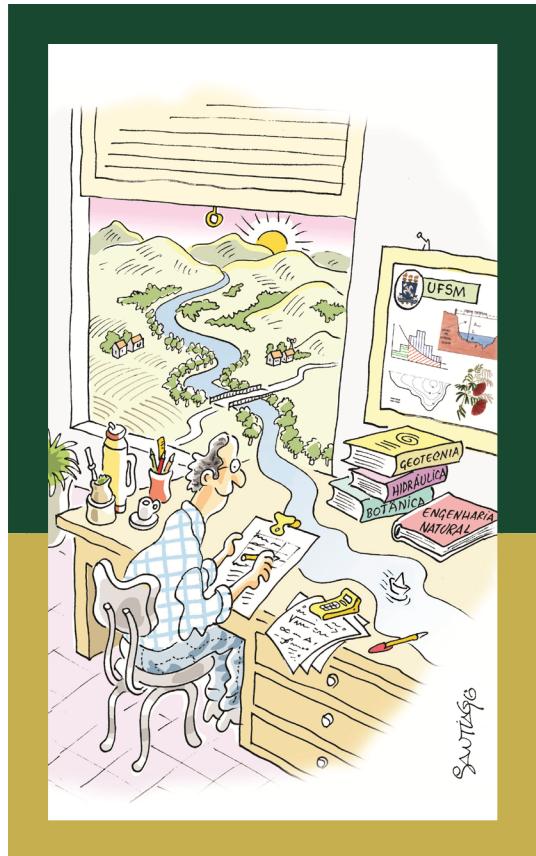


# BIOENGENHARIA

## Manejo biotécnico de cursos de água



MIGUEL A. DURLO | FABRÍCIO J. SUTILI

3<sup>a</sup> edição revisada

# **BIOENGENHARIA**

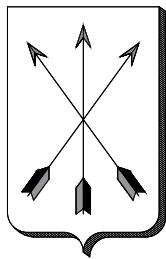
**Manejo biotécnico de cursos de água**



MIGUEL A. DURLO | FABRÍCIO J. SUTILI

# BIOENGENHARIA

Manejo biotécnico de cursos de água



3<sup>a</sup> Edição Revisada  
EDIÇÃO DO AUTOR | SANTA MARIA | 2014

© Dos autores  
Edição Impressa e Digital: 2014

.. ..

**Produção editorial:** Fabrício J. Sutili

**Imagen da capa:** Santiago (Neltair R. Abreu)

**Revisão de texto:** Tagiane Mai

3<sup>a</sup> edição revisada, 2014  
Todos os direitos reservados.

---

S966m Durlo, Miguel Antão ; Sutili, Fabrício Jaques

Bioengenharia: Manejo Biotécnico de Cursos de Água /  
Miguel Antão Durlo ; Fabrício Jaques Sutili. – Santa Maria:  
Edição do Autor, 3<sup>a</sup> Edição, 2014.

192 p. : il.

ISBN: 978-85-913475-1-3

1. Cursos de água. 2. Taludes fluviais. 3. Vegetação reófita.  
4. Biotécnicas. 5. Bioengenharia. 6. Engenharia Florestal. I.  
Sutili, Fabrício Jaques. II. Título.

CDU : 556.51:630.23

---

*Ao meu filho, Izaner Durlo.*

*Ao meu avô, Guilherme Sutili.*

# Sumário

PREFÁCIO .....	9
APRESENTAÇÃO DA 1 <sup>a</sup> EDIÇÃO .....	11
APRESENTAÇÃO DA 2 <sup>a</sup> EDIÇÃO .....	13
APRESENTAÇÃO DA 3 <sup>a</sup> EDIÇÃO .....	15
<b>1 INTEMPERISMO E EROSÃO</b>	
1.1 – Introdução .....	17
1.2 – Intemperismo .....	19
1.3 – Erosão .....	21
<b>2 O CURSO DE ÁGUA</b>	
2.1 – Introdução .....	25
2.2 – Fisiografia fluvial .....	26
2.2.1 – Rede de drenagem .....	26
2.2.2 – Canal .....	28
2.2.3 – Leito .....	30
2.2.3.1 – Perfil transversal .....	30
2.2.3.2 – Perfil longitudinal .....	31
<b>3 PROCESSOS FLUVIAIS</b>	
3.1 – Introdução .....	35
3.2 – Velocidade da água .....	36
3.3 – Estabilidade de materiais fluviais .....	39
3.3.1 – Materiais dissolvidos .....	40
3.3.2 – Materiais sobrenadantes .....	40
3.3.3 – Materiais em suspensão .....	41
3.4 – Transporte fracionado e em massa .....	45
3.5 – Movimentação de materiais coesos .....	46
3.6 – Movimentação de materiais singulares .....	50
3.7 – Perfil de compensação .....	54
<b>4 MOVIMENTOS DE MASSA</b>	
4.1 – Introdução .....	59
4.2 – Classificação dos movimentos de massa .....	60
4.2.1 – Escoamento .....	60
4.2.1.1 – Rastejo .....	60
4.2.1.2 – Fluxos ou corridas .....	61
4.2.2 – Deslizamento .....	62
4.2.2.1 – Superfícies e formas de deslizamentos .....	62
4.2.3 – Desmoronamento .....	64
4.2.4 – Movimentos complexos .....	65
4.2.4.1 – Entalhamento .....	65
4.2.4.2 – Corrosão .....	67
4.3 – Causas dos movimentos de massa .....	68

4.3.1 – Causas externas .....	69
4.3.2 – Causas internas .....	73

## **5 AS PROPRIEDADES TÉCNICAS DA VEGETAÇÃO**

5.1 – Introdução .....	77
5.2 – Efeitos da vegetação sobre taludes (fluviais) .....	78
5.3 – Eleição de espécies .....	81
5.3.1 – Estágios sucessionais .....	81
5.3.2 – Fatores ecológicos .....	82
5.3.3 – Aspectos reprodutivos .....	82
5.3.4 – Aptidão biotécnica .....	82
5.4 – Plantas úteis à Engenharia Natural .....	83
5.5 – Experimentos .....	89
5.6 – Canteiro experimental padrão .....	93
5.6.1 – Instalação do experimento e coleta de dados .....	93
5.6.2 – Análise preliminar de um canteiro experimental padrão .....	94

## **6 MANEJO DE CURSOS DE ÁGUA**

6.1 – Introdução .....	103
6.2 – Métodos utilizados no manejo de cursos de água .....	104
6.3 – Manejo passivo de cursos de água .....	106
6.3.1 – Isolamento de faixa marginal .....	107
6.3.2 – Proteção da regeneração natural .....	108
6.4 – Manejo ativo de cursos de água .....	110
6.4.1 – Limpeza do canal .....	110
6.4.2 – Revestimento vegetal das margens .....	111
6.4.2.1 – Renovação da proteção .....	113
6.4.3 – Engenharia Natural .....	113

## **7 ENGENHARIA NATURAL**

7.1 – Introdução .....	115
7.1.1 – Definição .....	115
7.1.2 – Histórico e benefícios .....	115
7.2 – Técnicas do manejo de cursos de água .....	117
7.3 – Tipologia e função das obras de Engenharia Natural .....	122
7.4 – Ações preparatórias, preventivas e emergenciais .....	122
7.5 – Obras longitudinais .....	124
7.5.1 – Râmprolas ou espiões transversais .....	125
7.5.1.1 – Posicionamento das râmprolas .....	127
7.5.1.2 – Exemplos de râmprolas .....	128
7.5.2 – Râmprolas longitudinais .....	129
7.5.3 – Revestimentos do leito .....	130
7.5.3.1 – Tratamentos na linha da água .....	130
7.5.3.2 – Revestimento integral das margens .....	133

7.6 – Obras transversais .....	141
7.6.1 – Obras transversais de consolidação .....	141
7.6.2 – Determinação da posição das barragens .....	147
7.6.2.1 – Posição relativa ao eixo do curso de água .....	147
7.6.2.2 – Distância entre as barragens .....	147
7.6.2.3 – Sequência para a estabilização de cursos de água .....	150
7.6.3 – Obras transversais de retenção .....	151
7.7 – Dimensionamento de obras biotécnicas .....	152

## 8

### **ESTUDO DE CASO: O ARROIO GUARDA-MOR**

8.1 – Introdução .....	157
8.2 – Caracterização geral da área .....	157
8.2.1 – Localização e hidrografia .....	157
8.2.2 – Clima .....	158
8.2.3 – Geomorfologia, geologia e solos .....	159
8.2.4 – Vegetação original .....	161
8.2.5 – Vegetação atual e usos da terra .....	163
8.3 – O Arroio Guarda-Mor .....	164
8.3.1 – Fisiografia fluvial .....	164
8.3.1.1 – Perfil longitudinal .....	165
8.3.2 – Processos fluviais .....	166
8.4 – Obras de Engenharia Natural no Arroio Guarda-Mor .....	173
8.4.1 – Parede vegetada de madeira (Parede Krainer) .....	174
8.4.1.1 – Apresentação do problema .....	174
8.4.1.2 – Proposta geral .....	175
8.4.1.3 – Detalhamento do trabalho .....	176
8.4.1.4 – Resultados .....	179
8.4.1.5 – Conclusões .....	183
8.4.2 – Esteira viva .....	184
8.4.2.1 – Apresentação do problema .....	184
8.4.2.2 – Proposta geral .....	184
8.4.2.3 – Detalhamento do trabalho .....	185
8.4.2.4 – Resultados .....	187
8.4.2.5 – Conclusões .....	188
8.5 – Considerações finais .....	189



## PREFÁCIO

Vivemos todos em época marcada pela forte ideia de representação. Importam pouco ou quase nada o conteúdo, a substância, a essência, a trajetória, a coerência. Trata-se da velha disputa entre invólucro e conteúdo, resolvida, em nosso tempo, em favor do aparente, do efêmero, do apego às luzes.

Os temas relacionados ao meio ambiente – sempre capazes de despertar amplo interesse e, portanto, passíveis de usos e abusos diversos –, prestam-se sobremaneira ao exercício da representação. Basta observar que a cada novo modismo ecológico surgem especialistas propondo dossiês, relatórios ou projetos salvadores sobre o assunto em voga na pauta ambiental planetária.

É o caso da água, líquido precioso que vemos escorrer entre as mãos. De acordo com as previsões mais otimistas, estaremos todos mortos (de sede) lá por 2050, quem sabe 2053, a não ser que especialistas de plantão arrumem uma saída estratégica... Ora, o exame da situação de recursos naturais como a água, considerando escalas espaciais tão vastas, recomenda, no mínimo, certa parcimônia no anúncio da catástrofe que nos espera ali adiante, na próxima esquina. Isso, por óbvio, não significa desconhecer os múltiplos problemas associados aos já naturalmente valiosos recursos hídricos.

A obra aqui apresentada – *Bioengenharia: Manejo biotécnico de cursos de água* –, seja pela qualidade e seriedade dos seus autores, os engenheiros florestais Miguel Durlo e Fabrício Sutili, seja pela novidade (ao menos no Brasil) e oportunidade do seu conteúdo, certamente passa ao largo do “espírito ligeiro” que domina a cena contemporânea.

Entre as questões suscitadas ao longo do texto, uma delas bem que poderia ser assim expressa: os cursos de água que apresentam problemas em

suas margens, em seus leitos ou mesmo em suas configurações geográficas são recuperáveis? Em consonância com a contribuição dos dois estudiosos, a resposta é sim. Os autores nos ensinam que, com o uso de técnicas e obras relativamente simples, oriundas da bioengenharia (aqui entendida como campo científico e não como novo modismo), é possível proceder à recomposição e à recuperação de trechos ou mesmo da totalidade de certos corpos de água. (Convém referir aqui o privilégio que tive de comprovar *in loco* o potencial dessas técnicas de manejo, ao acompanhar parte dos trabalhos experimentais desenvolvidos no Arroio Guarda-Mor, na região central do Rio Grande do Sul).

A bioengenharia avança também por um terreno que nos é caro, qual seja, o do uso de espécies vegetais para auxiliar na estabilização de taludes fluviais. Nesse sentido, asseguram Durlo e Sutili, há ainda, por trilhar, um longo e delicado caminho de seleção e teste de espécies. Também é importante destacar a referência presente no livro, por todos os títulos apropriada, no sentido de que nem sempre a vegetação é o remédio para todos os males. Em certas circunstâncias, a vegetação inclusive pode ser parte do problema de desestabilização das margens de cursos de água.

Enfim, os estudiosos da área e demais interessados passam a dispor agora de uma obra de referência, absolutamente indispensável para quem quer ir além do rótulo e mergulhar nas águas da ciência e da boa técnica, cujo objetivo, em última análise, é o de melhorar as condições de vida das comunidades, garantindo, entre outros aspectos, a estabilidade ecológica do meio em que vivem.

Delmar Bressan

Professor do Departamento de Ciências Florestais/UFSM

## **APRESENTAÇÃO DA 1<sup>a</sup> EDIÇÃO**

Dividido em oito capítulos ordenados em uma sequência lógica, que abrangem desde a coleta de dados até a seleção e construção de obras concretas, o livro leva o leitor a ter uma noção geral da bioengenharia.

Nos primeiros quatro capítulos, são expostas informações prévias, necessárias aos trabalhos práticos, e esclarecidos importantes conceitos sobre a fisiografia fluvial, processos fluviais e estabilidade de taludes, indispensáveis para o manejo biotécnico de cursos de água.

No Capítulo 5, são tratados os efeitos da vegetação sobre a estabilidade de taludes fluviais. Nesse capítulo, foi incluída também a descrição botânica de espécies, tidas na literatura como potencialmente aptas para a bioengenharia, e é sugerida uma forma prática de experimento para estudar diversas características biotécnicas de vegetação reófila.

Os capítulos seguintes (6 e 7) adentram as formas e técnicas disponíveis para o manejo prático dos cursos de água, dando especial atenção às obras de bioengenharia.

O último capítulo é um guia para reconhecer e classificar os problemas decorrentes de processos fluviais, levantar informações, decidir sobre as formas de ação, implantar e acompanhar os tratamentos selecionados. Para demonstrar essa sequência, é apresentado um estudo de caso – o Arroio Guarda-Mor –, descrevendo os diversos passos para a solução de dois problemas concretos.

Santa Maria, dezembro de 2004.



## **APRESENTAÇÃO DA 2<sup>a</sup> EDIÇÃO**

Em virtude do esgotamento da versão impressa e com o objetivo de facilitar e ampliar o acesso ao conteúdo, os autores do livro *Bioengenharia: Manejo biotécnico de cursos de água* estão disponibilizando ao público uma versão digital da obra.

Este material de modo algum esgota o tema; ao contrário, guarda a tímida pretensão de ter sido o primeiro passo. Esta versão digital corresponde exatamente à edição impressa de 2005, apenas foram corrigidos alguns pequenos enganos e descuidos gramaticais.

Desde a publicação da primeira edição desta obra pela editora EST, em 2005, muito foi feito no país para o desenvolvimento da Bioengenharia, ou, como é mais conhecida hoje, a Engenharia Natural. Desde então, uma série de pesquisas acadêmicas foi concluída pela Universidade Federal de Santa Maria e por outras instituições nacionais de ensino e pesquisa. Essas novas informações disponíveis serão brevemente reunidas em uma nova obra.

Santa Maria, fevereiro de 2012.



## **APRESENTAÇÃO DA 3<sup>a</sup> EDIÇÃO**

Na última década, desde a publicação da primeira edição desta obra pela editora EST, em 2005, experimenta-se uma contínua disseminação, no país, das técnicas e princípios de Bioengenharia, ou Engenharia Natural, como atualmente é denominada nos países lusófonos e, doravante, nesta edição.

A Universidade Federal de Santa Maria vem, ao longo dos anos, desenvolvendo pesquisas que investigam as características eco-morfo-fisiológicas e propriedades biotécnicas das plantas ribeirinhas e de encosta. Atualmente, os esforços nesse sentido estendem-se a outras regiões do país, em outras instituições de ensino e pesquisa. Os conhecimentos reunidos são suficientes para garantir que esta ciência tenha aplicação efetiva e segura em alguns locais do país, principalmente em obras de pequeno porte no ambiente rural ou mesmo urbano.

Mais recentemente, o público externo à universidade – empresas privadas e do setor público – vêm se interessando, recomendando e aplicando soluções de Engenharia Natural às obras de infraestrutura. Contudo, a aplicação extensiva de tais biotécnicas em obras de infraestrutura é dificultada pelo estágio atual da disciplina, ainda, em grande parte, descritivo e mesmo artesanal. Acredita-se que, a exemplo do desenvolvimento histórico de outras disciplinas da engenharia, pode-se buscar revestir a Engenharia Natural de um caráter mais analítico, sem, contudo, pôr em detrimento suas funções não técnicas.

O desenvolvimento analítico deste ramo da ciência é um caminho longo a se percorrer. Nesse sentido esta edição inclui alguns conceitos e terminologias usuais na área da Engenharia Civil. Também foram corrigidos alguns pequenos enganos e descuidos gramaticais remanescentes da edição digital.

Atualmente, desenvolvem-se trabalhos, tanto acadêmicos quanto projetos e estudos de caso práticos, visando o desenvolvimento analítico da Engenharia Natural como disciplina técnica. Essas novas informações, de origem nacional e internacional, devem em breve ser reunidas em uma nova obra, conceitualmente estruturada de modo mais analítico.

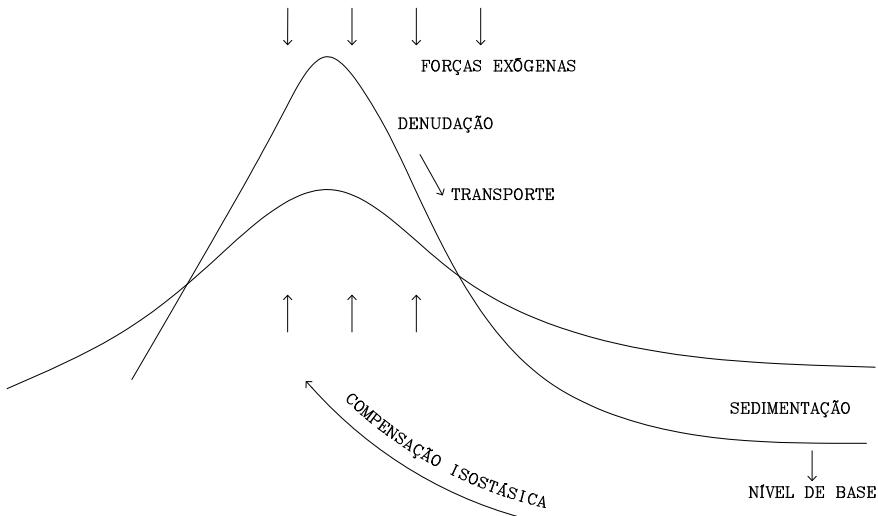
Santa Maria, dezembro de 2014.

# 1

## INTEMPERISMO E EROSÃO

### 1.1 – Introdução

Os processos geomorfológicos estão constantemente em ação, dando à paisagem um caráter temporário e variável. As diferentes paisagens atuais são resultados da manifestação progressiva de agentes modeladores que, com interações, intensidades e capacidades de modificação variáveis no tempo e no espaço, causam uma paulatina, embora constante, transformação do relevo, conforme esquema mostrado na figura 1.1.



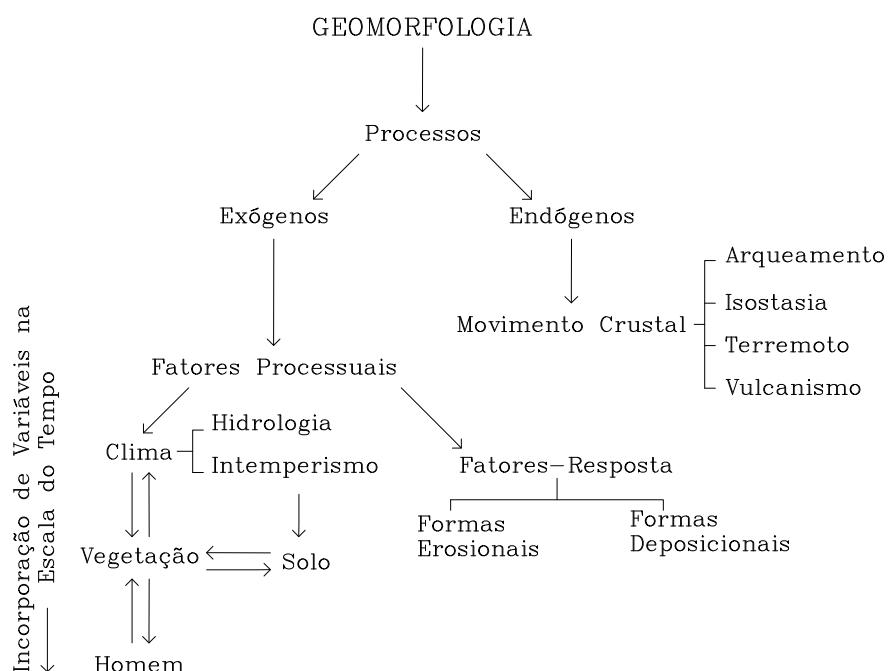
**Figura 1.1** – Desenho esquemático da transformação da paisagem, forças e processos envolvidos

**Fonte:** Cassetti (1994).

As irregularidades na superfície do planeta são resultados da constante interação e busca de equilíbrio entre as forças de soerguimento (predominantemente endógenas) e de denudação (exógenas).

Em um sentido, agem forças endógenas, como movimentos da crosta, arqueamentos, isostasias, terremotos e atividades vulcânicas, capazes de criar desigualdades na superfície terrestre. No sentido oposto, agem forças exógenas capazes de causar processos erosivos que, através dos seus agentes principais, a água e o vento, condicionados pela gravidade, transportam e depositam os produtos do intemperismo. Forças de intemperismo e erosão podem ser exercidas pelas oscilações da temperatura, pela água, pelo vento, pela gravidade, pelos animais e pelo homem. Esses agentes, apesar de possuírem origens independentes, influenciam-se mutuamente e também são, em parte, manifestações resultantes do próprio relevo que moldam (Figura 1.2).

18



**Figura 1.2** – Classificação dos processos envolvidos na geomorfologia

**Fonte:** Cassetti (1994).

A água é o mais importante agente processual, modelador exógeno do relevo. Seu efeito de intemperismo ocorre em vários níveis e locais, de várias formas físicas e químicas, compreendendo todo o seu ciclo natural. Do seu escoamento superficial, principalmente nos cursos de água, resultam

importantes efeitos na construção da paisagem, na medida em que escava e/ou transporta materiais das áreas mais elevadas para as cotas mais baixas. A água, de um modo geral, está ligada aos processos de erosão, bem como tem influência decisiva na estabilidade das encostas.

Como processos de caráter exclusivamente fluvial, entendem-se a desagregação, o transporte e a sedimentação, tanto dos materiais providenciados pelo próprio trabalho de corrosão das margens e escavação do leito como de todos os produtos do intemperismo que alcançam o fluxo de água. A compreensão dos processos geomorfológicos, principalmente os de caráter fluvial (geomorfologia fluvial) é, portanto, imprescindível para o manejo de cursos de água.

Dentro de certos limites, o homem, por interesse ou de maneira involuntária, pode interferir, positiva ou negativamente, sobre a dinâmica, que resulta da interação de forças naturais. As forças endógenas fogem, quase que completamente, ao controle do homem. Entre as exógenas, encontra-se um conjunto de fatores processuais que não podem ser facilmente influenciados, a curto ou médio prazo, como a hidrologia e outros que, de maneira mais fácil, podem ser manipulados pelas ações humanas, tais como a microtopografia e cobertura vegetal.

Em curto prazo não se consegue, por exemplo, modificar o clima ou a geologia de um local, mas é possível fazer com que certas características locais sejam influenciadas ou controladas pelo uso objetivo da vegetação. Pequenas intervenções físicas no leito e canal, apoiadas ou não por medidas vegetativas, podem alterar características como a velocidade da água e a tensão de erosão suportada pelo leito, controlando-se processos fluviais.

O conhecimento das causas, das formas de ação e das consequências dos processos que modelam a paisagem é pré-requisito fundamental para estimar os eventuais problemas a eles ligados e para propor medidas preventivas, mitigadoras ou corretivas adequadas a cada caso. É nesse contexto, portanto, que a ação humana é compreendida como agente exógeno que pode interferir, positiva ou negativamente, na formação do relevo. O homem não tem poder sobre os movimentos endógenos, mas é um dos agentes capazes de interagir e influenciar alguns fatores processuais e de resposta (Figura 1.2), de modo a convertê-los em ferramentas para o manejo de cursos de água.

## **1.2 – Intemperismo**

O intemperismo é um processo natural de fragmentação, desintegração e degradação lenta e contínua das rochas superficiais ou próximas à superfície, por meio de processos mecânicos e químicos. A forma e a intensida-

de do intemperismo dependem do tipo de rocha, isto é, de sua composição química, estrutura, porosidade, dureza e diaclasamento, como também dos fatores atuantes, isto é, das intempéries. O intemperismo pode ser causado por processos físicos, como a fragmentação pelo calor, pelo frio, pela cristalização de sais e pela ação física da água, ou então por processos químicos, desencadeados igualmente pelo calor, pela água ou por ácidos. Além disso, existe a influencia da ação de agentes biológicos, como plantas e animais, que não deixam também de produzir ações físicas ou químicas. Na natureza, os processos físicos e químicos ocorrem, em geral, de forma concomitante, frequentemente, porém, com visível predominância de um deles.

O intemperismo é classificado como superficial quando ocorre nas primeiras camadas do material ou em pequenas profundidades. É ocasionado geralmente pela ação isolada ou conjunta da temperatura, da hidratação, da hidrólise e da oxidação, mas também pela ação das raízes das plantas ou pela atividade da fauna do solo. Já o intemperismo profundo corresponde à degradação de rochas profundas, pela ação de ácidos ou sais dissolvidos na água, ou pela lavagem de componentes minerais das rochas.

O tipo e a intensidade do intemperismo estão estreitamente relacionados com o clima (Quadro 1.1).

REGIÃO CLIMÁTICA	INTEMPERISMO	
	Profundo	Superficial
Polar	baixo	alto
Quente e seca	baixo	alto
Quente e úmida	médio	médio
Chuvosa sazonal	médio	baixo
Chuvosa constante (tropical)	alto	alto

**Quadro 1.1** – Regiões climáticas, tipo e intensidade do intemperismo

**Fonte:** Weinmeister (1994).

Um mesmo tipo de rocha pode ter diferente suscetibilidade aos fatores do intemperismo, na dependência do clima dominante. O granito, por exemplo, é uma rocha morfológicamente muito dura em regiões secas, mas, em condições tropicais, sob ação do intemperismo profundo (predominantemente químico), é considerada uma rocha branda.

Os produtos do intemperismo são rochas de granulometria menor que a original, chegando a dimensões bastante pequenas, passando a ser reconhecidas como frações do solo: pedregulho, areia, silte e argila.

A presença de materiais (rochas) de dimensões maiores, como cascalhos, calhaus ou matacões, bem como a proporção com que cada fração (pedregulho, areia, silte e argila) contribui para a formação do solo, irá determinar grande parte das suas características físicas particulares. Essas características, importantes nos processos de erosão e transformação da paisagem serão discutidas mais adiante.

O intemperismo, seja mecânico, seja químico, é, portanto, o processo que prepara e disponibiliza materiais que, então, podem ser movimentados. O movimento do material pode ocorrer de diversas formas, que vão desde a erosão superficial de uma encosta desprotegida aos catastróficos movimentos de massa, como os deslizamentos e os desmoronamentos. Tanto a erosão superficial do solo como o desmoronamento repentino de uma encosta ou margem de rio acabam por produzir materiais passíveis de ser transportados e sedimentados mais adiante.

21

### 1.3 – Erosão

Por denudação entende-se a erosão e o transporte de materiais nas encostas dos talvegues. A denudação engloba as diversas formas de erosão superficial e os movimentos de massa.

No contexto deste livro, são importantes os processos de desgaste da superfície terrestre (rebaixamento e escavação), que podem, didaticamente, ser divididos em erosão superficial e movimentos de massas. Não se tem a pretensão de discutir conceitos relativos à terminologia técnica, que ainda provocam controvérsias na literatura especializada. Para os movimentos de massa, sugere-se no Capítulo 4, uma classificação que serve como organização para o entendimento dos fenômenos de interesse.

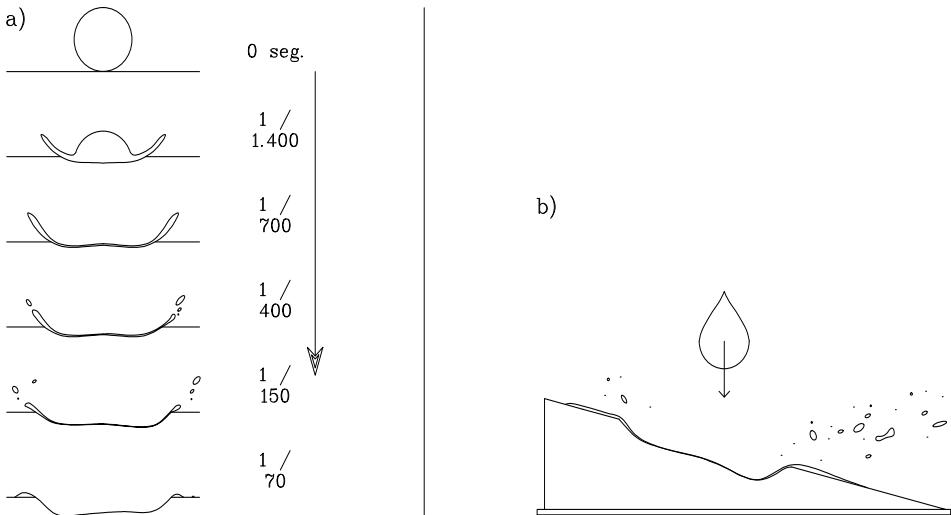
O principal agente de denudação é a água, embora, em certas regiões, especialmente naquelas desprovidas de vegetação, o vento também possa ser um agente de importância. A erosão hídrica superficial ocorre quando há o prevalecimento das forças de desagregação dos agentes do intemperismo sobre as forças de resistência da superfície do terreno. O processo de erosão superficial pode ser compreendido observando-se a figura 1.3. A queda de uma gota de água sobre um solo exposto e perfeitamente horizontal produz uma pequena cratera, espalhando os materiais resultantes para todas as direções e a uma determinada distância (Figura 1.3a). Se a superfície do solo for inclinada, o movimento das partículas será nitidamente direcionado no sentido do declive, como mostrado na figura 1.3b.

À medida que a dinâmica pluvial prossegue, tanto temporalmente como espacialmente, as gotas de chuva se juntam e transformam-se em um filme

de água, que flui de forma laminar. Em seguida, a lâmina de água torna-se mais espessa e, à medida que se movimenta, encontra pequenas alterações na microtopografia natural da superfície do terreno, pelas quais escoa, entrando em turbilhonamento e aumentando sua capacidade de erosão e de transporte. Esses fluxos difusos, eventualmente, juntam-se de forma sequencial, originando canais permanentes, dando início à erosão linear e ao entalhamento.

A erosão superficial disponibiliza grande parte dos materiais que chegam aos cursos de água, que são então transportados e depositados mais adiante.

22



**Figura 1.3** – Resultado do impacto de uma gota sobre uma superfície erodível, plana (a) e inclinada (b)

**Fonte:** adaptada de Hillel (1998).

Apesar de não ser inicialmente um evento perigoso e catastrófico, como muitas vezes podem ser os movimentos de massa, a erosão superficial do solo traz igualmente grandes prejuízos financeiros. É justamente a lentidão que, quando comparada a um deslizamento ou entalhamento do solo, faz da erosão superficial um problema que, na maioria das vezes, só é notado quando as perdas de solo já foram significativas.

Embora o processo seja lento, existem algumas evidências que podem denunciar a presença do fenômeno em uma área, como, por exemplo, o aparecimento superficial das raízes das árvores, o afloramento de palanques de cercas e pedras ou a exposição da fundação de construções existentes na área.

Os movimentos de massa, por sua vez, englobam uma série de fenômenos erosionais diferentes dos ocasionados pelo escoamento superficial. Os materiais

transportados não são grânulos singulares, mas uma determinada massa terrosa e/ou rochosa que é deslocada em um único ou em poucos eventos.

A compreensão dos requisitos, processos e causas envolvidos nos movimentos de massa são fundamentais quando se deseja reconhecer as possibilidades de controle.

Na literatura, existem diversas classificações que usam diferentes critérios para a segregação dos fenômenos. O critério do comportamento da massa em movimento, por exemplo, permite distinguir os escoamentos (massa com comportamento fluídico) dos deslizamentos ou escorregamentos. Utilizando-se o critério velocidade do movimento massal, pode-se subdividir os escorregamentos em fluxos (rápidos) e rastejos (lentos).

Outros critérios, como superfícies, formas e, especialmente, causas dos movimentos de massa, proporcionam uma segregação cada vez mais acurada dos fenômenos singulares de movimentação e permitem, até mesmo, a compreensão dos movimentos complexos, em que muitas variáveis são envolvidas no processo.

De um modo geral, a água está sempre ligada aos processos de erosão, bem como tem influência decisiva na estabilidade das encostas, dando origem a movimentos de massa muito frequentes em ambientes fluviais. Os fenômenos relacionados à estabilidade dos taludes fluviais recebem especial atenção no quarto capítulo deste livro.

## Bibliografia

CASSETTI, V. *Elementos de geomorfologia*. Goiás: Ed. da UFG, 1994.

HILLEL, D. *Environmental Soil Physics*. San Diego Academic Press, 1998.

PENHA, H. M. Processos endogenéticos na formação do relevo. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. *Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos*. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2001. p. 51-92.

WEINMEISTER, H. W. *Vorlesung Wildbachkunde: Skriptum, vorläufige Ausgabe*. Wien: Institut für Wildbach und Lawinenschutz. Universität für Bodenkultur, 1994.



# 2

## O CURSO DE ÁGUA

### 2.1 – Introdução

Este capítulo tem como objetivo revisar alguns conceitos da fisiografia fluvial, destacar os de maior valor para o manejo de cursos de água e convencionar terminologias de interesse à compreensão dos processos fluviais de erosão, transporte e sedimentação.

Wolle (1980) apud Pinheiro (2000) considera a água e o vento, sob a condicionante básica da gravidade, como sendo capazes de causar processos de desagregação, de transporte e de deposição.

A água é um dos agentes modeladores exógenos do relevo mais importantes na construção e composição da paisagem terrestre. Está ligada aos processos de erosão e sua influência sobre a estabilidade de encostas e taludes fluviais é decisiva. Do seu escoamento nos cursos de água resultam processos fluviais que participam da constante esculturação das formas de relevo e correlacionam-se, de forma dinâmica, a toda sorte de aspectos ecológicos, econômicos e sociais.

À medida que aumenta a velocidade do escoamento de um curso de água, passando da velocidade crítica, este passa a adquirir um comportamento torrencial que pode acelerar a dinâmica processual de uma rede de drenagem, ocasionando prejuízos de caráter econômico e ambiental e mesmo perda de vidas humanas, merecendo atenção especial.

Valendo-se da contribuição de diversos autores, como Thiéry (1891), Strela (1934), Mayer (1941) e Aulitzky, Fiebiger e Diera (1990), é possível reconhecer dois tipos de rios: os de montanha e os de planície. As primeiras são caracterizadas pelas cheias súbitas e violentas, pelo declive acentuado e irregular e pela capacidade de transportar grande quantidade de materiais

grosseiros (de maior granulometria). As de planície, por sua vez, caracterizam-se por percorrer terrenos menos declivosos e por apresentar um canal tipicamente meandrício com erosão nos raios externos e deposição nos raios internos de suas curvas. Um curso de água nem sempre apresenta comportamento torrencial, mas pode assumi-lo em períodos em que a precipitação for de maior intensidade. Por outro lado, um mesmo curso de água, com frequência, pode ainda apresentar comportamento torrencial de montanha e de planície simultaneamente em diferentes trechos de seu curso.

## 2.2 – Fisiografia fluvial

A fisiografia fluvial retrata basicamente um conjunto de parâmetros morfológicos, como áreas, comprimentos, declividades, padrões e índices, que expressam as características fluviais do ponto de vista físico e podem ser observadas e medidas a campo ou extraídas de mapas, fotografias aéreas ou imagens de satélites (SILVEIRA, 1993).

O reconhecimento de alguns desses aspectos é importante para a compreensão dos processos fluviais e para a adoção adequada de técnicas de correção e estabilização.

De forma genérica, a fisiografia fluvial pode ser entendida sob os pontos de vista de rede de drenagem, de canal e de leito (CUNHA, 2001). Entretanto, maior destaque deve merecer o perfil longitudinal do leito, dada sua importância para a compreensão dos fenômenos que interessam ao manejo biotécnico dos cursos de água.

### 2.2.1 – Rede de drenagem

Ao conjunto de canais que se interligam, escoando em uma determinada direção, dá-se o nome de rede de drenagem fluvial. A área drenada por essa rede é denominada de bacia hidrográfica ou bacia de drenagem. No conceito proposto por Netto (2001), uma bacia de drenagem corresponde a uma área da superfície terrestre que drena água, sedimentos e materiais dissolvidos para uma saída comum, em um determinado ponto de um canal fluvial, denominado seção de controle.

Cunha (2001) lembra que a rede de drenagem pode exibir diferentes padrões de drenagem, possibilitando classificações que levam em conta a forma de escoamento, a gênese e a geometria dos canais.

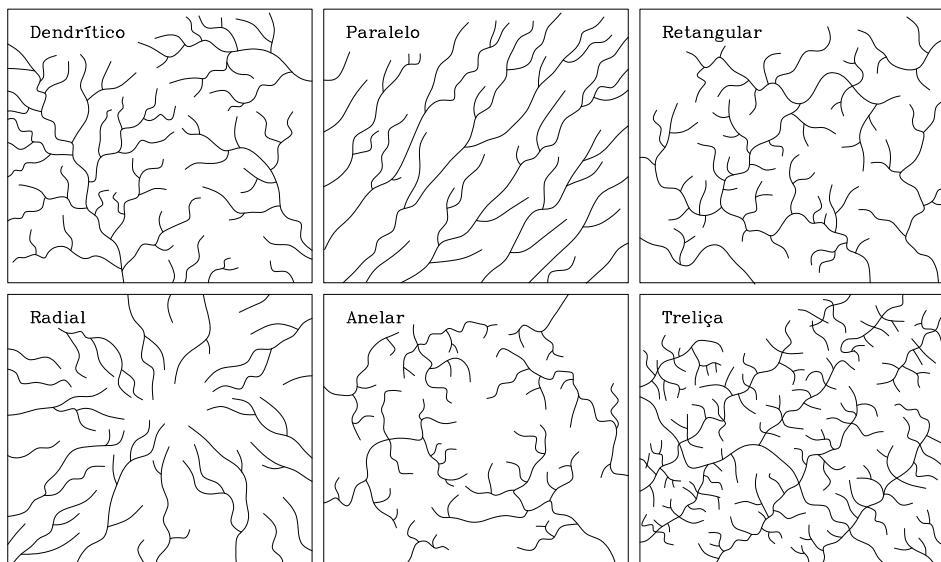
Esses padrões resultam de um grande número de características do ambiente local, tanto geológicas quanto climáticas, com quem se relacionam.

Interpretando-se o padrão de drenagem, a forma do escoamento e a gênese da rede de drenagem, é possível pressupor algumas das características do ambiente, bem como sua suscetibilidade aos processos de instabilidade.

De acordo com o escoamento, as redes de drenagem são classificadas em exorreicas, quando a drenagem se dirige para o mar, e em endorreicas, quando a drenagem se dirige para uma depressão interna do continente.

A classificação dos padrões de drenagem, com base na geometria dos seus canais, apresenta os seguintes tipos fundamentais: dendrítico, paralelo, retangular, radial, anelar, treliça e irregular (Figura 2.1).

Uma bacia hidrográfica pode englobar diferentes padrões geométricos para seus rios e mesmo uma gama de subtipos (BIGARELLA; SUGUIO; BECKER, 1979).



27

**Figura 2.1 – Alguns padrões geométricos de drenagem**

**Fonte:** adaptada de FISRWG (1998) e Cunha (2001).

Além do padrão de drenagem, para a comparação entre diferentes bacias, é importante a densidade da rede de drenagem, ( $d_D$ ) determinada pela relação entre o somatório do comprimento ( $L_i$ ) dos cursos de água e a área da bacia hidrográfica (A).

$$d_D = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^n L_i \quad (2.1)$$

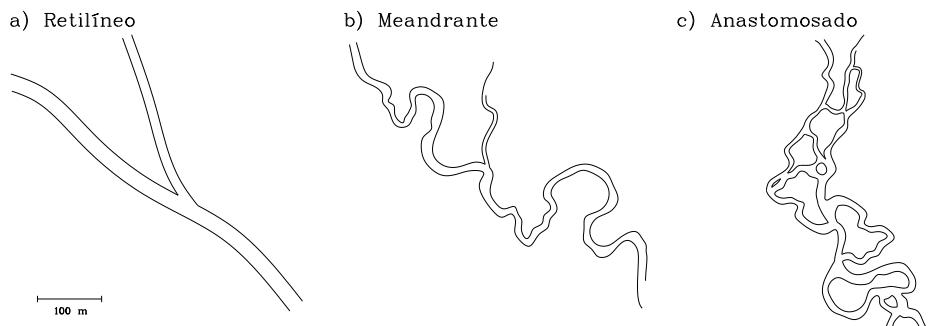
Sousa (1977) considera alto o valor da densidade de drenagem quando esta for superior a 4,1 km/km<sup>2</sup>; médio, quando varia entre 2,1 e 4,0 km/km<sup>2</sup>; e baixo, quando é inferior a 2,0 km/km<sup>2</sup>.

Outro dado de fácil visualização e útil para situar (posicionar) o curso de água, dentro de sua rede de drenagem ou esta última em relação às outras, é a determinação da hierarquia fluvial. Para isso, pode-se seguir um sistema proposto por Horton em 1945 e modificado por Strahler em 1952: os canais de 1<sup>a</sup> ordem são os que não possuem tributários, estendendo-se desde a nascente até a primeira confluência; os de 2<sup>a</sup> ordem resultam da confluência de dois canais de 1<sup>a</sup> ordem; os canais de 3<sup>a</sup> ordem são formados pela confluência de dois canais de 2<sup>a</sup> ordem; e assim sucessivamente.

## 2.2.2 – Canal

28

A fisionomia exibida por um curso de água ao longo do seu desenvolvimento longitudinal, sob a perspectiva de vista superior (canal), é descrita como retilínea, meandrante ou anastomosada (CHRISTOFOLETTI, 1974, 1981), como exemplificado na figura 2.2.



**Figura 2.2** – Tipos de padrões de canais

Segundo Christofeletti (1981), esses padrões resultam do ajuste do canal à sua seção transversal, buscando, assim, uma configuração de equilíbrio dinâmico. Da mesma maneira que para a seção transversal, o padrão fisionômico longitudinal assumido pelo canal também fica na dependência das características de cada trecho do curso de água, tais como as propriedades geomorfológicas, as condições da vegetação e do escoamento, podendo, um mesmo rio, demonstrar, em pontos distintos, as três fisionomias ou mesmo uma certa combinação entre elas. Para Schumm (1972), essa característica é determinada principalmente pelo tipo de carga detritica, que corresponde à granulometria e à quantidade do material transportado pelo curso de água

em um determinado trecho. Assim, a fisionomia pode ser bastante variável tanto no espaço como no tempo, para um mesmo curso de água. À jusante, os cursos de água tendem a assumir um padrão tipicamente meandrante, o que caracteriza as chamadas torrentes de planície.

O reconhecimento de um trecho com comportamento anastomosado, mesmo sendo baseado simplesmente na observação visual, parece bastante seguro. O limite que distingue um trecho como meandrante ou retilíneo, entretanto, pode ser mais subjetivo. Por isso, para distingui-los, pode-se valer da proposta de Schumm (1972), que considera um trecho como meandrante quando seu índice de sinuosidade (Tabela 2.1), dado pela relação entre o comprimento do canal e o comprimento do vale (CHRISTOFOLLETTI, 1974, 1981), for superior a 1,3. A fisiografia do canal é importante no processo de manejo do curso de água, uma vez que é um indicativo do comportamento processual dominante no trecho.

29

**Tabela 2.1 – Divisão dos padrões fluviais, em função do índice de sinuosidade**

Tipos	Índice de sinuosidade
A) Meandrantes	
a) tortuosos	2,3
b) irregulares	1,8
c) regulares	1,7
B) Transicional	1,3
C) Retos	1,1

Esse índice presta-se para distinguir trechos retilíneos e sinuosos, podendo ser usado como fator de comparação entre estes.

Outro aspecto importante dos canais é a sua classificação como perene, intermitente e efêmero. Canais perenes são os que possuem escoamento independente das estações do ano, períodos ou regimes de precipitação. Já os cursos de água intermitentes só escoam em determinadas épocas do ano. Os canais efêmeros apresentam escoamento apenas durante as maiores precipitações, cessando seu fluxo pouco tempo após as chuvas. A atenção a essa classificação é importante, pois influi tanto na escolha quanto no planejamento de uma intervenção de manejo do curso de água.

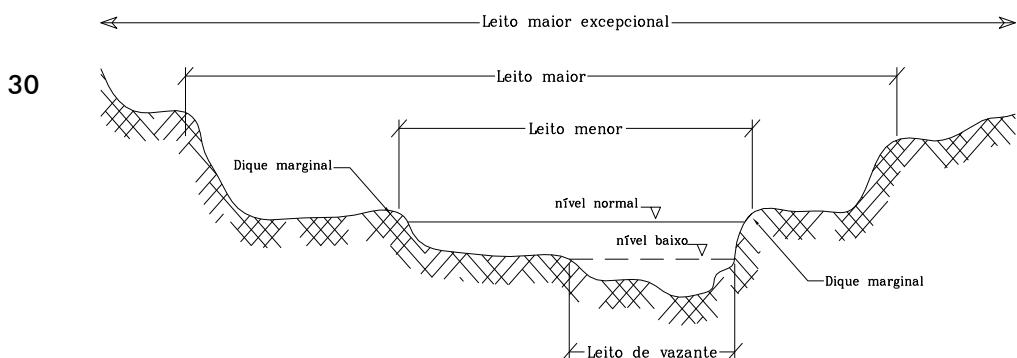
### 2.2.3 – Leito

O leito de um rio é a parte do sistema fluvial ocupada pela água por ele escoada e, portanto, pode variar ao longo do tempo e do espaço.

### 2.2.3.1 – Perfil transversal

O perfil transversal de um curso de água mostra as características de seu fundo e margem, em corte perpendicular a seu leito.

Esse espaço varia com a frequência e com o volume das descargas e de um setor a outro do mesmo curso de água, em decorrência das características particulares do trecho, principalmente da topografia (inclinação do leito). Uma classificação do leito pode ser feita segundo as indicações de Christofolletti (1981) e da *Federal Interagency Stream Restoration Working Group* (FISRWG, 1998), que distinguem o leito de vazante, o leito menor, o leito maior e o maior excepcional (Figura 2.3).



**Figura 2.3 – Tipos distintos de leito**

**Fonte:** adaptada de Christofolletti (1981) e FISRWG (1998).

O leito menor e o de vazante correspondem à parte ocupada pelas águas, cuja frequência de ocupação impede o surgimento de vegetação. O leito de vazante é identificado pela linha de máxima profundidade ao longo do canal, o talvegue. O leito maior é de ocupação sazonal, durante as cheias, e o maior excepcional, somente durante as grandes enchentes (CUNHA, 2001).

O reconhecimento do perfil transversal com seus diferentes leitos e seu regime de ocupação pelas águas (frequência e duração) é um aspecto importante e constitui pré-requisito para o emprego da Engenharia Natural no manejo de cursos de água, tendo-se em vista que a vegetação é uma de suas principais ferramentas.

### 2.2.3.2 – Perfil longitudinal

O perfil longitudinal de um curso de água mostra a variação da sua de-

clividade ou gradiente ao longo de seu desenvolvimento entre a nascente e a foz. Trata-se, também, de uma informação fisiográfica, especialmente importante para a compreensão e o controle dos processos fluviais (CHRISTOFOLLETTI, 1981).

A forma do perfil longitudinal de um curso de água correlaciona-se, seguramente, com suas demais características fisiográficas e hidráulicas e, consequentemente, relaciona-se com os processos fluviais.

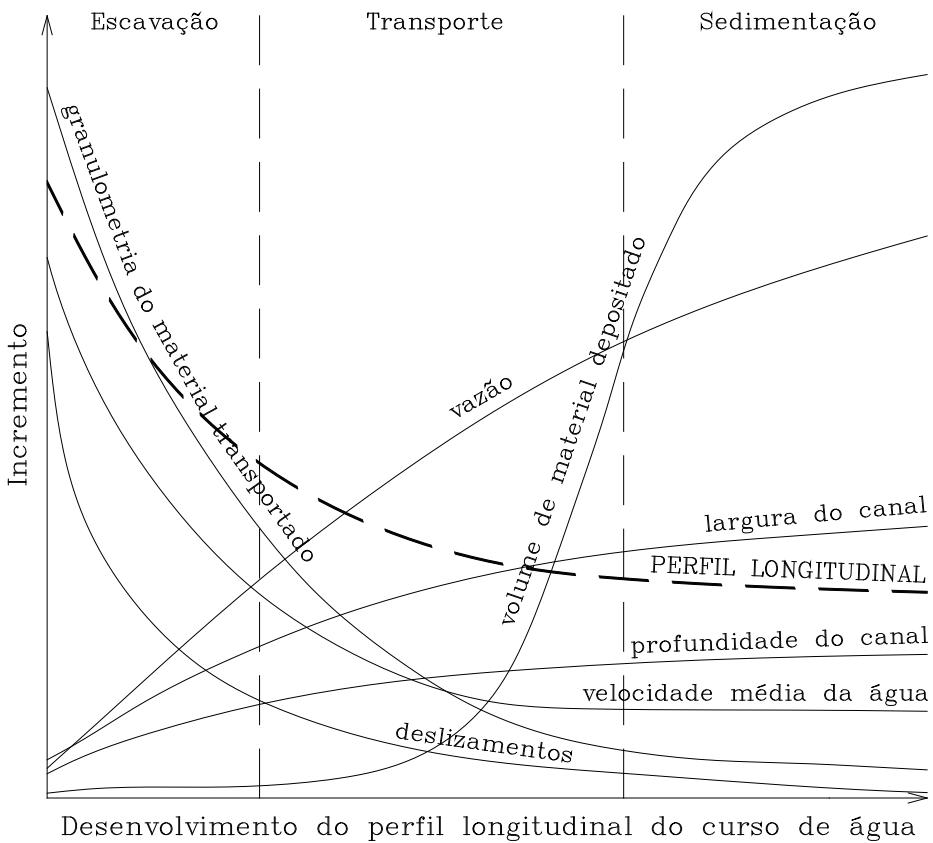
As configurações longitudinais de um rio e a velocidade de suas águas dependem de diversos fatores, tais como o regime pluvial da área de drenagem, a constituição litológica do substrato e a topografia, que intervém na declividade do canal. Conforme a região percorrida, um rio pode possuir um gradiente heterogêneo durante seu percurso, isto é, a velocidade e, por consequência, outras características podem variar com a maior ou menor inclinação do leito (LEINZ; AMARAL, 1978).

A representação gráfica do perfil longitudinal de um curso de água é simples e resulta na demonstração do percurso, visto de uma perspectiva em corte longitudinal. A altitude é demonstrada no eixo das ordenadas, com leituras que podem ser fixadas de acordo com a notação das curvas de nível, bem como qualquer outra informação altimétrica de que se disponha, e, no eixo das abscissas, é colocado o somatório das distâncias percorridas (distância acumulada ou progressiva) pelo curso de água entre cada cota. A escala utilizada para a representação da altitude no eixo das ordenadas pode ser maior que aquela utilizada para a representação do percurso no eixo das abscissas – normalmente dez vezes –, com o objetivo de tornar mais evidentes as características do perfil.

A FISRWG (1998) faz uma série de correlações simples, mas convenientemente elucidativas, do comportamento de um curso de água quando observado ao longo do desenvolvimento do seu perfil longitudinal (Figura 2.4).

Christofoletti (1981) afirma que um formato côncavo do perfil longitudinal reflete a maturidade do curso e o estabelecimento de um equilíbrio entre os processos de erosão, transporte e depósito dos sedimentos, que ocorrem, em regra, obedecendo ao típico desenvolvimento longitudinal do curso de água.

Na primeira porção do perfil longitudinal, os cursos de água possuem grande capacidade de escavação e transporte; em sua porção intermediária, a atividade predominante é o transporte dos materiais escavados a montante; e, ao final, a atividade processual mais evidente é a sedimentação. Esse comportamento se relaciona com a velocidade da água, por sua vez governada principalmente, pela declividade do leito, expressa pelo perfil longitudinal, pela seção transversal, pelas condições do material transportado, pelo revestimento das margens e do fundo do leito.



**Figura 2.4** – Mudança das características de um curso de água ao longo do seu perfil longitudinal

**Fonte:** FISRWG (1998).

O decréscimo na granulometria do material transportado está relacionado ao alcance das velocidades-limite (críticas) de transporte correspondentes à granulometria e à densidade de cada material, à medida que a velocidade da água diminui.

A compreensão dos fenômenos fluviais em relação às zonas do perfil longitudinal, como mostrados na figura 2.4, é fundamental para as atividades decisórias, de planejamento e de execução de intervenções ligadas ao manejo dos cursos de água.

## Bibliografia

- AULITZKY, H.; FIEBIGER, G. U.; DIERA, N. *Grundlagen der Wildbach und Lawinenverbauung*: Voläufige Studienblätter. Wien: Institut für Wildbach und Lawinenverbauung. Universität für Bodenkultur, 1990.
- BIGARELLA, J. J.; SUGUIO, K.; BECKER, R. D. *Ambiente fluvial*: ambientes de sedimentação, sua interpretação e importância. Curitiba: Ed. da UFPR, 1979.
- CHRISTOFOLETTI, A. *Geomorfologia*. São Paulo: Edusp, 1974.
- \_\_\_\_\_. *Geomorfologia fluvial*: o canal fluvial. São Paulo: Edgard Blücher, 1981.
- CUNHA, S. B. Geomorfologia fluvial. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. (Org.). *Geomorfologia*: uma atualização de bases e conceitos. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2001. p. 211-252.
- FISRWG. *Stream Corridor Restoration*: principles, processes, and practices. By the Federal Interagency Stream Restoration Working Group (FISRWG). 15º Federal Agencies of the US govt, 1998.
- LEINZ, V.; AMARAL, S. E. *Geologia geral*. 7. ed. São Paulo: Companhia Editora Nacional, 1978.
- MAYER, R. *Noções de hidráulica florestal*. Direção geral dos serviços florestais aquícolas. Alcobaça: Tip. Alcobacense, 1941.
- NETTO, A.; ALVAREZ, G. A. *Manual de hidráulica*. 7. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1982. v. 2.
- NETTO, A. L. C. Hidrologia de encosta na interface com a geomorfologia. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. (Org.). *Geomorfologia*: uma atualização de bases e conceitos. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2001. p. 93-148.
- PINHEIRO, R. J. B. *Estudo de alguns casos de instabilidade da encosta da Serra Geral no estado do Rio Grande do Sul*. 2000. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.
- SCHUMM, S. A. *River morphology*. Pennsylvania: DH&R, 1972.
- SILVEIRA, A. L. L. Ciclo hidrológico e bacia hidrográfica. In: TUCCI, C. E. M. (Org.). *Hidrologia*: ciência e aplicação. Porto Alegre: Editora da Universidade: ABRH: Edusp, 1993.
- SOUZA, E. B. *Fotointerpretação da rede de drenagem na diferenciação de unidades de mapeamento de solos ocorrentes na Depressão Central do Rio Grande do Sul*.

1977. Dissertação (Mestrado em Engenharia Rural) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 1977.

STRELA, G. *Grundriß der Wildbachverbauung*. Wien, 1934.

THIÉRY, E. *Restauration des montagnes*. Correction des torrents. Paris: Reboisements, 1891.

# 3

## PROCESSOS FLUVIAIS

### 3.1 – Introdução

O transporte de materiais sólidos é um dos aspectos mais importantes dos cursos de água, especialmente daqueles com características torrenciais. Assim, as redes hidrográficas são as principais vias para o transporte de produtos do intemperismo.

A movimentação de corpos sólidos pela água está relacionada com o comportamento de seu fluxo. Por um lado, enquanto o fluxo for normal, a movimentação pode se expressar em forma de erosões e transportes considerados normais. Por outro lado, quando ocorrem vazões maiores, os movimentos podem incluir deslizamentos e desmoronamentos catastróficos, com transporte de grandes quantidades de materiais, constituindo problemas ecológicos e tornando-se, muitas vezes, economicamente prejudiciais e socialmente perigosos. Como consequência, são comuns as deposições de materiais em áreas indesejadas e os entupimentos de calhas naturais ou escoadouros artificiais, com diversas consequências danosas sobre o meio ambiente e a economia.

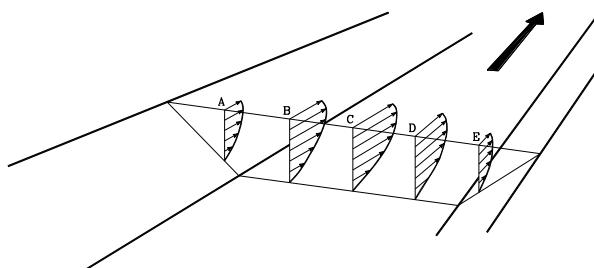
A compreensão dos mecanismos que determinam a deposição ou, ao contrário, a movimentação de corpos sólidos em um meio líquido é um dos fundamentos para o manejo de cursos de água. É com base nesse conhecimento que se pode compreender os fenômenos e selecionar as técnicas apropriadas para contornar ou minimizar os eventos considerados prejudiciais. Para tanto, é necessário que sejam conhecidas as formas de transporte, as características de cada material e seus respectivos comportamentos ao serem carreados. Precisa-se compreender também os conceitos de velocidade limite de transporte, de tensão limite de erosão, de profundidade e declividade limites.

### 3.2 – Velocidade da água

A velocidade do fluxo depende, em grande parte, da inclinação do leito. Quanto maior a inclinação do leito, maior será a velocidade da água e, portanto, maior será sua capacidade de transporte de materiais. Isso torna a análise do perfil longitudinal de um curso de água uma importante ferramenta para a compreensão dos fenômenos e processos fluviais (AULITZKY; FIEBINGER; DIERA, 1990).

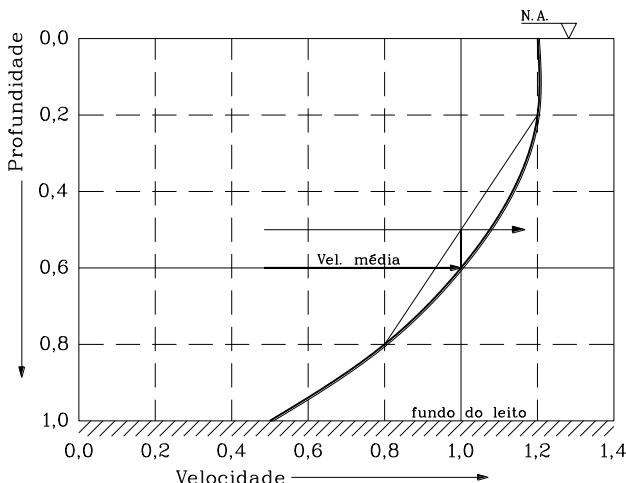
No curso superior de um rio, isto é, nas regiões próximas às cabeceiras, onde predominam as atividades erosiva e transportadora (Figura 2.4), há grande quantidade de detritos fornecidos pelo intemperismo e por movimentos de massa das encostas, que se somam aos detritos originados da atividade erosiva do próprio curso de água. Nessas condições, o rio aumenta a profundidade de seu leito, resultando numa forma de vale em “V”. Em sua porção média, graças à menor inclinação e velocidade das águas, o curso de água diminui seu poder transportador, permitindo a deposição de corpos sólidos maiores, que, por sua vez, protegem seu fundo contra o trabalho erosivo. Com o aumento da deposição de partículas nas regiões de menor velocidade, verifica-se uma mudança na configuração do leito (vale), que passará a ter a forma de um “U” bastante aberto e com a base muitas vezes maior que a altura. A erosão, que antes era em profundidade (escavação do fundo), agora passa a ser, predominantemente, lateral (SAWYER, 1975; LEINZ; AMARAL, 1978; BORDAS; SEMMELMANN, 1993).

A velocidade da água é função não apenas da declividade do perfil longitudinal, mas, como demonstram Netto e Alvarez (1982), altera-se também no sentido transversal do leito e canal. De um modo geral, a velocidade da água de um canal aberto diminui da superfície para o fundo e do centro para as margens, como resultado da resistência oferecida pelas paredes (margens) e pelo fundo (Figura 3.1), chamada de hipótese da camada limite. Na superfície livre, a resistência oferecida pela atmosfera também influencia, diminuindo um pouco a velocidade.



**Figura 3.1** – Variação da velocidade em uma seção transversal de um curso de água

Verticalmente, a velocidade máxima será encontrada em um ponto um pouco abaixo da superfície. A velocidade média localiza-se aproximadamente a 0,6 da profundidade, a contar da superfície, podendo ser mais bem determinada através da média das velocidades obtidas a 0,2 e 0,8 da profundidade (Figura 3.2).



37

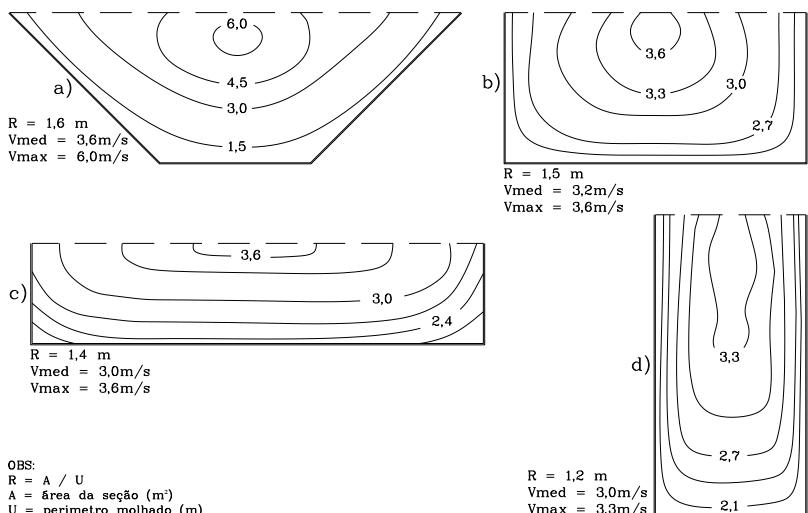
**Figura 3.2 – Variação vertical da velocidade de um curso de água (proporcional em relação à média)**

**Fonte:** Netto e Alvarez (1982).

Em uma perspectiva transversal ao curso de água, a distribuição das velocidades é fortemente influenciada pela geometria do canal (BANDINI, 1958; FELKEL, 1960). Devido ao atrito com o perímetro molhado, formas com maior raio hidráulico ( $R_h$ ) – relação entre a área molhada da seção transversal e o perímetro molhado – tendem a ter menor perda de velocidade, conforme esquema mostrado na figura 3.3.

Nos canais naturais assimétricos, as velocidades respeitam o padrão geral da forma geométrica mais aproximada, mas a zona de máxima velocidade é deslocada do centro para o ponto de maior profundidade.

A perda de velocidade também se dá com a existência de quedas e/ou ressaltos e com as mudanças no desenvolvimento horizontal do curso. Nos canais meandrantes, as curvas causam uma resistência adicional ao movimento (Figura 3.4), e a zona de maior velocidade desloca-se, por força inercial, para o raio externo, com respectiva perda de velocidade no raio interno. Devido à força centrífuga provocada pelo movimento da água no trecho curvo, verifica-se uma sobrelevação de nível na parte externa da curva (NETTO; ALVAREZ, 1982) e, segundo Leinz e Amaral (1978), um deslocamento do eixo do rio, ou seja, da zona de maior velocidade, nessa mesma direção.

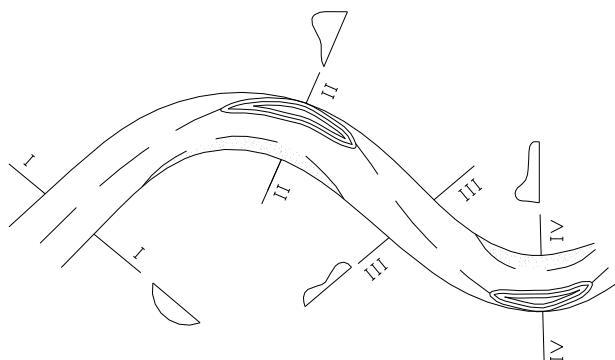


38

**Figura 3.3 –** Distribuição das velocidades da água, em função da geometria da seção transversal do canal, mantidas constantes a rugosidade e a inclinação transversal  
**Fonte:** Lame (1937) apud Christofoletti (1981).

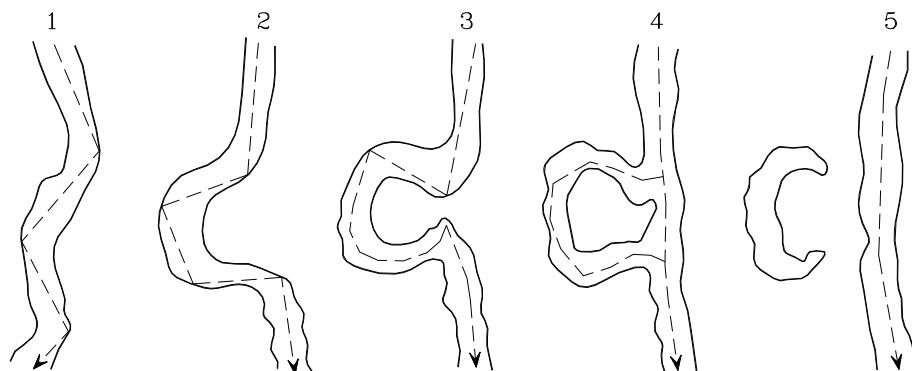
Acompanhando o eixo do curso de água, está a maior força erosiva e de transporte. O deslocamento do potencial de erosão e da capacidade de transporte, do centro para o raio externo da curva, causa a corrosão da margem e o aprofundamento do leito neste ponto.

A linha pontilhada na figura 3.4 mostra o deslocamento da zona de maior velocidade. Vê-se, nos perfis transversais I e III, situados em trechos retilíneos, que a velocidade da água tem distribuição simétrica e permanece relativamente pequena próximo às margens. Ao contrário, os perfis II e IV mostram grande velocidade da água próximo ao raio externo das respectivas curvas.



**Figura 3.4 –** Distribuição da velocidade da água em pontos de um curso meandrino  
**Fonte:** Weinmeister (1994).

As corrosões e os consequentes deslizamentos e desmoronamentos nos raios externos produzem os sedimentos que se depositam no raio interno das curvas seguintes (WOLLE, 1988). Com a ocorrência sucessiva de deslizamentos e sedimentações, durante um longo período de tempo, o canal pode tornar-se de tal maneira alargado e os meandros de tal forma complexos que deslocam o canal e suprimem trechos curvos, formando, assim, vários braços mortos denominados paleomeandros (Figura 3.5). Os paleomeandros, com as sucessivas enchentes, podem ser lentamente preenchidos por sedimentos finos (SAWYER, 1975; LEINZ; AMARAL, 1978).



39

**Figura 3.5** – Formação de um trecho curvo, até um paleomeandro

**Fonte:** Campos (1912).

Essa dinâmica de agradação e degradação contínua caracteriza os trechos meandrícos dos cursos de água de planície.

A formação de taludes fluviais instáveis e, portanto, sujeitos à movimentação é característica dos raios externos dos trechos curvos, onde a velocidade da água é maior, mas não exclusiva destes. A presença de árvores ou touceiras de taquara caídas, pedras de grandes dimensões e depósitos de seixos no leito dos cursos de água pode, de diversas maneiras, desviar a força da água para as margens e iniciar a corrosão, provocando a instabilidade do talude e diversas formas de deslizamento e desmoronamentos.

### 3.3 – Estabilidade de materiais fluviais

A erosão provocada por um curso de água resulta da escavação do seu próprio leito, fundo e margens, devido à constante alternância de forças de cisalhamento, de tração, de torção e de compressão, exercidas, principalmente, pela turbulência da água. Essas forças hidrodinâmicas, em

um dado momento, podem superar as de resistência (coesão e/ou peso das partículas), romper agregados e incorporar partículas ao fluxo, disponibilizando-as ao transporte. Nesse processo, não apenas partículas individuais, como areia, silte, pedregulho, seixos etc., podem ser incorporadas ao fluxo, mas também pequenas porções de agregados (BORDAS; SEMMELMANN, 1993).

A fração grossa da carga de sedimentos, como areias, seixos e cascalhos (Tabela 3.1), não possui coesão e, portanto, sua resistência ao deslocamento é função apenas de seus respectivos pesos (densidade e volume). Já a resistência ao deslocamento dos agregados de partículas finas, como silte e argila, é, por exceléncia, a força de coesão (Tabela 3.2). De acordo com Morisawa (1968), a força de cisalhamento provocada pela água é decisiva para desagregar e iniciar o movimento de partículas da fração fina, enquanto a velocidade do fluxo é a variável mais importante para iniciar o movimento das partículas maiores, sem coesão.

40

Uma vez que os materiais estejam disponíveis, eles podem ser transportados, basicamente, de três formas: dissolvidos na água, como sobrenadantes ou em suspensão (WEINMEISTER, 1994).

### **3.3.1 – Materiais dissolvidos**

Os materiais em solução na água têm origem na dissolução de sais encontrados nas rochas e no solo. O transporte de materiais dissolvidos tem importância relativamente pequena para o manejo de cursos de água, quando o objetivo é o escoamento sem danos. Sua ação, entretanto, pode se fazer sentir na degradação das rochas ou do terreno na bacia de recepção. Por esse ponto de vista, os materiais que se dissolvem com a água podem ser considerados precursores da movimentação de materiais, por deixá-los mais friáveis e disponíveis para o transporte.

### **3.3.2 – Materiais sobrenadantes**

Durante o período seco, muitos materiais (folhas, galhos, madeira, lixo etc.) são acumulados próximos aos cursos de água. Por ocasião das enchentes, as margens são inundadas, podendo recolher grandes quantidades desse tipo de material, que é, então, transportado flutuando na superfície. Tais materiais são depositados em outros locais, podendo causar vários problemas, que vão desde aspectos higiênicos até entupimentos e consequentes desvios do leito normal.

### **3.3.3 – Materiais em suspensão**

O grupo mais importante de materiais transportados pelos cursos de água é aquele em suspensão. Esse grupo pode ser dividido em dois subgrupos:

- Materiais em suspensão propriamente ditos;
- Materiais em arraste e saltação.

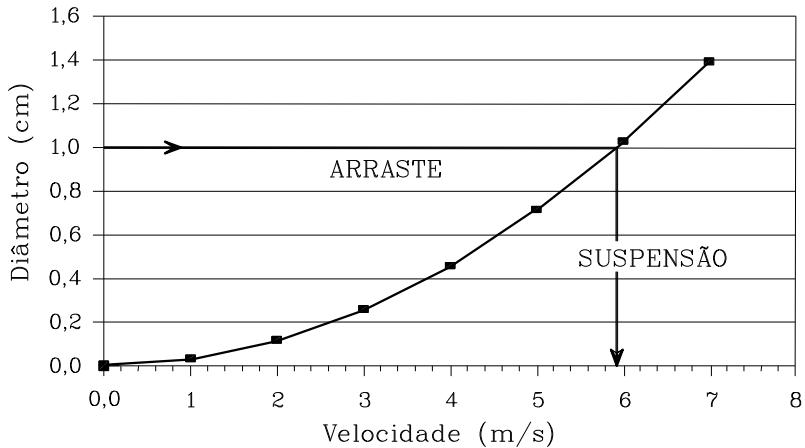
No primeiro subgrupo, enquadram-se as partículas que, oriundas da erosão ou do desgaste dos próprios materiais em transporte, movem-se por longos trechos suspensos na massa de água. Esses materiais depositam-se somente após acentuada redução da velocidade, ocasionada, por exemplo, pelo alcance de trechos menos declivosos ou mais largos. Assim, enquanto houver força para conservar as partículas acima da superfície do leito, há o transporte através da suspensão.

No segundo subgrupo, classificam-se os corpos sólidos que se movem deslizando e rolando no leito do curso de água ou dando pequenos saltos sobre ele. Quando a partícula é movimentada, há um soerguimento em relação à superfície do leito e ela se incorpora ao fluxo do fluido. A força de soerguimento, porém, diminui rapidamente, desaparecendo quase por completo à distância de 2,5 cm do leito (CARSON, 1971). Havendo diminuição da força de soerguimento, se não houver força de turbulência suficiente para manter as partículas suspensas e integradas no fluxo, estas tendem a se depositar. Ao atingirem as proximidades do fundo, novamente podem ser movimentadas pela força de soerguimento (CHRISTOFOLLETTI, 1981), de forma que o movimento se dá através de arraste e/ou saltação ao longo do escoamento do curso de água.

As razões para um ou outro comportamento são basicamente a dimensão e o peso específico dos detritos e a velocidade da água. A figura 3.6 mostra a linha limite para o comportamento de um material em transporte. Abaixo da curva, o transporte ocorre em suspensão, enquanto, acima dela, em arraste.

Uma partícula de 1 cm de diâmetro, por exemplo, é transportada em suspensão quando a velocidade da água for superior a 6 m/s e, em arraste, quando a velocidade for abaixo desse valor (esses limites devem ser entendidos como médios, pois podem mudar de acordo com o tipo de material).

Leinz e Amaral (1978), referindo-se ao assunto, esclareceram que as rochas maiores são empurradas e frequentemente tombam, enquanto que seixos menores rolam e pulam num movimento desordenado, seguindo as irregularidades do movimento turbinhonar, por sua vez, consequência das características do leito, da velocidade e da viscosidade (densidade) da água.



42

**Figura 3.6** – Comportamento de material transportado, em função de sua dimensão e da velocidade da água

**Fonte:** modificada de Weinmeister (1994).

Hjulstrom (1935) apud Christoforetti (1974, 1981) também relaciona a erosão e a deposição dos detritos em função do diâmetro das partículas e da velocidade da água (Figura 3.7). O mesmo autor lembra, corretamente, que as linhas demarcatórias da figura 3.7 devem ser entendidas como faixas, porque as velocidades variam também conforme outras características da água e das partículas (notadamente, seu peso específico). Sobre esse aspecto, é importante o trabalho de Mayer (1941), que descreve matematicamente essas relações (Item 3.5, Fórmulas 3.6 a 3.11).

Dessa maneira, o enquadramento de uma partícula sólida como material em suspensão ou em arraste pode ser alterado quando ocorrer modificação na velocidade da água.

No caso dos processos fluviais, e com vistas à estabilização dos cursos de água, a forma mais importante de transporte é a de suspensão, incluindo nesse conceito os dois subgrupos definidos por Weinmeister (1994): suspensão propriamente dita, e arraste e/ou saltação.

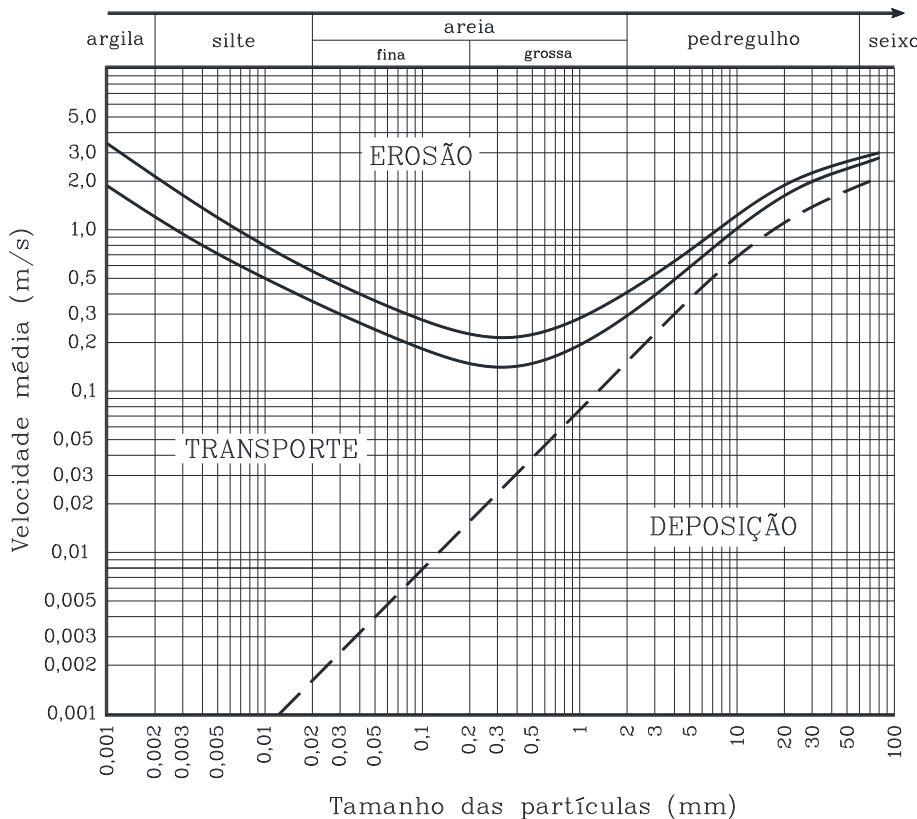
Mesmo que outras variáveis influenciem na movimentação de partículas da fração grossa do solo, entende-se como suficiente a relação existente entre o diâmetro da partícula transportada e a velocidade da água. Assim, o gráfico de Hjulstrom presta-se para evidenciar que as forças de resistência à erosão e ao transporte são de origens diferentes para as partículas finas (coloidais) e para os materiais grosseiros. A análise da figura 3.7 mostra claramente que, abaixo de 0,3 mm, quanto mais finas as partículas, maior será a velocidade da água necessária para desagregá-las

e pô-las em transporte. Tratando-se de substratos constituídos por partículas coloidais, a resistência à erosão se manifesta devido às suas forças de coesão, relacionando-se, portanto, de maneira inversa ao seu diâmetro, desde que se desconsidere a natureza mineralógica das partículas, que pode conferir características coesivas diferentes para materiais de dimensões similares.

Na parte central do gráfico de Hjulstrom, estão as partículas que correspondem ao diâmetro médio das areias e dos pedregulhos, onde a velocidade necessária para movimentação é baixa. Esses materiais não possuem coesão nem peso suficiente para oferecer maior resistência ao transporte. No entanto, à medida que o tamanho dos materiais aumenta, começa a surgir o efeito, agora direto, do peso da partícula na resistência ao movimento, e a velocidade necessária para provocar erosão e transporte começa a crescer novamente. Conforme Leinz e Amaral (1978), o diâmetro dos materiais mais grosseiros (com mesma densidade), transportados pela corrente, varia aproximadamente com o quadrado da velocidade. Assim, se a velocidade apenas dobrar, a água poderá transportar partículas com diâmetro quatro vezes maior.

Outra importante constatação evidenciada na figura 3.7 é a grande diferença – especialmente para as partículas menores – entre a velocidade necessária para a erosão e o transporte (linhas cheias) e para a deposição (linha pontilhada) de um mesmo material. Para a erosão de uma partícula de 0,1 mm, por exemplo, a velocidade da água deve estar em torno de 30 cm/s, enquanto, para sua deposição, ela precisa baixar para menos de 1 cm/s.

Para as partículas coloidais nem mesmo ocorre a deposição efetiva; isso se deve ao fato de que essas partículas não possuem tamanho e densidade suficientemente grandes para romper a resistência do meio fluido em que estão imersas, o que impede ou refreia sua queda. Tal comportamento oportuniza que tais partículas permaneçam em movimento, sobretudo pelo efeito de turbulência próximo ao fundo. Por isso, são importantes os estudos realizados por Bordas e Semmelmann (1993), pois, além de reconhecerem os fenômenos de erosão e transporte, dividem a sedimentação em decantação, depósito e consolidação. Os dois primeiros termos normalmente podem ser interpretados como um mesmo processo; decantação, no entanto, designa o momento no qual as partículas mais finas, transportadas em suspensão, param e tendem a estabelecer contato com o fundo. A deposição propriamente dita só ocorre quando a partícula realmente alcança o fundo e aí permanece até ser novamente movimentada ou, finalmente, consolidada pelo efeito da pressão hidrostática ou qualquer outro fenômeno que venha a aumentar a estabilidade dos depósitos.



**Figura 3.7** – Relação entre a velocidade da água, o tamanho das partículas e os processos fluviais

**Fonte:** modificada de Hjulstrom (1935) apud Christoforetti (1981).

A velocidade necessária para romper as eventuais forças coesivas dos materiais coloidais, bem como soerguer e manter a partícula incorporada ao fluxo é maior que a necessária para que (somente) seja mantido este último estágio. Já para as partículas maiores, a velocidade necessária para colocá-las em movimento e para mantê-las nesse estado é muito parecida. Assim, a velocidade limite de transporte (item 3.6) pode ser compreendida como a velocidade necessária para colocar materiais em movimento ou, então, para mantê-los em movimento.

Tendo em vista esses aspectos, areias finas e siltos são as porções de solo mais erodíveis, por terem pouca ou nenhuma coesão e por serem constituídos de partículas pequenas. Já as porções do solo constituídas por areias grossas, argilas e pedregulhos são menos erodíveis. No caso da argila, a resistência à erosão se origina principalmente da sua coesão, enquanto areias grossas e pedregulhos têm como principal fonte de resistência o tamanho das partículas.

### 3.4 – Transporte fracionado e em massa

Em razão das características dos cursos de água, os materiais carreados podem apresentar diversas dimensões e se comportar de diferentes formas. De conformidade com o processo, pode-se diferenciar o transporte parcial, também dito transporte fracionado, e o transporte em massa.

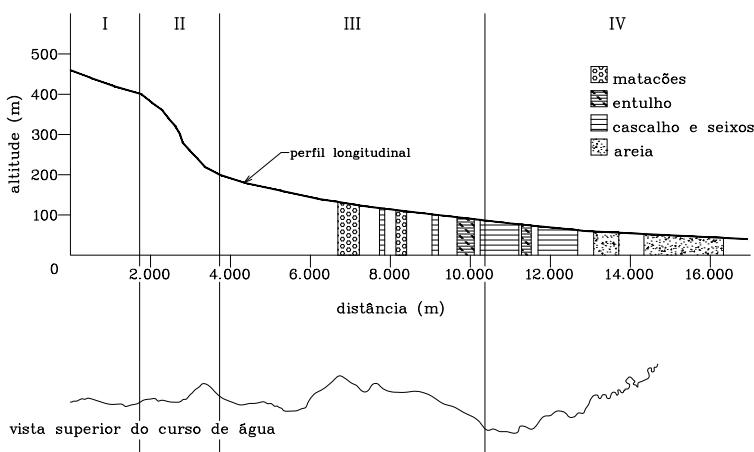
Devido às diferentes velocidades limites de transporte de cada um dos materiais, estes podem, frequentemente, ser transportados com velocidades diferentes, segundo o seu peso e suas dimensões: os menores mais rapidamente e os maiores de forma mais lenta. Os menores percorrem grandes trechos em suspensão, enquanto os maiores, em arraste ou saltação. Quando assim ocorre, o transporte é dito parcial ou fracionado.

O transporte parcial proporciona o sortimento de partículas quando ocorre a sedimentação: na montante, depositam-se os materiais maiores, enquanto os de menor granulometria são depositados em trechos situados mais abaixo (Figura 3.8).

45

Existem muitas ocasiões em que os materiais são transportados em conjunto, apresentando a mesma velocidade. Nesses casos, diz-se que há transporte em massa. Esse tipo de transporte é característico das corridas de lama, que ocorrem quando há precipitações de elevada intensidade, em locais de alta declividade. No transporte em massa, os movimentos individuais, independentemente do tamanho dos materiais, são impedidos pelos materiais vizinhos e todos assumem uma velocidade média, praticamente igual.

Quando ocorre um transporte em massa, o sortimento de partículas típico do transporte fracionado não pode ser identificado.



**Figura 3.8** – Deposição (ilhas) de diferentes materiais no Arroio Guarda-Mor, ao longo de seu perfil longitudinal - Faxinal do Soturno, RS

Com base na forma de transporte de materiais, Thiery (1891) propõe uma classificação para as torrentes:

- |                 |                                  |
|-----------------|----------------------------------|
| Regime normal   | – Período de estabilidade        |
| Cheia moderada  | – Período de transporte parcial  |
| Cheia grande    | – Período de transporte em massa |
| Cheia excessiva | – Formação de fluxos de lamas    |

Deve-se observar esses regimes de torrente, na escolha do período de retorno a ser utilizado para projeto e verificação de uma determinada intervenção ligada ao manejo de cursos de água.

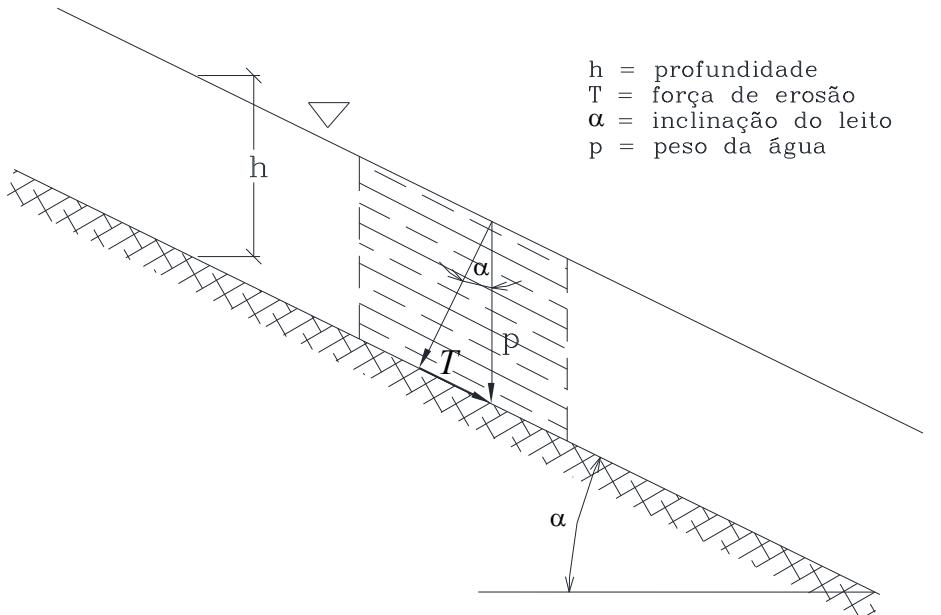
46

### **3.5 – Movimentação de materiais coesos**

Enquanto, para os materiais desagregados, não coesos, o fator determinante da movimentação é o tamanho (peso) das partículas, em materiais coesos os componentes mantêm-se unidos por forças eletrostáticas. Para desagregar e movimentar os materiais com coesão, é necessário o rompimento das forças eletrostáticas, que se contrapõem às forças de erosão.

A erosão hídrica de material coeso é determinada pela mineralogia, umidade e porosidade do material, além das características da água, que provoca o fenômeno. A capacidade de coesão de um agregado é tanto maior quanto menores forem as áreas específicas das partículas que o compõem. A alta resistência de um solo argiloso seco, por exemplo, deve-se ao grande número de ligações entre as partículas. Entretanto, em razão de sua polaridade, a água tem grande afinidade com outros materiais igualmente polares e pode, ao ser incorporada, diminuir o número de ligações entre as partículas e, consequentemente, baixar a resistência do agregado.

No fundo de um leito, são constantemente exercidas forças de cisalhamento, de tração, de torção e de compressão, devido à turbulência da água. Essas forças, em um dado momento, podem superar as forças de coesão, romper o agregado e transportar suas partículas. Para cada tipo de substrato existe, portanto, uma tensão de cisalhamento, a partir da qual o material, até então estável, entra em movimento. Essa tensão, característica de cada substrato, é conhecida como *tensão limite de erosão* (DU BOYS, 1879) (Figura 3.9).



47

**Figura 3.9 – Dedução gráfica da tensão de erosão ( $\tau$ )**

Formalmente, a tensão de erosão exercida no fundo de um curso de água pode ser descrita por Du Boys (1879):

$$\tau = \frac{T}{A} = \frac{P \cdot \text{sen} \alpha}{A} = \frac{\rho \cdot g \cdot h \cdot A \cdot \text{sen} \alpha}{A} = \rho \cdot g \cdot h \cdot \text{sen} \alpha \quad (3.1)$$

onde:

$\tau$  = tensão de erosão;

$\rho$  = massa específica da água;

$g$  = aceleração da gravidade;

$h$  = profundidade da água;

$A$  = área do fundo do leito onde atua a força  $T$ .

Para pequenos valores de inclinação,  $\alpha$  muito pequeno e área unitária ( $1m^2$ ), a equação 3.1 pode ser escrita como:

$$\tau = \rho \cdot g \cdot h \cdot I \quad (3.2)$$

onde:

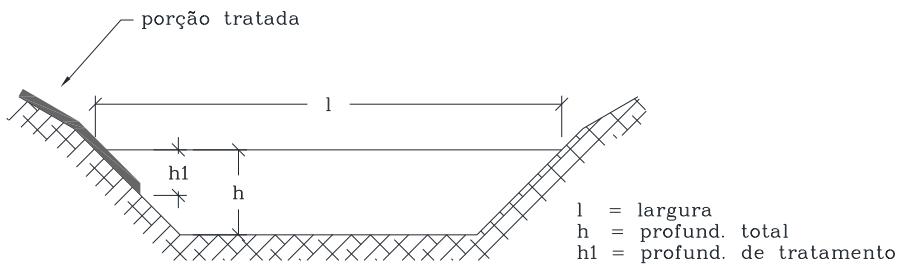
$I$  = inclinação do leito ( $\text{tg } \alpha$ ).

Assim a tensão de erosão é tanto maior quanto maior for a profundidade, o peso específico da água e a inclinação do leito.

A fórmula 3.2 tem validade quando a relação entre a largura e a profundidade do leito é superior a 30. Quando essa relação for inferior a esse valor, no lugar da profundidade ( $h$ ) utiliza-se o raio hidráulico  $R = A/U$  ( $A$  = área da seção dividida por  $U$  = perímetro molhado).

A fórmula também é diferente para a estimativa da tensão de erosão nas margens. Os tratamentos nas margens, muitas vezes, não são feitos da mesma forma até o fundo do leito, ficando acima deste. Assim, a profundidade a se considerar para o cálculo da tensão nas margens não corresponde à profundidade total do leito ( $h$ ), mas apenas àquela que se encontra sob tratamento ( $h_1$ ) (Figura 3.10).

48



**Figura 3.10** – Desenho esquemático de uma seção de vazão, evidenciando a profundidade de total ( $h$ ) e a de tratamento ( $h_1$ )

Para a relação largura/profundidade ( $l/h > 30$ ), a tensão existente nas margens pode ser calculada por:

$$\tau = \rho \cdot g \cdot h_1 \cdot I \quad (3.3)$$

onde:

$h_1$  = profundidade do tratamento (vide Figura 3.10),

e, para a relação largura/profundidade ( $l/h < 30$ ), por:

$$\tau = \rho \cdot g \cdot \frac{h_1}{h} \cdot I \quad (3.4)$$

A partir do cálculo da tensão de erosão existente (ou esperada para determinadas magnitudes de cheias), tem-se um dado que pode ser comparado com a tensão permitida por diferentes substratos (Tabelas 3.1 e 3.2), permitindo prever o comportamento do fundo e das margens.

As duas tabelas seguintes foram retiradas da norma alemã DIN 19 661, citada por Weinmeister (1994), e estabelecem a tensão de erosão permitida para substratos sem coesão (Tabela 3.1) e com coesão (Tabela 3.2).

**Tabela 3.1** – Tensão de limite de erosão para diferentes substratos desagregados

SUBSTRATO (sem coesão)	Granulometria (mm)	$\tau$ (máx.) (N/m <sup>2</sup> )
Areia fina	0,06 a 0,02	1,0
Areia média	0,2 a 0,6	2,0
Areia grossa	0,6 a 1,0	3,0
Areia muito grossa	1,0 a 2,0	4,0
Areia e cascalho sob longa submersão	0,6 a 6,3	9,0
Areia e cascalho sob curta submersão	0,6 a 6,3	12,0
Cascalho médio	6,3 a 20,0	15,0
Cascalho grosso	20,0 a 63,0	45,0
Sedimento achatado	(1-2 x 4-6 cm)	50,0

**Fonte:** DIN 19 661.

49

**Tabela 3.2** – Tensão de limite de erosão para diferentes substratos com coesão

SUBSTRATO (com coesão)	$\tau$ (máx.) (N/m <sup>2</sup> )
Areno-argiloso	2,0
Deposições argilosas	2,5
Argila firme	12,0
Cascalho e argila sob longa submersão	15,0
Cascalho e argila sob curta submersão	20,0

**Fonte:** DIN 19 661.

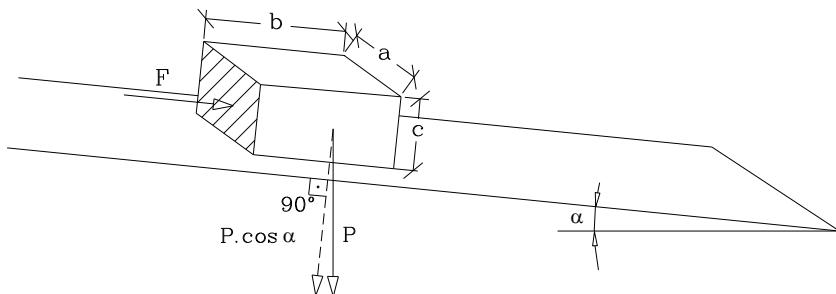
A comparação entre a tensão de erosão existente (calculada pelas Equações 3.1 a 3.4) com a tensão de erosão máxima permitida (Tabelas 3.1 e 3.2), além de permitir a verificação da estabilidade local, pode, inversamente, determinar a profundidade limite e a declividade limite de erosão, pressupondo-se que seja conhecido o tipo de substrato. Para uma tensão limite de erosão conhecida, fixando-se ou tendo limitação de valores para a profundidade (h), pode-se deduzir a declividade limite (I) ou, não sendo possível modificar a declividade, pode-se calcular a profundidade limite, por inversões da equação 3.2:

$$I = \frac{\tau}{\rho \cdot g \cdot h} \therefore h = \frac{\tau}{\rho \cdot g \cdot I} \quad (3.5)$$

### 3.6 – Movimentação de materiais singulares

Em consequência da desagregação das rochas na bacia de contribuição para uma determinada seção de controle e da erosão do fundo e das margens do leito, acumulam-se nos cursos de água materiais de diversas dimensões. Quando sobrevém uma cheia suficientemente grande, muitos materiais, dependendo de sua granulometria, forma e peso específico, poderão entrar em movimento.

Quando a água, com uma velocidade qualquer, choca-se com um sólido totalmente imerso e apoiado no fundo do leito, exerce sobre esse forças dinâmicas, tanto na sua face a montante como nas suas laterais e na face a jusante. Assim, para cada sólido, existe uma velocidade da água, a partir da qual este sai de seu estado de repouso e entra em movimento. A figura 3.11 representa um sólido qualquer, imerso no fundo do leito com inclinação igual a  $\alpha$ , com água fluindo em certa velocidade.



**Figura 3.11** – Esquema de um sólido submetido à força de impulsão da água

A força de arraste exercida pela água sobre o corpo representado na figura 3.11 é expressa pela fórmula da impulsão hidráulica de Newton:

$$F = \mu \cdot \gamma \cdot A \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (3.6)$$

onde:

$F$  = força de impulsão;

$\gamma$  = peso específico da água;

$A$  = área da face de encontro ( $a \cdot c$ );

$v^2/2g$  = cota piezométrica de energia cinética:

$v$  = velocidade da água;

$g$  = aceleração da gravidade;

$\mu$  = coeficiente para forma do corpo:

1,46 para corpos angulosos;

0,79 para corpos arredondados.

Por outro lado, o corpo apoiado no fundo do leito possui um peso total  $P$ . A componente normal do peso,  $N$ , portanto, é dada por:

$$N = P \cdot \cos\alpha \quad (3.7)$$

e oferece uma resistência ( $R$ ) em decorrência do atrito entre o corpo e a superfície do terreno, movimentação cuja magnitude é proporcional ao seu coeficiente de atrito ( $f$ ). 51

$$R = f \cdot P \cdot \cos\alpha \quad (3.8)$$

Em função do empuxo, o peso submerso do corpo é igual ao seu volume, multiplicado pela diferença de seu peso específico próprio ( $\gamma_1$ ) e o peso específico da água ( $\gamma$ ). O valor de  $P$  pode, então, ser substituído por  $a \cdot b \cdot c \cdot (\gamma_1 - \gamma)$ .

Assim, a resistência do corpo ao movimento ( $R$ ) pode ser descrita por:

$$R = f \cdot (\gamma_1 - \gamma) \cdot a \cdot b \cdot c \cdot \cos\alpha \quad (3.9)$$

onde:

$R$  = força de resistência;

$\gamma_1$  = peso específico do corpo sólido;

$\gamma$  = peso específico da água;

$\alpha$  = ângulo de inclinação do leito;

$f$  = coeficiente de atrito entre o sólido e o leito (médio 0,76);

$a, b, c$  = dimensões do corpo sólido.

Haverá estabilidade quando a força de atrito ( $R$ ) for maior ou, no mínimo, igual à força de arraste ( $F$ ).

$$F \leq R$$

$$\mu \cdot \gamma \cdot a \cdot c \cdot \frac{v^2}{2g} \leq f \cdot (\gamma_1 - \gamma) \cdot a \cdot b \cdot c \cdot \cos\alpha \quad (3.10)$$

Estabelecido o equilíbrio, qualquer aumento nos termos do lado esquerdo da equação, ou qualquer diminuição dos valores das variáveis do lado direito dela, proporcionará um desequilíbrio e o corpo poderá entrar em movimento. Pela transformação da igualdade anterior, ocorrerá equilíbrio exatamente quando a velocidade da água (agora representada por W) for (MAYER, 1941):

$$W = \sqrt{\frac{2g \cdot f \cdot b \cdot (\gamma_1 - \gamma) \cdot \cos\alpha}{\mu \cdot \gamma}} \quad (3.11)$$

À velocidade (W), descrita pela fórmula anterior, dá-se o nome de *velocidade limite de transporte* do sólido considerado (Tabela 3.3). Qualquer aumento da velocidade W provocará um estado de desequilíbrio, e o sólido entrará em movimento. Como já comentado (item 3.3.3), existem duas formas de interpretar a velocidade limite de transporte. A primeira delas a define como a velocidade necessária para colocar materiais em movimento, ao passo que a segunda a entende como a velocidade necessária para a deposição de materiais.

A tabela 3.3 apresenta valores de velocidade limite de transporte para materiais de diferentes dimensões (MAYER, 1941). Du Boys mediou a velocidade mínima para manter materiais em movimento, ao passo que autores alemães, no Rio Reno, e Telford apresentam a velocidade mínima para colocar em movimento materiais que se encontravam em repouso. A diferença entre os valores pode ser atribuída ao emprego de conceito e metodologia diferentes. A última coluna é formada pelo emprego da fórmula 3.11, simplificada ao se desprezar a influência do  $\cos\alpha$  por ter valor próximo a 1 e ao se assumir valores constantes para a massa específica da água ( $1.000 \text{ kg/m}^3$ ) e dos sedimentos ( $2.400 \text{ kg/m}^3$ ), para o coeficiente de atrito (0,76) e para o material anguloso (coeficiente de forma: 1,46).

Com essas simplificações, a velocidade limite de transporte pode ser descrita por:

$$W = \sqrt{14 \cdot b} \quad (3.12)$$

A fórmula 3.11 mostra claramente que, para cada sólido, em cada situação de declividade e de peso específico da água, existe uma velocidade limite de transporte particular. Assim, por exemplo, sólidos de pequenas dimensões e baixo peso específico entram em movimento mais facilmente, isto é,

têm velocidade limite de transporte menor do que os maiores e mais densos.

Observando-se os termos da fórmula 3.10, constata-se que o equilíbrio, ou seja, a estabilidade dos materiais, depende de dois grupos distintos de fatores. De uma parte, o equilíbrio depende de um conjunto de características intrínsecas do corpo em questão, como sua forma, dimensão, peso específico e coeficiente de atrito. De outra parte, o equilíbrio é influenciado pelas características da água, isto é, seu peso específico (viscosidade) e velocidade, função, entre outros fatores, do ângulo de inclinação do curso de água.

**Tabela 3.3** – Velocidade limite de transporte para materiais de diferentes dimensões. Na última coluna, W foi calculado pela fórmula 3.12

b (mm)	Velocidade limite de transporte (m/s)			
	Du Boys	Rio Reno	Telford	W
0,05	0,081		0,152	0,026
0,10	0,108			0,037
0,20	0,162			0,053
0,25			0,305	0,059
0,50	0,216			0,084
4,00		0,750	0,609	0,235
8,00	0,325	0,900		0,333
25,0	0,650		0,914	0,590
50,0	0,975			0,820
75,0		1,590		1,025
100,0		1,800		1,182

O coeficiente de atrito, a forma, assim como a dimensão “b” (figura 3.11) do material podem ser modificados com vistas à estabilização. Pela análise da figura 3.11, verifica-se que a dimensão b do material, isto é, aquela que se encontra paralela ao sentido do fluxo da água, é determinante para a velocidade limite de transporte. Quanto maior o valor de b, tanto maior deverá ser a velocidade da água, para causar movimentação. Essa constatação pode ser usada para estabilização, arranjando os materiais com sua maior dimensão posicionada no sentido da corrente. Essas observações valem somente para material disposto no fundo do leito e não nas margens, em função da própria incli-

nação destas. Por outro lado, consegue-se modificar, simultaneamente, a forma, a dimensão b e o coeficiente de atrito na medida em que for possível a união dos diversos materiais do leito, de maneira a obrigar os ao trabalho solidário. Essa união pode ser de diversas formas, como será visto mais adiante, no Capítulo 7.

Pela observação da fórmula 3.10, depreende-se, ainda, que o equilíbrio é função da velocidade limite de transporte e do peso específico da água. Águas barrentas ou transportando outros materiais em suspensão conseguem, portanto, colocar em movimento materiais cuja velocidade limite de transporte só seria alcançada com maior velocidade se as águas fossem limpas. Esse fato não pode ser usado diretamente no controle dos cursos de água, todavia seu conhecimento alerta para a necessidade de cuidados especiais para a estabilização.

54

Por outro lado, a velocidade limite de transporte depende da inclinação do leito, expressa pelo coss. Assim, quanto maior a inclinação do leito, maior será a velocidade da água e, portanto, maior será sua capacidade de transporte de materiais. À medida que a declividade aumenta, maiores materiais terão sua velocidade limite de transporte alcançada. Com base nesse fato, foram desenvolvidos métodos de controle de cursos de água (especialmente para os de comportamento torrencial), que têm como objetivo primário a diminuição da velocidade da água.

### 3.7 – Perfil de compensação

Um curso de água com características torrenciais está, frequentemente, escavando seu leito ou suas margens, devido ao poder erosivo de seu fluxo, decorrente, principalmente, da declividade de seu leito.

A declividade do fundo do leito, à qual corresponde o estado de equilíbrio ou de estabilização, denomina-se *declividade de compensação*. Assim, a estabilização pode ser atingida pelo rebaixamento da velocidade atual para a velocidade limite de transporte (de materiais de determinadas dimensões que se quer depositar). Teoricamente, isso pode ser conseguido por saturação, pela diminuição da declividade ou pela alteração do raio hidráulico e da rugosidade do leito.

Considere-se um trecho qualquer de um curso de água, cujo leito possui uma declividade formando um ângulo  $\alpha$  em relação à horizontal: a velocidade média da água ( $V_m$ ) pode ser expressa pela fórmula 3.13 de Manning-Strickler:

$$V_m = K \cdot R^{\frac{2}{3}} \cdot I^{\frac{1}{2}} \quad (3.13)$$

onde:

$V_m$  = velocidade média da água;

$K$  = coeficiente de rugosidade para canais (Tabela 3.4);

$R = A/U$  = raio hidráulico;

$A$  = área da seção transversal;

$U$  = perímetro molhado;

$I$  = inclinação do leito ( $m/m$ ).

Quando, devido à diminuição do ângulo  $\alpha$ , a velocidade média ( $V_m$ ) se igualar à velocidade limite de transporte ( $W$ ), ter-se-á alcançado a declividade de compensação,

55

$$V_m = W$$

isto é:

$$K \cdot R^{\frac{2}{3}} \cdot I^{\frac{1}{2}} = \sqrt{\frac{2g \cdot f \cdot b \cdot (\gamma_1 - \gamma) \cdot \cos\alpha}{\mu \cdot \gamma}} \quad (3.14)$$

A equação 3.14 não é linear em relação a  $I$ , por exemplo, uma vez que o raio hidráulico e a velocidade são dependentes da inclinação do terreno. Essas equações podem ser resolvidas por métodos aproximados iterativos.

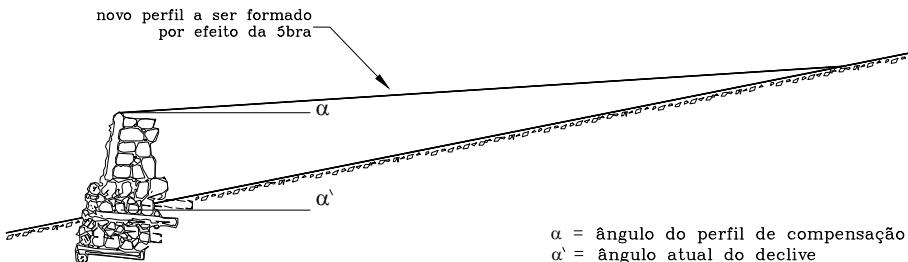
Ao se modificar as propriedades de escoamento do canal, quer pela alteração de sua forma (provocando, assim, mudança do raio hidráulico), quer pela interferência em sua rugosidade, pode-se estabelecer uma declividade desejada ( $\alpha_1$ ), chamada *declividade* ou ângulo de compensação (Figura 3.12). A declividade desejada pode também ser alcançada apenas com a modificação da velocidade da água ou, ainda, com a modificação simultânea das propriedades do canal e da velocidade da água. A opção de mudança de uma ou outra variável depende das condições locais e deve ter como objetivo a estabilização do leito ao menor custo.

**Tabela 3.4** – Coeficiente de rugosidade para canais (K), de Gaukler-Manning-Strikler

Tipo de canal - trechos:	Características do leito	K
Naturais	Fundo firme sem irregularidades	40-42
	Com seixos médios	35-38
	Margem vegetada (ervas, gramíneas)	30-35
	Com seixos grosseiros e irregulares	30
	Torrentes de montanha com sedimentos estáticos	25-28
	Torrentes de montanha com sedimentos em movimento	19-22
Artificiais (tratados)	Terra firme e lisa	60
	Fundo arenoso com seixos e margem revestida c/ pedras	45-50
	Areia, argila ou cascalho recobertos com vegetação densa	20-26
	Concreto	80-100

**Fonte:** Rössert (1974) apud Florineth (2004).

Da expressão da equação 3.14, pode-se inferir que, quanto maior o raio hidráulico, tanto menor será o ângulo de compensação. Assim, mudanças drásticas da seção de vazão natural, geralmente irregular e coberta de vegetação, para formas geométricas definidas fazem aumentar o raio hidráulico, desfavorecendo a formação de perfis de compensação estáveis e com declividade alta. Por outro lado, cada diminuição da velocidade da água, decorrente da construção de obras transversais, por exemplo, faz com que seja alcançada a velocidade limite de transporte para os materiais de granulometria cada vez menor, provocando sua deposição. Disso resulta a formação de um aterro a montante da obra, com um ângulo de inclinação ( $\alpha$ ) menor do que aquele do leito original ( $\alpha'$ ). Um corte ao longo do eixo da torrente mostra o chamado *perfil de compensação* (Figura 3.12), que depende também das características geométricas do fluxo, do tamanho característico do material do leito e das condições hidráulicas da seção do curso de água.



**Figura 3.12 – Perfil de compensação formado por meio de obra transversal**

A menor declividade do perfil de compensação, por sua vez, favorece o escoamento mais lento da água, ou seja, diminui seu poder de erosão, resultando na estabilização no trecho de ação da obra transversal.

A partir da inclinação original do leito e do ângulo do perfil de compensação esperado, pode-se calcular o comprimento do leito corrigido por uma obra transversal de altura conhecida ou, inversamente, calcular a altura necessária de uma obra transversal, para corrigir um trecho de comprimento desejado, como está demonstrado no Capítulo 7.

## Bibliografia

AULITZKY, H.; FIEBIGER, G. U.; DIERA, N. *Grundlagen der Wildbach und Lawinenverbauung: Vorläufige Studienblätter*. Wien: Institut für Wildbach und Lawinenverbauung. Universität für Bodenkultur, 1990.

BANDINI, A. *Hidráulica fluvial*. São Carlos: Serviço de Publicações da Escola de Engenharia de São Carlos, 1958.

BORDAS, M. P.; SEMMELMANN, F. R. Elementos de engenharia de sedimentos. In: TUCCI, C. E. M. (Org.). *Hidrologia: ciência e aplicação*. Porto Alegre: Editora da Universidade: ABRH: Edusp, p. 915 - 943, 1993.

CARSON, M. A. *The mechanics of erosion*. Londres: Pion Limited, 1971.

CAMPOS, G. *Mappa florestal*. Ministério da Agricultura, Indústria e Comércio, Serviço geológico e mineralógico do Brasil. Rio de Janeiro: Typ. da Diretoria do Serviço de Estatística, 1912.

CHRISTOFOLETTI, A. *Geomorfologia*. São Paulo: Edusp, 1974.

\_\_\_\_\_. *Geomorfologia fluvial: o canal fluvial*. São Paulo: Edgard Blücher, 1981.

DU BOYS, P. Le Rhône et les rivières a lit affouillable. *Annales des Ponts et Chaussées*, ser. 5, v. 18, p. 141-195, 1879.

FELKEL, K. *Gemessene Abflüsse in Gerinnen mit Weidenbewuchs*. Helf 15, Karlsruhe, Mitt. Bundesanstalt für Wasserbau, 1960.

FLORINETH, F. *Pflanzen statt Beton*. Handbuch zur Ingenieurbiologie und Vegetationstechnik. Patzer Verlag Berlin – Hannover, 2004. 282 Seiten.

LEINZ, V.; AMARAL, S. E. *Geologia geral*. 7. ed. São Paulo: Companhia Editora Nacional, 1978.

MAYER, R. *Noções de hidráulica florestal*. Direção geral dos serviços florestais aquícolas. Alcobaça: Tip. Alcobacense, 1941.

MORISAWA, M. *Streams: their dynamics and morphology*. New York, 1968.

58 NETTO, A.; ALVAREZ, G. A. *Manual de hidráulica*. 7. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1982. v. 2.

SAWYER, K. E. *Landscape studies; an introduction to geomorphology*. London: Edward Arnold, 1975.

THIERY, E. *Restauration des montagnes*. Correction des torrents. Paris: Reboisements, 1891.

WEINMEISTER, H. W. *Vorlesung Wildbachkunde*: Skriptum, vorläufige Ausgabe. Wien: Institut für Wildbach und Lawinenschutz. Universität für Bodenkultur, 1994.

WOLLE, C. M. Mecanismos de instabilização de encostas na Serra do Mar. In: ENCONTRO TÉCNICO – ESTABILIDADE DE ENCOSTAS, 1988, São Paulo. *Anais...* São Paulo: ABMS, 1988. p. 16-36.

# 4

## MOVIMENTOS DE MASSA

### 4.1 – Introdução

Os movimentos de massa são, assim como os processos de intemperismo e erosão, fenômenos naturais, constantemente atuantes, de dinâmica externa, que modelam a paisagem da superfície terrestre (CASSETI, 1994; FERNANDES; AMARAL, 1998).

Os movimentos coletivos de solos e de rocha, como também são chamados os movimentos de massa, possuem valor de estudo à medida que se deseja compreender o desenvolvimento e a modelagem do relevo, com intuito de influenciar tais processos. De acordo com Guidicini e Nieble (1983), esse aspecto é de importância econômica e de interesse acadêmico para diversas categorias de profissionais.

Em virtude da diversidade de enfoques, da complexidade dos processos envolvidos e da variedade de ambientes em que esses movimentos têm lugar, a literatura especializada não é unânime quanto a um sistema de classificação, tanto em relação às formas de movimentos de massas como em relação a seus agentes e suas causas (GUIDICINI; NIEBLE, 1983; PINHEIRO, 2000).

Neste capítulo, será apresentado um sistema de classificação dos movimentos de massa, baseado em trabalhos de autores como Weber (1964), Varnes (1978), Freire (1965) citado e modificado por Guidicini e Nieble (1983) e Weinmeister (1994). Com relação a esse tema, não se tem a pretensão de corrigir ou modificar quaisquer propostas já existentes, mas sim organizar as diferentes contribuições em uma classificação simplificada, que possa ajudar a compreender os fenômenos de movimentação mais comuns em nosso meio, principalmente aqueles ligados aos processos fluviais e de interesse para o manejo biotécnico de cursos de água.

## 4.2 – Classificação dos movimentos de massa

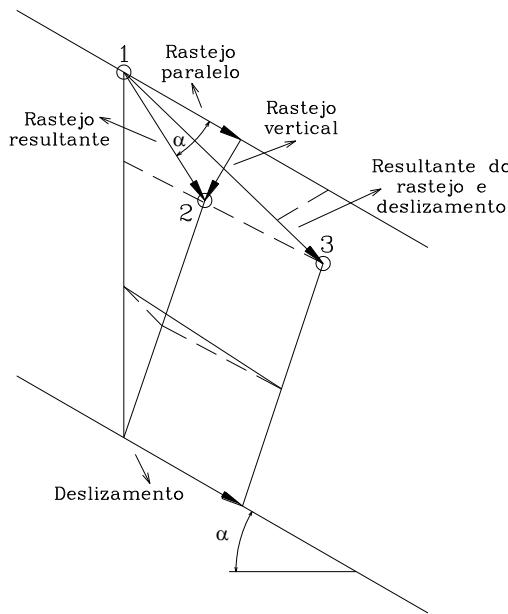
### 4.2.1 – Escoamento

O movimento conhecido como escoamento ou fluimento se divide em duas formas: os rastejos e os fluxos, também chamados de corridas. A principal característica desses tipos de movimento é que o corpo (massa) parece se comportar como um fluido escoando em uma direção, sem que se reconheça uma linha de ruptura.

#### 4.2.1.1 – Rastejo

Muitas vezes, massas de material terroso e/ou rochoso podem estar em movimento de rastejo (LOPES, 1995), ou seja, sofrem uma deformação interna, muito lenta – alguns centímetros por ano – e plástica, isto é, irreversível (Figuras 4.1 e 4.2).

60

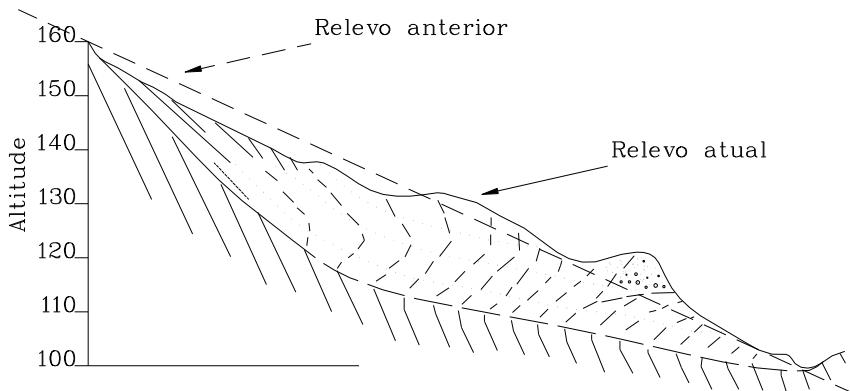


**Figura 4.1** – Movimento teórico de um ponto, em razão do rastejo e deslizamento  
**Fonte:** Laatsch e Grottenthaler (1972).

O rastejo é muito comum em massas de neve, mas também ocorre em massas de solo/rocha. A análise da figura 4.1 esclarece esse fato. Sobre uma encosta rochosa com certa inclinação ( $\alpha$ ), existe uma camada espessa de

material. Observe, nessa figura, o ponto 1 como referência. Com o passar do tempo, ele se desloca para frente (rastejo paralelo à encosta) e, simultaneamente, para baixo (rastejo vertical). A resultante desses dois movimentos leva o ponto à posição 2. Se nessa encosta ocorrer ainda um deslizamento, a posição final do ponto será a posição 3, resultado dos movimentos de rastejo e de deslizamento, em conjunto.

O mecanismo de movimento lento, esquematizado na figura 4.1, também pode ser visualizado na representação em corte longitudinal de uma encosta, mostrado na figura 4.2.



61

**Figura 4.2** – Movimento de rastejo de uma massa de solo (altitude em metros)

**Fonte:** modificada de Laatsch e Grottenthaler (1972).

A encosta, anteriormente um plano inclinado, vai lentamente rastejando, o que provoca um rebaixamento do terreno em sua área superior e um consequente acúmulo de materiais em sua parte inferior, resultando em uma encosta com perfil ondulado.

Esse comportamento pode ser de tal maneira lento que só é denunciado pelo crescimento recurvado dos troncos das árvores, pela inclinação de postes, pelo deslocamento de blocos de pedra e pela movimentação de construções ou pelo monitoramento de marcos artificiais.

#### 4.2.1.2 – Fluxos ou corridas

As corridas se diferenciam dos rastejos principalmente pela velocidade com que o fenômeno ocorre. São formas rápidas de escoamento, que possuem um caráter essencialmente (mas não apenas) hidrodinâmico, ocasionado pela perda de atrito interno, em virtude da destruição da estrutura, em presença de excesso de água (GUIDICINI; NIEBLE, 1983).

Uma determinada massa de solo, ou mesmo solo e rochas, pode adquirir diferentes graus de fluidez, na dependência das próprias características físicas da massa em questão e da quantidade de água que, por algum mecanismo, lhe é adicionada. Vibrações e terremotos também podem desencadear esse tipo de movimento, mesmo com umidade menor. As corridas podem ser de terra, areia ou silte e comportam-se com diferentes graus de fluidez, conforme o material predominante transportado. Os fluxos de lama, por exemplo, são de extrema fluidez, causados, normalmente, pela grande remoção de solo por um curso de água, no momento de uma grande enchente. Nesse caso, em que um curso de água se comporta como eixo de recorrência do fenômeno, são os diversos movimentos de massa (deslizamentos e desmoronamentos) que ocorrem na bacia de captação, que alimentam com sedimentos a torrente de transporte, dando origem a uma corrida ou fluxo de lama.

62 Mesmo na ausência de água, quando materiais compostos por partículas finas e pouco coesas se acumulam, também se pode ter movimentos de fluxo. A estabilidade das faces inclinadas de uma duna de areia, por exemplo, fica na dependência de sua baixa resistência ao cisalhamento, e qualquer pequena força (como a provocada pela deposição de mais material sobre o topo da duna) pode ser suficiente para irromper a movimentação rápida e instantânea de uma parte da massa.

#### 4.2.2 – Deslizamento

O termo “escorregamento”, sinônimo de “deslizamento”, tem sido comumente utilizado no sentido de abranger todo e qualquer movimento coletivo de materiais terrosos e/ou rochosos, independentemente da diversidade de processos, causas, velocidade e formas (GUIDICINI; NIEBLE, 1983).

Os deslizamentos propriamente ditos podem ser caracterizados, ainda, segundo vários critérios que ajudam a compreender o evento e, quando analisados em conjunto, permitem que se tomem as medidas preventivas ou corretivas acertadas. Os critérios mais importantes de classificação são os que levam em consideração a superfície de movimentação, as formas com que se manifestam as geomassas movimentadas e, especialmente, as causas de sua ocorrência. Esse é o tipo de movimento de massa mais comum no ambiente fluvial, por isso será tratado de forma mais aprofundada no Item 4.3.

##### 4.2.2.1 – Superfícies e formas de deslizamentos

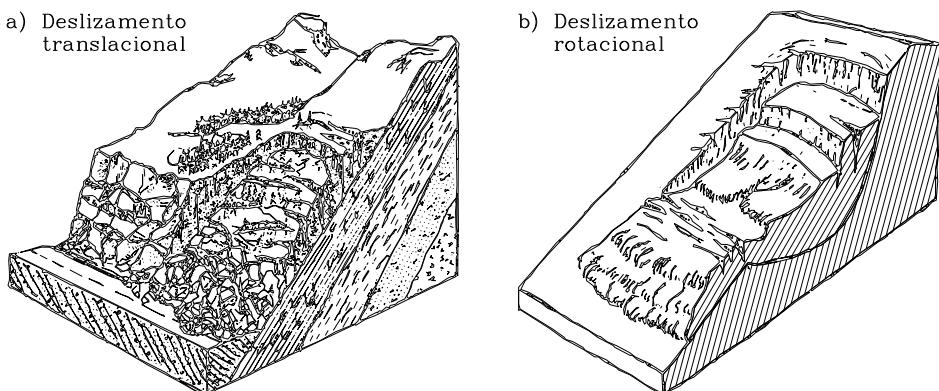
Segundo Varnes (1978), os deslizamentos podem ser divididos em translacionais e rotacionais. Os primeiros ocorrem, normalmente, sobre superfícies

de deslizamento preexistentes, enquanto, nos segundos, não é possível fazer uma distinção clara entre a massa que deslizou e a que ficou estável.

O deslizamento translacional ocorre sobre uma superfície favorável preexistente e tem uma espessura similar em toda a sua extensão, sendo, por isso, também conhecido por deslizamento em forma de placa ou folha. Trata-se, pois, da movimentação de uma massa com determinadas características, sobre uma superfície com características distintas, como, por exemplo, o deslizamento de terra sobre o arenito ou outra rocha matriz (Figura 4.3a). Esse tipo de fenômeno ocorre quando a resistência ao cisalhamento entre as superfícies das duas massas é superada pela componente horizontal do peso da massa com tendência a deslizar.

Além de apresentar profundidade constante, os deslizamentos sobre superfícies preexistentes caracterizam-se por ser movimentos de translação, isto é, toda a massa se desloca sobre a superfície, sem movimento rotativo, ao contrário do que ocorre na erosão superficial e formação de voçorocas (entalhamento).

Já o deslizamento rotacional tem forma arredondada, embora seja causado igualmente por água de infiltração. Após o deslizamento, verifica-se uma escavação em forma de concha, cujo centro, geralmente, é a parte mais profunda (Figura 4.3b).

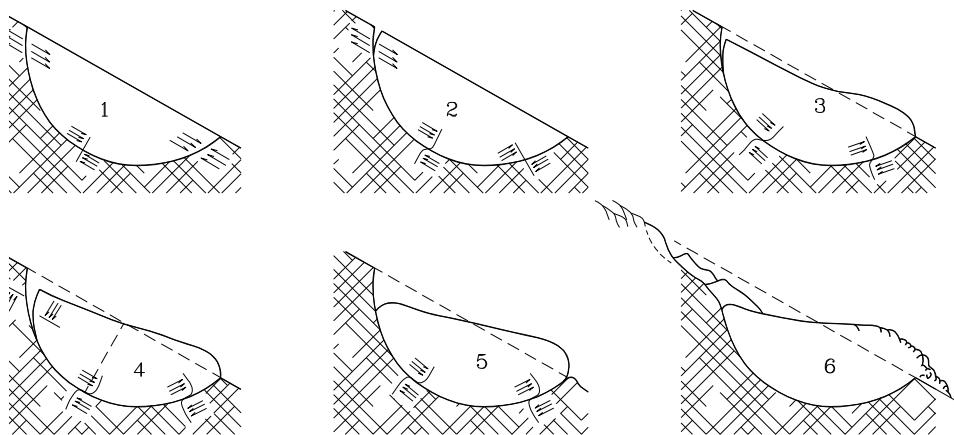


**Figura 4.3** – Tipos de deslizamentos (WEBER, 1964):

a) translacional, em forma de placa, b) rotacional, em forma de concha

Diferentemente da movimentação em forma de placa (translacional), não há diferença marcante entre a massa que deslizou e a que permaneceu imóvel. Não há, portanto, uma superfície de deslizamento preexistente: esta se forma apenas durante o acontecimento do fenômeno e corresponde à zona de maior tensão de cisalhamento.

Esse tipo de movimento tem uma dinâmica própria, compreendendo vários estágios, esquematizados na figura 4.4.



64

Figura 4.4 – Estágios de um deslizamento de rotação

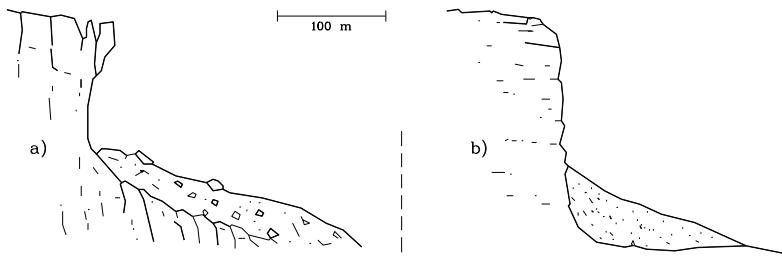
O primeiro estágio é invisível e corresponde ao surgimento de tensão de compressão na parte inferior, de tração na parte superior e de cisalhamento na área mediana do possível deslizamento. No segundo estágio, percebe-se uma ruptura, visível na parte superior. No terceiro estágio, há um nítido aumento da fenda na parte superior e elevação de massa na parte inferior. No quarto e quinto estágios, ocorre o deslizamento propriamente dito, que tem um sentido de rotação. No sexto estágio, acontecem diversos movimentos de acomodação, em que participam desmoronamentos e deslizamentos secundários.

#### 4.2.3 – Desmoronamento

Como desmoronamentos, são classificados desde a queda de rochas singulares até a queda de grandes massas de solo/rochas, como mostrado na figura 4.5.

Desmoronamentos são movimentos predominantemente verticais, de diferentes magnitudes. Na literatura especializada, o termo “desmoronamento” pode aparecer sob a denominação de “tombamento” ou “basculamento”.

Os desmoronamentos podem ter múltiplas causas, sendo as principais de natureza física, como a ocorrência de eventos tectônicos, a contração e dilatação de massas pelo calor, a pressão causada pelas raízes de plantas ou pela formação de gelo e outros cristais, em conjunto com a ação da gravidade.



**Figura 4.5 – Desmoronamento de rochedos (a) e sedimentos finos (b)**

No item desmoronamento, pode-se acomodar também os movimentos conhecidos como subsidências, em todas as suas formas, que vão de pequenos assentamentos, subsidências propriamente ditas, recalques ou desabamentos. Trata-se de movimentos verticais do solo causados, em geral, devido à solução de sais, a escavações subterrâneas naturais pela água ou a escavações artificiais, como túneis, minas ou exploração de depósitos petrolíferos. Esse tipo de fenômeno, em proporções que venham a causar maiores problemas, é relativamente raro no Brasil e mesmo de menor relação com a questão dos cursos de água.

65

#### **4.2.4 – Movimentos complexos**

Por movimentos complexos entendem-se aqueles que resultam de uma combinação das diferentes formas de movimento, conforme visto anteriormente. Os fenômenos são, ainda, causados pela ação de vários agentes em trabalho simultâneo, resultando em um processo dinâmico e contínuo de erosão, transporte e posterior sedimentação.

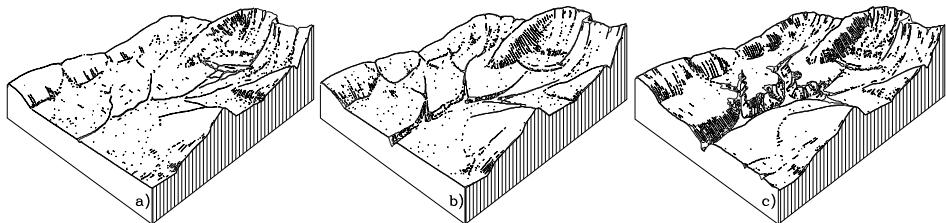
É fácil verificar eventos de ocorrência comum combinarem várias formas de movimento e transporte de materiais erodidos, ou mesmo alterarem seu comportamento com o passar do tempo e com o desenvolvimento do processo. Um movimento que iniciou com uma erosão superficial do solo pode progredir para a formação de pequenos sulcos, que, por sua vez, podem se transformar em formas ainda mais intensas de erosão, onde movimentos de deslizamentos e desmoronamentos se sucedem e complementam-se, gerando os sedimentos que serão transportados.

Em função da forma com que atuam, os movimentos complexos podem ser segregados em entalhamento e corrosão.

##### **4.2.4.1 – Entalhamento**

O entalhamento corresponde à erosão em sulco, ocasionada pelo sistema fluvial. A erosão em profundidade torna os taludes cada vez mais altos,

íngremes e instáveis, sendo, por isso, sempre acompanhada por desmoronamentos e deslizamentos em diferentes formas e dimensões. O entalhamento pode ter diferentes magnitudes, iniciando por pequenas ravinas, passando pela formação do leito de pequenos rios, indo até a formação de talvegues ou dando origem a enormes canyons (Figura 4.6).

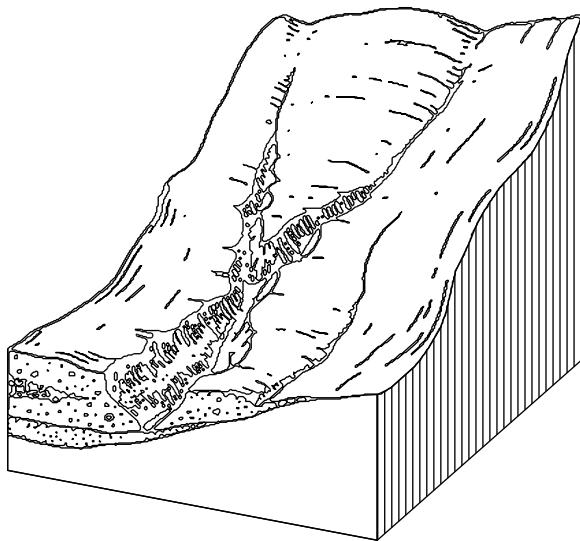


**Figura 4.6** – Transformação da paisagem

**Fonte:** Karl e Danz (1969).

66

O entalhamento também tem origem no escoamento temporário de um fluxo ou ravina intermitente. Na dependência do volume de água e das características do substrato, os pequenos sulcos iniciais podem evoluir para a formação das chamadas voçorocas (Figura 4.7).



**Figura 4.7** – Entalhamento em sulco crescente

**Fonte:** Weinmeister (1994).

Essas voçorocas são caracterizadas, normalmente, por um entalhamento crescente que, à medida que o canal inicial é alimentado pela confluência do

escoamento de uma determinada área, ganha força e poder de desagregação e transporte, tornando o canal cada vez mais largo e profundo em direção a jusante.

O escoamento superficial em uma ravina (perene ou intermitente), associado a um pequeno salto de água, pode resultar em um entalhamento decrescente, ou seja, mais estreito a jusante e mais largo em direção a montante.

A causa principal desses tipos de erosão é a água superficial. O surgimento dos entalhamentos (crescentes ou decrescentes) está normalmente associado a precipitações elevadas e ao escoamento superficial das águas, que são capazes de desencadear o processo ao encontrar um substrato frágil e/ou desprovido da proteção de uma cobertura vegetal adequada. Na dependência da declividade, do substrato e da intensidade da precipitação, o entalhamento pode progredir muito rapidamente.

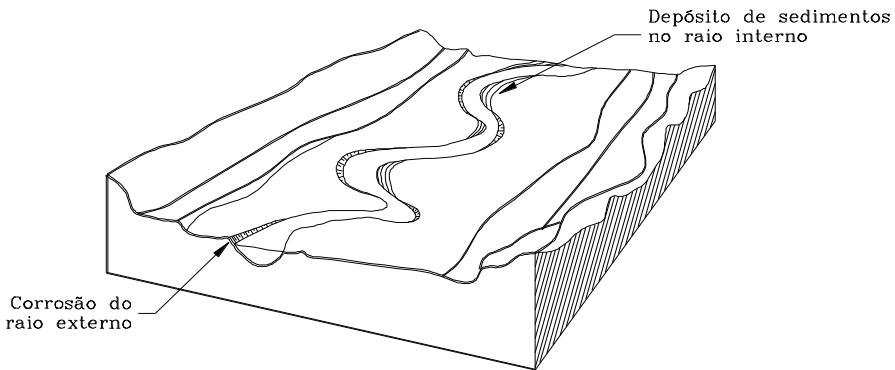
O entalhamento, independentemente de sua forma e dimensão, só pode ocorrer até certo nível, denominado nível de base de Powell (1875), citado por Casseti (1994). O nível de base corresponde à altura abaixo da qual um curso de água não pode mais erodir. Como nível de base absoluto, é considerado o nível do mar. Os níveis de base podem ser também relativos e temporários, como no caso da desembocadura em outro curso de água maior, ou em um lago.

Para o controle do entalhamento, é importante trabalhar no início do processo, quando este ainda é uma ravina ou um pequeno riacho, pois neles se encontram as melhores possibilidades de interferência humana, sem grandes custos, mas com efeitos positivos.

#### 4.2.4.2 – Corrosão

O entalhamento propriamente dito corresponde à erosão em profundidade ao longo de uma linha, entretanto é sempre complementado pela erosão das encostas laterais imediatamente associadas. Quando a erosão ocorre junto ao nível da água, ela é também denominada de corrosão (Figura 4.8). A corrosão, por retirar o apoio da encosta, é a causa de frequentes deslizamentos e principalmente desmoronamentos de taludes. O material movimentado, ao chegar ao fundo do entalhamento, é novamente erodido e transportado.

O deslizamento das encostas laterais de um entalhamento é uma consequência natural do aprofundamento da incisão: à medida que o entalhamento se torna mais profundo, mais facilmente pode ocorrer a corrosão pelo aumento da força da água. Por outro lado, a supressão da base de apoio (desconfinamento) da encosta aumenta sua altura e torna o talude mais íngreme e instável.



**Figura 4.8** – Meandro de uma torrente de planície, com áreas de corrosão no raio externo e áreas de deposição de sedimentos no raio interno dos trechos curvos

**Fonte:** Weber (1964).

68

A corrosão do terreno acontece com frequência em torrentes de colina e planície e deve-se, basicamente, à distribuição da velocidade da água nos córregos. Veja o Capítulo 2.

### 4.3 – Causas dos movimentos de massa

As causas dos movimentos de massa, em princípio, constituem um critério de classificação do fenômeno, mas aqui foram tratadas em um item especial, dada sua importância para a Engenharia Natural. Nesse sentido, é importante que se revisem as causas mais comuns da perda de estabilidade de um talude, bem como que se reconheçam os seus principais agentes determinantes. Guidicini e Nieble (1983) fazem uma divisão entre agentes predisponentes e efetivos. Os agentes predisponentes constituem o conjunto de condições geológicas (tipo de substrato) e geométricas do talude e características ambientais em que o movimento de massa irá ter lugar. Como agentes efetivos, listam-se aqueles diretamente responsáveis por desencadear o movimento, de maneira preparatória ou imediata: a temperatura, o vento e a água, além das forças de origem endógena. No ambiente fluvial, é destacada a importância desses dois últimos, sendo a temperatura um agente somente preparatório.

Filho e Virgili (1998) apud Pinheiro (2000) lembram-se da influência antrópica e consideram a vegetação como sendo um fator especial, condicionante da estabilidade de uma encosta.

As causas dos movimentos estão ligadas a ações internas ou externas ao talude de um ou mais desses agentes. Como causas externas, estão a adição e a subtração de peso.

Os fatores internos favoráveis aos deslizamentos estão geralmente relacionados à alteração no teor de umidade da massa terrosa/rochosa. Como causas internas, são citadas a perda de coesão, a elevação do peso do corpo e a mudança do centro de gravidade, a elevação da pressão devido à mudança no nível do lençol freático, a lavagem dos materiais cimentantes, a erosão em túneis (piping), o umedecimento repentino do solo (liquefação) e o inchamento do solo. Em geral, esses fatores não constituem a causa exclusiva de um deslizamento, mas contribuem em diferentes graus para que isso aconteça. Vários fatores internos e externos podem combinar-se e agir simultaneamente.

Todas as causas internas podem ter participação na perda de equilíbrio de um talude fluvial, mas é da adição (interna ou externa) e, principalmente, da subtração de peso (o desconfinamento causado pela corrosão) que induzem à maioria desses movimentos. Por outro lado, os fenômenos de adição e subtração de peso são os que, mais facilmente, podem ser influenciados pelo homem, tornando-se, assim, ferramentas para o controle dos processos fluviais.

Esses agentes têm influência nos distintos tipos de movimentos de massa, classificados resumidamente nas páginas anteriores. No entanto, no ambiente fluvial, a perda de estabilidade resulta, normalmente, em deslizamentos e desmoronamentos. Assim, o enfoque das causas e os exemplos que se seguem pretendem explicar, em particular, esses eventos. O leitor, com a devida atenção, pode associar essas causas e a ação dos agentes a toda sorte de movimentação.

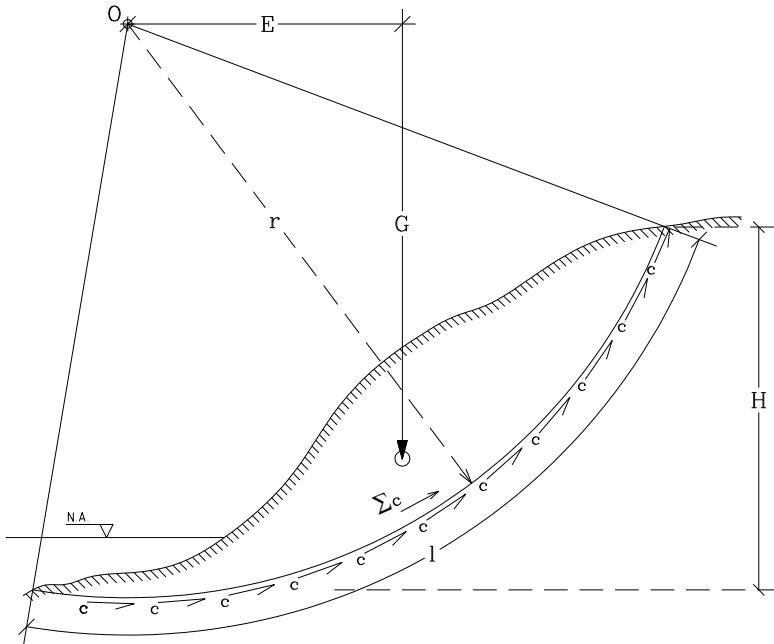
#### **4.3.1 – Causas externas**

Diversos fenômenos naturais ou antrópicos podem ser as causas iniciais de um deslizamento. Entre eles, costuma-se citar os movimentos da crosta terrestre e os terremotos, sobre os quais não se tem possibilidades de intervenção. Entretanto, vários movimentos de massa podem ser desencadeados por causas que, dentro de certos limites, são passíveis de ser manejadas.

##### **A – Adição de peso**

Em taludes fluviais, é comum o aumento de peso, tanto por infiltração da água ou alterações do nível hidrostático como pela passagem de veículos e animais ou mesmo pelo desenvolvimento da vegetação marginal.

O exemplo a seguir, baseado nas informações de Caputo (1973, 1974), Guidicini e Nieble (1983) e Durlo e Sutili (2002), elucida melhor a questão. Considere-se a figura 4.9 como sendo um talude fluvial sobre o qual se adiciona peso, por exemplo, devido ao desenvolvimento da vegetação ou à infiltração de água.



**Figura 4.9 – Forças influentes no deslizamento**

Nessa encosta, para uma superfície de ruptura hipotética representada pela linha semicircular de centro em O, existe uma força de movimento (B) composta pelo peso – força normal (G) – do corpo delimitado pela linha semicircular e pelo braço de alavanca (E), formado pelo centro de gravidade do corpo e seu centro de rotação (O). Assim:

$$B = E \cdot G \quad (4.1)$$

onde:

B = momento desestabilizante;

G = peso do corpo;

E = braço de alavanca.

Contra essa força de movimento ao longo da linha semicircular, opõe-se o momento resistente (R), composto pela resistência unitária ao cisalhamento (c), multiplicada pelo comprimento do arco de deslizamento (l) ( $=\sum c$ ) e pelo raio de deslizamento (r),

$$R = c \cdot l \cdot r \quad \text{ou} \quad \sum c \cdot r \quad (4.2)$$

onde:

- R = resistência ao deslizamento;
- c = resistência unitária do solo ao cisalhamento;
- l = comprimento do arco de deslizamento;
- r = raio do deslizamento.

Se o peso do corpo (G) é elevado por qualquer razão, também aumenta o momento desestabilizante (B). Quando este for superior à resistência do solo à movimentação (R), ocorrerá um deslizamento. Dito de outra forma, quanto maior for a relação R/B (fator de segurança ao deslizamento), mais seguro será o solo em relação ao deslizamento. Enquanto o valor de B oscila com o passar do tempo, o valor de R costuma apenas diminuir constantemente.

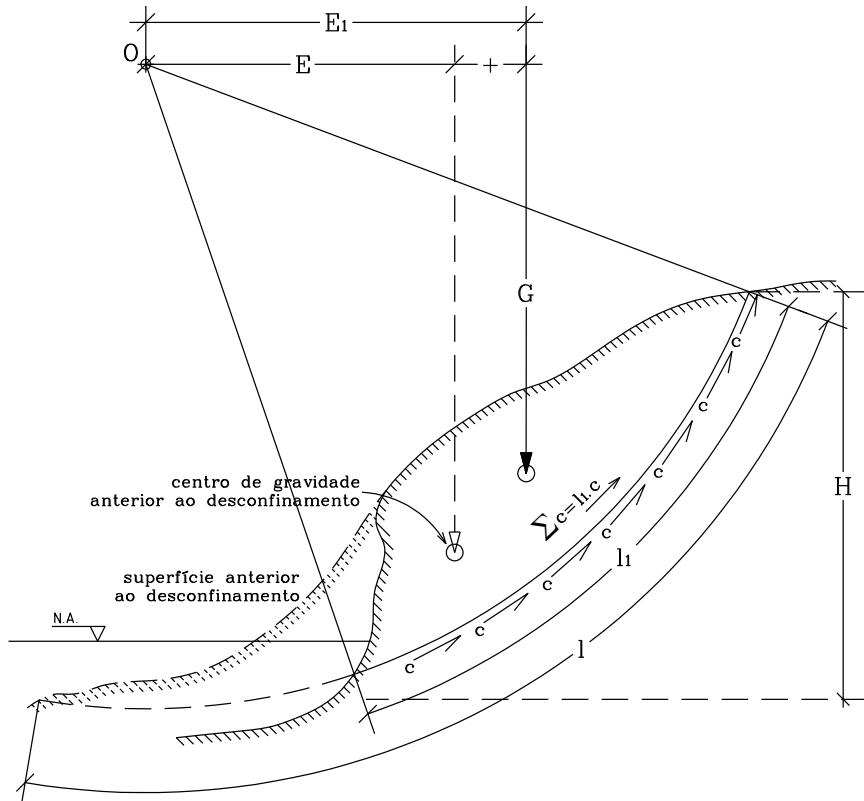
## B – Subtração de peso

71

Os deslizamentos e desmoronamentos que têm como causa a retirada de peso são mais frequentes em cursos de água do que os devidos à adição de peso. Eles ocorrem quando se retira a base de apoio da encosta. As causas da retirada de peso são muitas vezes antropogênicas, como, por exemplo, nos cortes executados para a construção de estradas e nas escavações para construção civil em geral. Podem também ter origem natural, como a corrosão da base das barrancas de cursos de água e erosões ao pé de encostas (Figura 4.10).

Apesar de reduzir o peso de forma favorável à estabilidade, o desconfinamento faz com que, simultaneamente, ocorra perda de resistência com a redução do comprimento do arco de deslizamento (de l para  $l_1$ ). Além disso, há um grande aumento da força de movimento, ocasionado pelo deslocamento do centro de gravidade, que aumenta o braço de alavanca de E para  $E_1$  (Figura 4.10). O somatório dessas alterações, muito frequentes em cursos de água, leva a uma grande diminuição da estabilidade do talude. O equilíbrio passa, então, a depender muito mais da resistência unitária ao cisalhamento. Esta, por sua vez, fica na dependência das características físico-mecânicas do solo, de sua coesão, do seu ângulo de atrito interno e, indiretamente, dos seus limites de plasticidade e liquidez.

Ao ocorrer o desconfinamento do talude fluvial, acontecerão deslizamentos se a força normal do corpo propício à movimentação for superior às suas forças de coesão. Esse evento, em um talude fluvial, inicia uma movimentação mais complexa, em que o material, inicialmente movimentado pelo deslizamento, ao encontrar o fluxo de água, é novamente erodido e transportado.



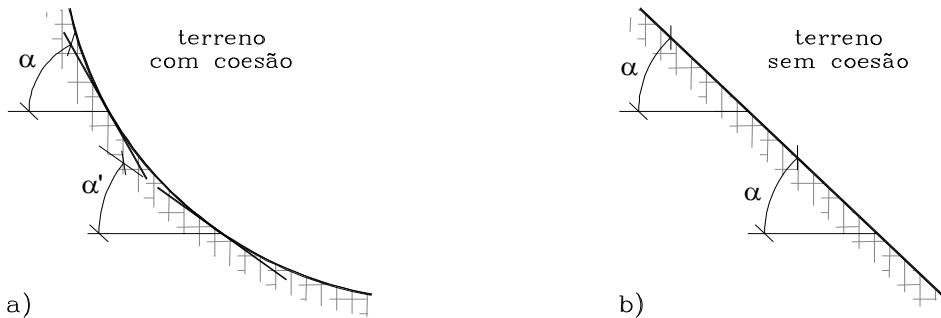
**Figura 4.10 – Efeito do desconfinamento na força de deslizamento**

Os taludes fluviais normalmente são formados por camadas distintas de sedimentos, depositados pelo curso de água em períodos anteriores. As diferentes características dessas camadas podem significar um plano preferencial de concentração de tensões e favorecer os deslizamentos.

A compreensão dos fenômenos e forças envolvidas na estabilidade de um talude fluvial torna possível que, dentro de certos limites, esses movimentos de solo possam ser previstos, prevenidos, mitigados e até controlados.

Na avaliação dos riscos de desmoronamento, deve-se levar em conta o ângulo natural das encostas (Figura 4.11), sendo necessário fazer-se a distinção entre solos com e sem coesão.

Em materiais sem coesão, como a areia, por exemplo, o ângulo natural de deposição dos taludes depende quase exclusivamente do ângulo de atrito interno do material. Solos sem coesão têm um ângulo natural de talude sempre igual, independentemente de sua altura (Figura 4.11). Têm também uma sensibilidade apenas transitória à adição de água, dada pela coesão aparente, e só começam a deslizar após total saturação.



**Figura 4.11** – Taludes naturais em material com coesão e sem coesão

73

Os materiais com coesão, como as argilas e as massas argilosas, apresentam comportamento totalmente diverso em relação às areias. As argilas são compostas basicamente por argilominerais, provenientes do intemperismo químico, possuindo forma plana (lamelar), pequenas dimensões e, consequentemente, grande capacidade de adsorção de água e cátions, plasticidade e coesão entre os grânulos. A coesão, resultante de um conjunto de forças de natureza eletrostática, química e capilar, permite que as partículas permaneçam inseparáveis. Devido a isso, é possível que os solos argilosos formem taludes com ângulos maiores que seus ângulos de atrito interno. Para terrenos argilosos, entretanto, a altura do talude tem grande influência sobre a estabilidade. Quanto mais íngreme um talude, menor a altura estável. Sua representação por meio de um arco de círculo é apenas uma simplificação.

Por outro lado, o conteúdo de umidade exerce uma grande influência sobre a estabilidade de massas argilosas. Devido à adição de água, além do ângulo de atrito interno, é diminuída também a própria coesão do solo. A partir de certo conteúdo de umidade, o aumento de peso, a diminuição do ângulo de atrito interno e, especialmente, a redução da coesão levam o terreno ao início da movimentação. Quando a umidade for muito elevada, o limite de liquidez pode ser atingido e o terreno pode até se comportar como se fosse um líquido e escoar (Item 4.2.1).

#### 4.3.2 – Causas internas

Todos os fatores internos favoráveis aos deslizamentos estão relacionados à modificação do teor de umidade do solo. Dificilmente, porém, existe uma única causa interna, desencadeadora de movimentação no solo: vários fatores internos agem simultaneamente e podem, ainda, estar associados a uma ou mais causas externas.

## A – Retirada da tensão superficial

Como foi comentado, a coesão resulta de um complexo de forças de natureza eletrostática, química e capilar e do tamanho e geometria das partículas, permitindo que estas se mantenham como que soldadas entre si. No entanto, o teor de umidade tem forte influência sobre as características de coesão do substrato (solo). Um grande aumento da umidade do substrato, além de aumentar o peso do talude, reduz a coesão do solo.

Uma fina película de água que envolve as partículas de solo é responsável por conferir-lhe tensão superficial. Com o aumento do teor de umidade, a tensão vai se tornando mais fraca, fazendo com que a massa perca gradualmente sua resistência.

## B – Alteração do peso do corpo e mudança do centro de gravidade

74

A adição de água ao solo irá preencher os poros, que até então estavam cheios de ar, aumentando o peso do corpo e tornando maior a força de movimento. Conforme a direção do aumento da umidade, se de cima para baixo ou ao contrário, o centro de gravidade da massa desloca-se lentamente na direção da frente de umedecimento. Esse movimento do centro de gravidade também pode ser uma das causas da movimentação.

## C – Elevação da pressão devida ao lençol freático

A adição de água, tanto por baixo, oriunda de lagos ou rios, como por cima, devido às chuvas, eleva o nível do lençol freático e aumenta a pressão nos poros do solo, podendo contribuir para as movimentações de massa.

Quanto maior a diferença entre a altura do lençol freático e a linha superior da camada permeável, tanto maior será a pressão exercida pela água, e, em consequência, tanto mais propenso ficará o solo à movimentação.

## D – Lavagem dos materiais cimentantes

O excesso de umidade pode não só retirar (temporariamente) o efeito de coesão, dado pelos materiais cimentantes (argilas, matéria orgânica e sesquistióxidos), como também lavá-los (lixiviá-los) permanentemente. Esse processo normalmente é lento, mas, uma vez iniciado, retira constante e paulatinamente a resistência do substrato e, por decorrência diminui, a estabilidade do talude.

## E – Erosão em túneis (piping)

Quando não apenas os materiais cimentantes são lixiviados, mas também os de maior granulometria são erodidos e transportados subterraneamente, tem-se um processo que pode auxiliar ou ser a causa decisiva de uma movimentação de massas. O escoamento subsuperficial da água, principalmente em solos com camadas fisicamente distintas, pode resultar nesse fenômeno. Isso é comum, por exemplo, em solos podzólicos em que o horizonte Bt mais argiloso e de infiltração mais lenta é antecedido por uma camada normalmente mais arenosa (o horizonte E) e, portanto, mais facilmente erodível.

## F – Umedecimento repentino do solo (liquefação)

O estremecimento forte e repentino de uma massa de terra saturada pode levar a água a sair de seu estado de equilíbrio, permeando toda a massa, tornando-a repentinamente “liquefeita”. Isso ocorre, por vezes, durante tremores de terra causados por explosões ou terremotos.

## G – Pressão em fendas

Fendas no solo, próximas aos taludes, podem ser preenchidas com materiais que se expandem ao serem umedecidos (material orgânico) ou congelados (água), constituindo-se em fontes de pressão que podem ser causa única ou auxiliar de deslizamentos.

## Bibliografia

CAPUTO, H. P. *Mecânica dos solos e suas aplicações*. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1973. v. 1.

\_\_\_\_\_. *Mecânica dos solos e suas aplicações*. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1974. v. 2.

CASSETI, V. *Elementos de geomorfologia*. Goiás: Ed. da UFG, 1994.

DURLO, M. A.; SUTILI, F. J. *Manejo biotécnico de cursos de água: I - Intemperismo e erosão, II - Escavação e transporte de materiais*. 2002. (Caderno didático do Centro de Ciências Rurais da Universidade Federal de Santa Maria).

- FERNANDES, N. F.; AMARAL, C. P. Movimentos de massa: uma abordagem geológico-geomorfológica. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. (Org.). *Geomorfologia e meio ambiente*. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1998. p. 123-194.
- GUIDICINI, G.; NIEBLE, C. M. *Estabilidade de taludes naturais e de escavação*. São Paulo: Edgard Blücher, 1983.
- LAATSCH, W.; GROTTENTHALER, W. *Typen der Massenverlagerung in den Alpen und ihre Klassifikation*. Forstwissenschaftliches Zentralblatt, 91, 1972. p. 309-339.
- LOPES, J. A. U. *Os movimentos coletivos dos solos e a evolução das encostas naturais nas regiões tropicais e subtropicais úmidas*. 1995. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1995.
- PINHEIRO, R. J. B. *Estudo de alguns casos de instabilidade da encosta da Serra Geral no Estado do Rio Grande do Sul*. 2000. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.
- KARL, J.; DANZ, W. Der Einfluß des Menschen auf die Erosion im Bergland. *Schriftreihe der Bayerischen Landesstelle für Gewässerkunde*. Heft 1, München, 1969.
- VARNES, D. J. Landslide types and processes. In: SCHUSTER, R. L.; KRIZEK, R. J. (Ed.). *Landslide: analysis and control*. Washington, D.C., 1978. p. 12-33.
- WEBER, A. *Vorlesung für Wildbachverbauung*. Wien: Universität für Bodenkultur, 1964.
- WEINMEISTER, H. W. *Vorlesung Wildbachkunde*: Skriptum, vorläufige Ausgabe. Wien: Institut für Wildbach und Lawinenschutz. Universität für Bodenkultur, 1994.
- WOLLE, C. M. Mecanismos de instabilização de encostas na Serra do Mar. In: ENCONTRO TÉCNICO – ESTABILIDADE DE ENCOSTAS, 1988, São Paulo. *Anais...* São Paulo: ABMS, 1988. p. 16-36.

# 5 AS PROPRIEDADES TÉCNICAS DA VEGETAÇÃO

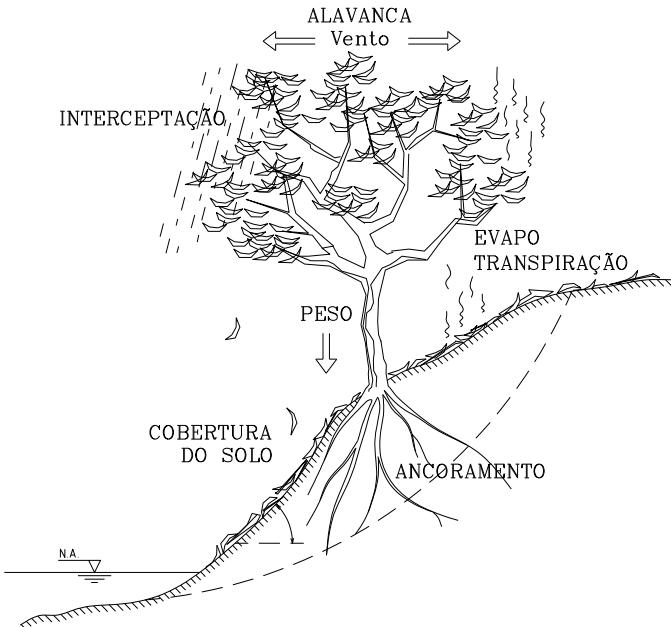
## 5.1 – Introdução

É de conhecimento quase corrente que as diferentes coberturas vegetais têm uma grande influência sobre o ciclo hidrológico. A vegetação original ou cultivada, com suas diferentes densidades, cobertura do dossel, graus de estratificação, composição florística, sazonalidade, produção de cobertura morta (serapilheira, restos culturais etc.), altera o ciclo hidrológico, interferindo na infiltração, no escoamento superficial e subterrâneo, no pico de vazão, no tempo de escoamento, na evapotranspiração e no armazenamento de água no solo.

As relações entre o ciclo da água e a vegetação florestal são abordadas em diferentes obras de hidrologia e hidrologia florestal, salientando-se como exemplos Molchanov (1963), Hewlett (1982) e Tucci (1993). No contexto deste livro, entretanto, preferiu-se abordar a vegetação apenas sob o ponto de vista biotécnico, isto é, como ferramenta e fonte de material construtivo para a estabilização de taludes e controle localizado dos processos erosivos, principalmente os característicos do processamento fluvial, através da Engenharia Natural.

Diversas espécies vegetais possuem características que podem ser utilizadas para controlar tecnicamente alguns processos fluviais, como erosões do fundo e das margens, deslizamentos e desmoronamentos e transporte de sedimentos.

As plantas, de modo geral, produzem os seguintes efeitos sobre os taludes fluviais: interceptam a água das chuvas, aumentam a evapotranspiração, adicionam peso, ancoram o talude, produzem efeito de alavanca sobre ele e recobrem o solo pelo acúmulo de serapilheira na superfície (Figura 5.1).



**Figura 5.1 – Efeitos da presença de uma árvore sobre um talude fluvial**

É importante salientar, no entanto, que os efeitos da vegetação sobre os taludes fluviais (e outros) nem sempre são benéficos (Quadro 5.1). Assim, para obter os efeitos de estabilização e proteção desejados, precisa-se escolher as espécies aptas para cada situação específica e empregar os métodos adequados de plantio.

## 5.2 – Efeitos da vegetação sobre taludes (fluviais)

É consenso entre os técnicos que trabalham com o ambiente natural que as plantas desempenham um importante papel na proteção do solo e na prevenção dos seus movimentos coletivos. Tal proteção se dá principalmente pelo efeito do sistema radicular, que providencia um reforço mecânico, acrescendo substancialmente a resistência das geomassas ao cisalhamento. Contudo, a vegetação origina uma sobrecarga vertical no talude, e a ação do vento sobre a copa de árvores altas transmite fortes tensões ao talude, enfraquecendo-o ou mesmo alavancando-o em dias de maiores rajadas. Além disso, o teor de umidade e o nível do lençol freático alteram-se por influência da vegetação.

Wolle (1986) também menciona que a cobertura vegetal pode apresentar efeitos favoráveis e desfavoráveis em relação à estabilidade dos taludes. O autor afirma que, logo após a retirada de árvores que se encontram sobre

os taludes, há um acréscimo na sua estabilidade, que se deve à eliminação de efeitos negativos de sobrecarga e de alavanca. Contudo, caso não haja rebrotação, esse acréscimo de estabilidade tende a ser perdido com o tempo, devido ao apodrecimento das raízes e da serapilheira e à eliminação do efeito de redistribuição da água da chuva.

No quadro 5.1, elaborado com base nos trabalhos de Guidicini e Nieble (1983), Greenway (1987) apud Morgan e Rickson (1995) e Pinheiro (2000), são apresentados os efeitos gerais (hidrológicos e mecânicos) da vegetação sobre a estabilidade de encostas e taludes.

Para otimizar os efeitos benéficos, aconselha-se a poda das plantas nos taludes, que resulta em aumento da seção de vazão e pode ter, inclusive, o efeito de renovação e estímulo ao enraizamento. A retirada (corte) singular de árvores adultas e de grande porte não só é possível como, por vezes, é também imprescindível à manutenção da estabilidade da encosta. O corte de tais árvores não prejudica, necessariamente, as margens, podendo, por vezes, auxiliar na manutenção da estabilidade, à medida que ocorram brotações ou que elas sejam natural ou artificialmente substituídas. Esse fato traz, inclusive, a perspectiva de uso da madeira, o que representa uma ferramenta de incentivo à proteção de áreas marginais. Para Durlo, Marchiori e Spathelf (2000), a preservação e a exploração não são mutuamente excludentes e podem, sim, ser complementares.

As plantas possuem características biotécnicas essenciais à estabilidade das margens dos rios (GRAY; LEISER, 1982; BEGEMANN; SCHIECHTL, 1994; MORGAN; RICKSON, 1995; FLORINETH; GERSTGRASER, 2000).

De acordo com Florineth e Gerstgraser (2000), a vegetação pode aumentar consideravelmente a resistência à erosão do substrato. Florineth (1982, 1995), Gerstgraser (1998) e LfU (1996) descrevem diferentes técnicas de revegetação, capazes de suportar tensões que vão de 40 Pa até mais de 300 Pa. A comparação desses valores com os apresentados para os substratos, com ou sem coesão (Tabelas 3.1 e 3.2) demonstra o potencial da vegetação para a estabilização dos taludes fluviais.

Para uma escolha apropriada das espécies, além das características biotécnicas, devem ser considerados critérios ecológicos, fitossociológicos e reprodutivos. Gray e Leiser (1982), Morgan e Rickson (1995) e Florineth e Gerstgraser (2000) afirmam que a escolha deve recair de preferência sobre espécies nativas do local, que estão mais bem adaptadas às condições edáficas e climáticas específicas. Além disso, devem possuir uma forma de reprodução fácil e de baixo custo. Plantas com capacidade de reprodução vegetativa normalmente são as ideais, o que não exclui, necessariamente, as que só se propagam por sementes.

Efeitos Hidrológicos	Efeitos Mecânicos
Copas:	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• retêm (evaporam) parte do volume de água, reduzindo a precipitação efetiva;</li> <li>• reduzem a força de impacto das gotas da chuva e, consequentemente, da erosão;</li> <li>• aumentam o tamanho das gotas, o que resulta em maior impacto localizado;</li> <li>• reduzem a infiltração efetiva no talude, devido à evapotranspiração.</li> </ul>	<p>B      • aumentam a força normal, pelo peso da copa e do tronco; A/B</p> <p>B      • protegem o solo da ação direta dos raios sol e do vento; A/B</p> <p>A      • captam as forças dinâmicas do vento e a transmitem ao talude pelo tronco e sistema radicular. A</p>
Serapilheira:	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• aumenta a velocidade e a capacidade do armazenamento de água;</li> <li>• torna irregular e reduzem a velocidade do escoamento superficial da água.</li> </ul>	<p>A/B     • absorve, em parte, o impacto mecânico que resulta do gotejamento e do trânsito de máquinas e animais; B</p> <p>B      • protege o solo de outras forças erosivas, como vento, temperatura etc. B</p>
Raízes:	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• melhoram a infiltração superficial da água no solo;</li> <li>• com o aumento da porosidade do solo, melhoram a sua permeabilidade;</li> <li>• retiram parte da água infiltrada que será transformada ou evapotranspirada;</li> <li>• criam pressões neutras nos poros, aumentando a coesão do solo.</li> </ul>	<p>A/B     • auxiliam na criação de agregados do solo por ação física e biológica; B</p> <p>A/B     • aumentam substancialmente a resistência do solo ao cisalhamento; B</p> <p>B      • redistribuem as tensões formadas nos pontos críticos; B</p> <p>A/B     • ancoram as linhas de fratura; B</p> <p>• restringem os movimentos e ajudam a suportar o peso do talude. B</p>

**Quadro 5.1** – Efeitos das plantas sobre a estabilidade de encostas

A = efeito adverso; B = efeito benéfico

De imediato, sempre que possível, ou em passos seguintes à implantação da estabilização das margens de um curso de água, Begemann e Schiechl (1994) e Florineth e Gerstgraser (2000), entre outros, concordam que se deva procurar uma sequência na vegetação em que, a partir da margem, tenham-se, na zona normal de inundação, espécies adaptadas à reofilia: gramíneas e ervas, associadas às plantas de porte arbustivo. Somente após essa primeira faixa, pode-se admitir a presença de árvores de pequeno e médio porte (Veja Figura 6.1). O perfil assim formado tem justamente o objetivo de aproveitar os efeitos benéficos da vegetação, sem que se manifestem os adversos, resultantes, por exemplo, da sobrecarga no talude, do efeito alavanca e da diminuição da seção de vazão, proporcionados de maneira mais acentuada por árvores de maior porte.

## 5.3 – Eleição de espécies

81

A Engenharia Natural preconiza o uso exclusivo de plantas ou, com frequência, combinada com obras de engenharia extremamente simples e, em alguns casos, de tipo especial.

O que se pretende com implante da vegetação é acelerar as sucessões ecológicas, em solos erodidos ou com perigo de erosão, com o fim de alcançar, o mais rápido possível, os efeitos de proteção. Para que se eliminem ou diminuam os problemas de erosões, deslizamento ou desmoronamentos, as sucessões ecológicas encaminhadas pelo profissional devem ser mais rápidas e eficientes do que aquelas feitas pela própria natureza. Pela preparação adequada do terreno, escolha das plantas apropriadas e adoção de métodos específicos de plantio, deve-se assegurar o sucesso do tratamento vegetativo. A seleção adequada de plantas exige a observação dos seguintes aspectos:

### 5.3.1 – Estágios sucessionais

Nas áreas de solos erodidos, encontram-se somente algumas comunidades iniciais, passando depois às comunidades de transição e, posteriormente, às comunidades finais.

A função do técnico é, pois, conhecer as diferentes fases da sucessão ecológica e tentar acelerar esse processo, introduzindo, tão logo quanto possível, as plantas componentes da comunidade de transição e final, de maior interesse para cada situação específica. Como ponto de partida para a implantação da sucessão final, pode-se tomar as características edáficas e climáticas do local. Para uma aceleração das sucessões, é muito importante a observação das comunidades já existentes em locais erodidos mais antigos.

### **5.3.2 – Fatores ecológicos**

Em função da relação das plantas com o ambiente, deve-se levar em conta os principais fatores ecológicos, tais como temperatura, umidade, condições químicas e físicas do solo.

Fatores mais específicos, como a radiação, por exemplo, embora pareçam menos importantes, podem ser limitantes para a escolha de determinadas espécies. Por vezes é necessário que a escolha recaia, por exemplo, sobre espécies que sejam pouco exigentes em umidade, matéria orgânica, determinados nutrientes, pH etc., conforme seja um ou outro o fator limitante do local a ser recuperado.

### **5.3.3 – Aspectos reprodutivos**

82

Tendo-se em vista que o manejo de cursos de água tem por objetivo estabilizar, recuperar ou reabilitar áreas degradadas e que seu campo de trabalho localiza-se em sítios extremos, o tipo de reprodução dos vegetais a serem empregados desempenha um papel de grande importância. Assim, para vegetar certos habitats, com frequência torna-se imprescindível o uso de espécies com reprodução vegetativa no lugar daquelas que só se reproduzem por sementes.

O processo de estabilização ou recuperação de certas áreas pode ser bastante acelerado se forem conhecidos os principais meios de propagação das plantas. Assim, na dependência das técnicas utilizadas, pode-se dar preferência às plantas que se reproduzem por sementes, ou pode ser mais conveniente, ou até imperativo, aproveitar a reprodução vegetativa.

### **5.3.4 – Aptidão biotécnica**

Passando pelos critérios anteriores de seleção, resta conhecer, ainda, a aptidão biotécnica das plantas: além de sobreviver no local, estas deverão ter a capacidade de solucionar o problema técnico existente.

Isso posto, e na dependência de cada situação, a escolha deve recair sobre plantas que:

- Resistam à exposição parcial de suas raízes, em locais onde se preveem formas erosivas;
- Tenham sistema radicular que permita a fixação do solo (talude), quer pelo comprimento, volume, distribuição e resistência das raízes, quer pela interação dessas características;
- Resistam ao aterrramento parcial, em locais onde se preveem formas deposicionais;

- Resistam ao apedrejamento (oriundo de barrancas altas e declivosas);
- Tenham capacidade de brotar após quebra do ápice ou corte intencional da parte aérea;
- Possuam, preferencialmente, a capacidade de se reproduzir por meios vegetativos;
  - Apresentem alta ou baixa taxa de transpiração, em função de se desejar reduzir ou aumentar a umidade na área em questão;
  - Possuam crescimento rápido.

Para o tratamento completo de uma área a ser estabilizada ou recuperada, é necessário conhecer previamente os problemas que poderão advir e, em função disso, tomar medidas adequadas. Naturalmente e sempre que possível, deverão ser eleitas as plantas que proporcionem proteção ou estabilização, bem como o maior lucro possível (pela produção de madeira, frutos ou outros subprodutos) e que promovam a diversidade da fauna e da flora que se instalará futuramente. As plantas, em suma, deverão ser ecologicamente apropriadas, economicamente aproveitáveis e possuir aspectos paisagísticos/estéticos desejáveis.

## 5.4 – Plantas úteis à Engenharia Natural

Com base na literatura, a seguir é apresentada uma breve descrição botânica de algumas espécies aparentemente potenciais para serem usadas como ferramentas na estabilização de taludes fluviais.

*Calliandra brevipes* Benth.

Conhecida na literatura mais antiga por *Calliandra selloi* (Spreng.) Macbr., esta Leguminosae-Mimosoideae é descrita por Marchiori (1997) como arbusto inerme, de até 2 m de altura, glabro e muito ramificado. Apresenta folhas alternas, bipinado-unijugas, com pecíolo curto (2 mm) e estípulas es-triadas muito pequenas (1,5 mm). Os folólios, em 15 a 45 pares por pina, são lineares (de 2 a 6 mm de comprimento por cerca de 1 mm de largura), muito aproximados entre si, glabros, descolores, brilhantes e providos de nervura principal centrada no limbo. As flores possuem estames conspícuos (2 a 4 cm), brancos na metade inferior e rosados ou igualmente brancos na superior, reunindo-se em capítulos axilares solitários, dispostos na extremidade de pedúnculo pubescente, com cerca de 1 cm de comprimento. Floresce em diversas épocas do ano. Os legumes são lineares, glabros, eretos nos ramos e de cor castanha, variando de 4 a 8 cm de comprimento por cerca de 6 mm

de largura, com sementes ovais e obliquamente dispostas. Embora muito dura, a madeira carece de importância devido à pequena dimensão dos caules.

Conhecida por sarandi (BURKART, 1979), quebra-foice (LONGHI, 1988; REITZ; KLEIN; REIS, 1988), mandaravé, angiquinho, quebra-foice-de-flor-cor-de-rosa (REITZ; KLEIN; REIS, 1988), esponja e mandaruvá (LORENZI; SOUSA, 1995), é uma espécie adaptada à reofilia, ocorrendo naturalmente à margem dos rios, onde suporta submersão temporária (MARCHIORI, 1997). No entanto, segundo Lorenzi e Sousa (1995), pode estar a pleno sol, multiplicando-se tanto por sementes, dando origem a plantas mais vigorosas, como por estacas.

*Calliandra tweediei* Benth.

Marchiori (1997) descreve essa espécie como arbusto inerme de até 3 m de altura. Segundo Lorenzi e Sousa (1995), alcança até 5 m de altura.

Os ramos, pecíolos e pedúnculos são revestidos por densa pilosidade sedosa. As folhas, alternas e bipinadas, apresentam pecíolo glanduloso, grandes estípulas (1,5 cm) oval-estriadas e 2 a 6 pares de pinas, com 3 a 7 cm de comprimento. Os folíolos, variáveis de 25 a 35 pares de pina, são lineares (7 x 1 mm) e glabros, com exceção do bordo sedoso-ciliado, e com nervura central. As flores agrupam-se em vistosos capítulos axilares solitários, tendo estames vermelhos muito conspícuos (cerca de 4 cm). A floração estende-se de setembro a janeiro. Os legumes, lenhosos e com 5 a 7 cm de comprimento por 8 a 9 mm de largura, apresentam margem engrossada e cor castanha, sendo revestidos por indumento velutino. Amplamente distribuída no Rio Grande do Sul, é espécie heliófila e seletiva higrófila, habitando principalmente a orla da mata ciliar e a margem de cursos de água.

Segundo Lombardo (1964), a espécie é originária do sul do Brasil e norte do Uruguai. Recebe nomes populares como topete-de-cardeal, quebra-foice, sarandi, mandaravé (BURKART, 1979; REITZ; KLEIN; REIS, 1988), plumerillo e plumerillo-rojo (LOMBARDO, 1964), espinho-vermelho, rabo-de-anjo, cabelo-de-anjo, angiquinho (REITZ; KLEIN; REIS, 1988), esponjinha-vermelha e mandararé (LORENZI; SOUSA, 1995). Segundo estes últimos autores esta leguminosa, é tolerante ao frio, sendo indicada para cercas-vivas. Multiplica-se tanto por semente como por estacas.

*Phyllanthus sellowianus* (Klotzsch) Müll. Arg.

Pertencente à família Phyllanthaceae, a espécie é conhecida vulgarmente pelos nomes de sarandi e sarandi-branco. Segundo Lombardo (1964), trata-se

de arbusto que vive à margem de rios e arroios, adentrando as águas e estendendo-se, por vezes, por muitos quilômetros.

Cabrera et al. (1965) mencionam essa espécie como originária do sul do Brasil, Uruguai e nordeste da Argentina sendo comum à margem dos rios.

Trata-se de um arbusto com 2 a 3 m de altura, glabro, de ramos compridos e muito divididos, com folhas reduzidas e escamas perto dos ápices. As folhas, estreito-elípticas, mucronuladas, delgadas e com nervuras laterais evidentes, planas de face inferior pálida, alcançam 3 a 4 cm de comprimento. Os raminhos são delgados, sinuosos, algo comprimidos e angulados. Possui estípulas decíduas, estreito-triangulares, com 2 mm de comprimento e margens escariosas. Os pecíolos medem de 1,5 a 2 mm de comprimento.

A inserção das folhas é alterna e possui uma característica muito peculiar: suas flores nascem na base das folhas, vindo daí o nome: *phylllos* (folhas) e *anthos* (flor) (BOELCKE, 1981; REITZ, 1988). As flores, dioicas, são bastante numerosas e dispostas em fascículos nas axilas das folhas. Os frutos são cápsulas deprimido-globosas, de 2,5 mm de diâmetro, e as sementes, quase lisas, medem pouco mais de 1 mm.

A planta, de caule e ramos flexíveis, resiste às correntezas das águas durante as enchentes, sendo, por isso, indicada para proteger os terrenos durante inundações, pois pertence ao grupo das reófitas.

Espécie heliófita e seletiva higrófita, até xerófita, é adaptada às variações extremas de umidade e estio. É muito frequente, característica e exclusiva das margens rochosas ou lodosas dos rios e ilhas em praticamente todo o sul do Brasil, afixando-se firmemente ao substrato, uma vez que se desenvolve preferencialmente nos locais de corredeiras e cachoeiras dos rios (REITZ, 1988).

### *Pouteria salicifolia* (Spreng.) Radlk.

Essa sapotácea é mencionada por Marchiori (2000, 2004) como sendo árvore pequena, perenifólia, de tronco curto, copa globosa e casca acinzentada, dividida em placas retangulares longitudinais. Em indivíduos muito velhos, alcança até 12 m de altura.

Segundo Reitz, Klein e Reis (1988), sua altura varia entre 3 e 7 m e 8 cm de DAP. As folhas, linear-lanceoladas, subcoriáceas e brilhantes, medem entre 8 e 19 cm de comprimento por 1 a 2,5 cm de largura, tendo ápice agudo, base longamente estreita no pecíolo, nervura principal saliente e numerosas nervuras secundárias, visíveis nas duas faces.

As flores, produzidas em fascículos axilares sésseis, são esbranquiçadas e de suave perfume, que lembra o da violeta. Apresentam quatro sépalas estri-goso-pubescentes, corola com quatro lóbulos obtusos e ciliolados, alternados

com igual número de estaminódios petaloídes, quatro estames presos à base do tubo da corola e ovário globoso, coberto por densa pubescência sedosa.

O fruto, provido de breve estipe engrossado (4 a 6 mm) e ápice rostrado-acuminado, mede de 4 a 5 cm de comprimento por cerca de 1,5 cm de diâmetro, contendo uma única semente, ovoide.

Reitz, Klein e Reis (1988) e Marchiori (2000) atribuem-lhe características de espécie ripária e reófila, importante para o reflorestamento das margens de rios.

Marchiori (2000) reconhece-a pelos nomes vulgares de mata-olho e sarandi-mata-olho, explicando a origem do nome pelo fato de emitir fumaça prejudicial aos olhos, quando a madeira é queimada, o que não impede o uso de sua madeira.

Com massa específica de 0,69 g/cm<sup>3</sup> (BILONI, 1990), é utilizada para a confecção de cabos de ferramentas (REITZ; KLEIN; REIS, 1988) e também como lenha.

*Salix humboldtiana* Willd.

Marchiori (2000, 2004) descreve esta salicácea como uma árvore de porte médio (20 m), com tronco reto, inclinado ou tortuoso, de até 90 cm de diâmetro e copa ampla, de ramificação ascendente. A casca, espessa e com profundas fissuras, é dura e castanho-acinzentada. As folhas, simples, linear-lanceoladas ou falcadas, alcançam até 15 cm de comprimento por 1,5 cm de largura. Caducas, glabras e com pecíolo curto (4 a 6 mm), apresentam ápice acuminado, base aguda e margem serreada, com nervura central proeminente. As flores, unisexuais e aperiantadas, reúnem-se em amentilhos pendentes na extremidade dos ramos novos. As sementes, muito pequenas, apresentam um tufo de pelos sedosos esbranquiçados, responsáveis pela dispersão anemocórica.

O mesmo autor ainda evidencia que o salso é uma das árvores mais características e a de maior porte na mata ciliar, ocorrendo na maior parte do Rio Grande do Sul. Sua área de dispersão é, todavia, muito ampla, estendendo-se desde o México até a Argentina e o Chile. Sua folhagem é de cor variável ao longo da estação de crescimento: verde-clara no início da primavera, verde-escura durante o verão e amarela no outono.

De acordo com Lorenzi (1992), trata-se de espécie útil no controle da erosão, indicada especialmente para reflorestamentos em margens de rios, barragens e açudes. Possui fácil reprodução por estquiaia e sementes de curta viabilidade em armazenamento. Floresce durante a primavera (setembro e outubro), amadurecendo seus frutos no final da primavera até o início do verão.

Reitz, Klein e Reis (1988) comentam que o salgueiro é particularmente frequente nas baixadas da Depressão Central do estado do Rio Grande do Sul.

Trata-se de árvore de rápido e vigoroso crescimento que, sobretudo em solos muito úmidos e de elevada profundidade, contribui para a drenagem das várzeas brejosas. Possui extraordinária facilidade e eficiência de multiplicação vegetativa.

A madeira, leve ( $0,49 \text{ g/cm}^3$ ), clara e sem distinção entre cerne e alburno, apresenta baixa durabilidade natural, restringindo sua utilização para caixotaria e obras internas. Também se presta para a fabricação de celulose e papel, bem como possui flores nectaríferas. A casca, à maneira das Salicáceas, possui salicina, substância de propriedades antitérmicas, sedativas e antiespasmódicas.

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

Conhecida vulgarmente por sarandi-negro, sarandi-vermelho e saranduba. Lombardo (1964) denomina esta Euphorbiaceae de branquinho, apesar de esse nome ser aplicado também a outras espécies do mesmo gênero, como *Sebastiania brasiliensis* e *S. commersoniana*, estas presumivelmente sem importância biotécnica. Esse autor descreve *S. schottiana* como árvore de pouca altura, que cresce à margem de rios e arroios e, até mesmo, dentro da água.

A descrição que Marchiori (2000) faz para a espécie é a seguinte: arbusto totalmente glabro, de 3 a 3,5 m de altura, com ramos longos, pouco ramificados, espinescentes e muito flexíveis. Folhas, simples, alternas, de pecíolo curto (2 a 4 mm), membranáceas e lanceoladas, variam de 1 a 5 cm de comprimento por 4 a 15 mm de largura, apresentando ápice obtuso ou brevemente agudo-mucronado, margem inteira, com uma ou duas glândulas engrossadas inferiormente e base cuneado-estreita. Discolores e esbranquiçadas na face inferior, possuem de 7 a 10 nervuras secundárias evidentes, em cada lado da principal. As flores, pequenas e amareladas, são produzidas em espigas terminais, sobre raminhos muito curtos (1 a 2 cm). O fruto é uma cápsula globosa de, aproximadamente, 5 mm de diâmetro.

Cabrera et al. (1965) lembram que as flores são unissexuadas. As femininas ocorrem na base das espigas e, no alto, ocorrem as masculinas.

Marchiori (2000) destaca que a espécie é conhecida no Rio Grande do Sul por amarilho, sarandi ou sarandi-de-espinho. Apresenta vasta dispersão na bacia do Prata e região da Floresta Atlântica, ocorrendo desde Goiás, Minas Gerais e Rio de Janeiro até o Uruguai e nordeste da Argentina. Trata-se de espécie heliófila, seletiva higrófila.

Para Reitz (1988), a espécie é seletiva higrófila até xerófita, (adaptada às variações extremas de umidade ou seca) e altamente adaptada à reofilia, dispondo de denso sistema radicial e de caules flexíveis, capazes de suportar

a força das águas nas enchentes. O amarilho cresce à margem de rios e até mesmo cachoeiras, como nos lajeados do Salto do Yucumá, no Rio Uruguai. Como espécie reófila, assume grande importância ecológica, auxiliando na estabilização de taludes fluviais e na perenização dos cursos de água. A madeira carece de utilização devido ao pequeno diâmetro dos caules.

Reitz (1988) menciona nomes vulgares, como içaranduba, assobio-de-macaco e espinho-de-olho, e reconhece duas variedades: *schottiana* e *angustifolia*, esta última distinta por apresentar folhas mais estreitas que a primeira.

*Terminalia australis* Camb.

Trata-se de uma Combretácea, chamada vulgarmente, de acordo com Reitz (1967), de amarilho ou sarandi-amarelo e descrita pelo mesmo autor como árvore pequena ou um arbusto que floresce em outubro e novembro e frutifica de dezembro a março.

Marchiori e Sobral (1997) descrevem-na como árvore pequena (até 10 m), de copa baixa umbeliforme, com ramos muito flexíveis e delgada casca acinzentada, provida de fissuras superficiais. O tronco, de até 30 cm de diâmetro, normalmente ramificado desde a base, fornece madeira amarelada. Apresenta folhas simples, alternas, inteiras, curtamente pecioladas, de 2 a 7 cm de comprimento por 1 cm de largura, com forma elíptico-lanceolada ou linear-lanceolada e base cumeada, verde-claras e glabras na face superior e pilosas na inferior, quando jovens. As flores, pequenas (5 mm), apétalas e unisexuais, encontram-se em inflorescências axilares paucifloras e pedunculadas (2 a 5 cm). Os frutos medem de 2 a 3 cm de comprimento e são providos de duas asas opostas.

Reitz, Klein e Reis (1988) acrescentam tratar-se de arvoreta decidual ou semidecidual, de flores brancas e pouco vistosas, com frutos secos de cor de palha seca quando maduros. A madeira é amarela e de textura fina e muito homogênea, moderadamente pesada. Fornece excelentes características ornamentais para laminados, objetos de luxo, aparelhos de precisão, peças de xadrez, réguas, botões, canzis e cabos de ferramentas, em que não há necessidade de troncos grossos e compridos.

Segundo Reitz (1967), a arvoreta ou arbusto pode ser reconhecida na prática por ser semidecidual flexuosa e geralmente inclinada por sobre os rios, muito abundante ao longo deles, tendo ramos finos e compridos, pendentes à maneira dos chorões. Apresenta folhas pequenas, quase sésseis e condensadas no ápice dos ramos.

Reitz (1967), Reitz, Klein e Reis (1988) e Marchiori e Sobral (1997) concordam que a espécie é seletiva higrófita e, juntamente com *Pouteria salicifolia*, *Calliandra brevipes*, *Phyllanthus sellowianus* e *Sebastiania schottiana*,

é das mais características das florestas ciliares no sul do Brasil. Suporta muito bem a força das águas nas enchentes, devido aos seus ramos flexíveis e a seu denso sistema radicular. Reitz, Klein e Reis (1988) chegam a recomendá-la para prolongar a vitalidade das hidroelétricas, por evitar a erosão.

Foram relacionadas e descritas algumas espécies com características aparentemente importantes para a estabilização das margens fluviais. No entanto, outras espécies, mesmo as que não possam ser reproduzidas vegetativamente, mas que, de alguma maneira, possam ser facilmente disseminadas e produzam os efeitos esperados, também devem ser consideradas. Gramíneas e ervas podem ser grupos de plantas, igualmente promissoras.

## 5.5 – Experimentos

Uma primeira pesquisa com vistas a reconhecer a aptidão biotécnica do sandi-branco (*Phyllanthus sellowianus* Müll. Arg.) e do vime (*Salix x rubens* L.) foi realizada por Sutili, Durlo e Bressan (2004). No experimento, testou-se a capacidade de brotação de estacas produzidas a partir de três porções do ramo (ponta, meio e base) das duas espécies, plantadas em faixas, em diferentes posições na margem de um curso de água. A primeira faixa situa-se na parte inferior do barranco, próxima à linha de água, seguida pelas outras, margem acima, até aproximadamente 5 m do nível da água. Esse pequeno experimento, apesar de trazer informações importantes, representa apenas o início de um longo trabalho: exigem-se estudos sistemáticos que incluam um maior número de espécies e que, especialmente, sejam capazes de trazer informações adicionais sobre a aptidão biotécnica das plantas (Item 5.3.4).

A visualização esquemática da área tratada é mostrada na figura 5.2. As estacas que brotaram 60 dias após a implantação estão hachuradas.

1º CONJUNTO		2º CONJUNTO		3º CONJUNTO		4º CONJUNTO	
Vime	Sarandi	Vime	Sarandi	Sarandi	Vime	Sarandi	Vime
Faixa-2 Faixa-3	M M M M M M M M M M	B B B B B B B B B B	P P P P P P P P P P	P B B B B B B B B B			
	P P P P P P P P P P	P M M M M M M M M M M	M M M M M M M M M M	P P P P P P P P P P	P P P P P P P P P P	P P P P P P P P P P	
	B B B B B B B B B B	P P P P P P P P P P	P B B B B B B B B B	B B B B B B B B B B	B M M M M M M M M M M	M M M M M M M M M M	
	M M M M M M M M M M	B B B B B B B B B B	B B B B B B B B B B	P P P P P P P P P P	P P P P P P P P P P	B B B B B B B B B B	B B B B B B B B B B
	P P P P P P P P P P	P M M M M M M M M M M	M M M M M M M M M M	M M M M M M M M M M	M M M M M M M M M M	P P P P P P P P P P	P P P P P P P P P P
	B B B B B B B B B B	P P P P P P P P P P	P P P P P P P P P P	B B B B B B B B B B	B B B B B B B B B B	M M M M M M M M M M	M M M M M M M M M M
	M M M M M M M M M M	B B B B B B B B B B	B B B B B B B B B B	P P P P P P P P P P	P P P P P P P P P P	B B B B B B B B B B	B B B B B B B B B B
	P P P P P P P P P P	P M M M M M M M M M M	M M M M M M M M M M	M M M M M M M M M M	M M M M M M M M M M	P P P P P P P P P P	P P P P P P P P P P
	B B B B B B B B B B	P P P P P P P P P P	P P P P P P P P P P	B B B B B B B B B B	B B B B B B B B B B	M M M M M M M M M M	M M M M M M M M M M
	M M M M M M M M M M	B B B B B B B B B B	B B B B B B B B B B	P P P P P P P P P P	P P P P P P P P P P	B B B B B B B B B B	B B B B B B B B B B

\* as porções não hachuradas correspondem a perdas.

**Figura 5.2 – Distribuição espacial do experimento considerando as espécies e as porções do ramo (P = ponta, M = meio, B = base)**

A resposta das duas espécies foi bastante parecida, embora o sarandi-branco tenha apresentado um número total de estacas pegas (vivas) ligeiramente maior que o vime após 60 dias. A fim de verificar se a diferença foi significativa, executou-se o teste de  $X^2$ , seguindo as sugestões de Gomes (1990). Na tabela 5.1, são demonstrados o número de estacas vivas e de perdidas (mortas ou ausentes), 60 dias após o plantio, para as duas espécies. Ao lado dos valores encontrados estão, entre parênteses, os números que seriam esperados ao admitir-se que o total de 128 perdas se mantivesse de forma proporcional para ambas as espécies, não demonstrando, assim, diferença entre a mortalidade das estacas das diferentes espécies. Os valores observados (75 e 53), no entanto, são significativamente diferentes ao nível de 5% de probabilidade de erro. Vale dizer que o potencial de pega do sarandi-branco foi, para esse caso, significativamente maior do que o do vime.

**90 Tabela 5.1** – Número de estacas vivas e perdidas (mortas ou ausentes) 60 dias após o plantio, para as duas espécies

ESPÉCIE	Nº DE ESTACAS		
	perdidas	vivas	Total
Vime	75 <sub>(64)</sub>	165 <sub>(176)</sub>	240
Sarandi-branco	53 <sub>(64)</sub>	187 <sub>(176)</sub>	240
Total	128	352	480

A tabela 5.2 mostra o percentual de pega das diferentes partes dos ramos das duas espécies, segregado ainda pela posição em que foram plantadas em relação à margem.

**Tabelas 5.2** – Porcentagem de pega das estacas, segregadas por espécie, parte do ramo e faixas de plantio em relação à margem

Faixas	VIME				SARANDI-BRANCO			
	ponta	meio	base	Média	ponta	meio	base	Média
4º	20	55	40	38	65	60	50	58
3º	65	60	85	70	75	80	100	85
2º	75	70	90	78	80	90	100	90
1º	90	80	95	88	60	80	95	78
Média	63	66	78	69	70	78	86	78

Ambas as espécies tiveram, até o momento, um desenvolvimento mais adequado quando foram utilizadas estacas produzidas a partir da base dos ramos, portanto mais grossas e velhas.

Quanto à posição em relação ao nível da água, independentemente da origem (base, meio ou ponta) do material vegetal, nota-se que, para o vime, a proximidade com a linha de água teve influência positiva para o índice de pega. Para o sarandi-branco, a tendência parece ser a mesma, embora chegando a 90% de pega na segunda faixa, porém reduzindo para 78% na faixa 1. Esse fato aparentemente contraditório é apenas o resultado das características especiais que a porção mais próxima ao nível da água possui. Dito de outra forma: a menor porcentagem de estacas vivas presentes após 60 dias nessa faixa não se deve à mortalidade “natural”, mas ao fato de terem sido arrancadas por ocasião das cheias ocorridas no período.

O sarandi-branco, cujas características ecológicas podem ser evidenciadas pela simples observação do seu desenvolvimento natural, já ocorre de forma espontânea nas áreas mais próximas da linha de água. Sendo assim, pode-se afirmar que também essa espécie encontra o seu melhor desenvolvimento nos locais com maior umidade, junto ao nível da água.

No entanto, o experimento permitiu inferir que devem ser usadas formas especiais de plantio, como já recomendado na bibliografia, para que o material vegetal possa fixar-se e se desenvolver nos locais mais próximos ao nível da água. Segundo Begemann e Schiechl (1994), formas especiais de proteção dessa área podem ser conseguidas com o uso de tranças e esteiras vivas, feixes vivos em combinação com madeira e composições com pedras e telas (Vide Capítulo 7).

Quando foram utilizadas estacas provenientes da base e do meio dos ramos, para as faixas 1 e 2, ou seja, até a primeira metade da margem em relação ao nível da água no local do experimento, os índices médios de pega atingiram percentagens de 84% para o vime e de 91% para o sarandi-branco. Para a metade mais distante do nível da água, notadamente na faixa 4 dos dois primeiros conjuntos, os resultados não foram tão altos, possivelmente pela falta de umidade e pelas características não favoráveis (físicas e químicas) do solo, resultante do corte da margem, com a consequente retirada dos horizontes superficiais. Isso indica que, para tratamentos futuros, deve-se tentar uma reposição de solo com melhores características, quando possível, nas áreas onde os cortes para a remoção da barranca resultarem em exposição de horizontes mais profundos.

Além da maior mortalidade e de brotação menos vigorosa, as estacas mais finas provenientes da ponta dos ramos mostraram, no momento da implantação, características que dificultavam o seu plantio, entre elas, maior dificuldade em introduzi-las no solo e quebras constantes, sendo por vezes necessário que se produzisse o orifício de plantio com uma estaca mais resistente para depois

plantá-las. Isso faz com que a revegetação utilizando ramos muito finos, diâmetros menores que 0,5 cm, além de mais difícil e demorada, produza resultados menos satisfatórios, o que a torna não recomendável.

Todas as estacas consideradas vivas haviam brotado ao final de dois meses. Na ocasião, percebeu-se um sério ataque de formigas, fato que permitiu observar uma melhor resposta ao ataque nas estacas mais grossas – da base e do meio do ramo –, que, por possuírem uma brotação mais vigorosa, suportaram melhor as injúrias. As estacas produzidas a partir da ponta dos ramos mostraram-se mais suscetíveis à decepa pelas formigas, perdendo-se a muda por completo. Nas brotações mais vigorosas, o ataque, mesmo ocasionando a perda de boa parte das folhas e ramos novos, não resultou na morte das estacas, possibilitando que o combate às formigas, mesmo nesse momento, ainda fosse eficaz para salva-las. Visualmente, as formigas parecem preferir o sarandi-branco ao vime.

92

Com certeza, está-se ainda longe de se conhecer os aspectos de aptidão biotécnica citados no Item 5.3.4. Muitas dessas informações não estão disponíveis nem mesmo para as espécies citadas por diversos autores, como as reófitas. Para o emprego das plantas pela Engenharia Natural, entretanto, essas informações são essenciais. Dois exemplos: para o manejo ecológico dos cursos de água, existe uma grande diferença entre plantas que levem *um* mês ou *dois* meses para emitir raízes. Há uma grande diferença de aptidão biotécnica se as raízes das plantas se distribuem ao longo da parcela enterrada de uma estaca ou se estas se concentram apenas na sua base. Assim como esses, muitos outros exemplos poderiam ser citados, mas os dois apresentados elucidam a importância da pesquisa com plantas, visando, especificamente, à recuperação e estabilização dos cursos de água.

Visando contribuir com o preenchimento dessa lacuna, a Universität für Bodenkultur, de Viena, Áustria, que tem grande experiência no uso da Engenharia Natural para o manejo ecológico de cursos de água, desenvolveu um método especial – o canteiro experimental padrão – que foi adotado também pelos autores deste livro.

O estudo das características biotécnicas da vegetação está sendo feito pela colaboração entre o Departamento de Ciências Florestais da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), RS, Brasil, e o Institut für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau, da Universität für Bodenkultur (BOKU), e tem como objetivo específico identificar e verificar as espécies que possuem as características necessárias para serem consideradas como possíveis ferramentas biotécnicas na estabilização de taludes fluviais.

## **5.6 – Canteiro experimental padrão**

Com a ajuda de uma retroescavadeira, constrói-se um canteiro, em forma de camalhão, de 2 a 2,5 m de altura por 25 a 30 m de comprimento, com laterais inclinadas aproximadamente 45°, conforme a figura 5.3. Deve-se orientá-lo aproximadamente no sentido norte-sul, para que suas faces de plantio fiquem expostas para leste e oeste. Em cada lado, cavam-se duas linhas de plantio, em forma de banquetas, com uma pequena inclinação (aprox.10°) para o interior.

Após a construção do canteiro, que precisa ser cercado para evitar a entrada de animais, pode-se testar o comportamento de estacas e mudas. Um canteiro experimental, com as dimensões sugeridas, possibilita o teste de até 6 espécies simultaneamente, permitindo a acomodação mínima de 80 plantas (estacas) de cada espécie. Ao instalar o experimento, é importante que as estacas (ou mudas) fiquem pelo menos 25 cm distantes umas das outras.

93

### **5.6.1 – Instalação do experimento e coleta de dados**

As mudas e/ou estacas a testar (com, aproximadamente, 40 cm de comprimento) devem estar todas prontas para a instalação do experimento.

Antes do plantio, deve-se anotar o comprimento do material em teste, além do diâmetro das extremidades e do centro de cada estaca.

O canteiro deve ser dividido em quatro partes correspondentes às quatro coletas (de dados) posteriores, e cada uma delas receberá plantas de todas as espécies a serem estudadas. Com o objetivo de englobar e verificar possíveis variações, as plantas devem ser distribuídas na exposição leste e oeste e na primeira e segunda linhas de plantio (Figura 5.3).

Após o plantio, o canteiro precisa ser bem irrigado e coberto com palha para conservar a umidade e, principalmente, evitar o desenvolvimento de plantas indesejáveis. Também pode ser necessário o combate às formigas.

A cada coleta de dados, devem ser mensuradas as seguintes variáveis:

- Comprimento enterrado da estaca;
- Quantidade de brotos;
- Comprimento dos brotos;
- Diâmetro dos brotos;
- Quantidade de brotos secundários;
- Número de raízes;
- Comprimento das raízes;
- Diâmetro das raízes.

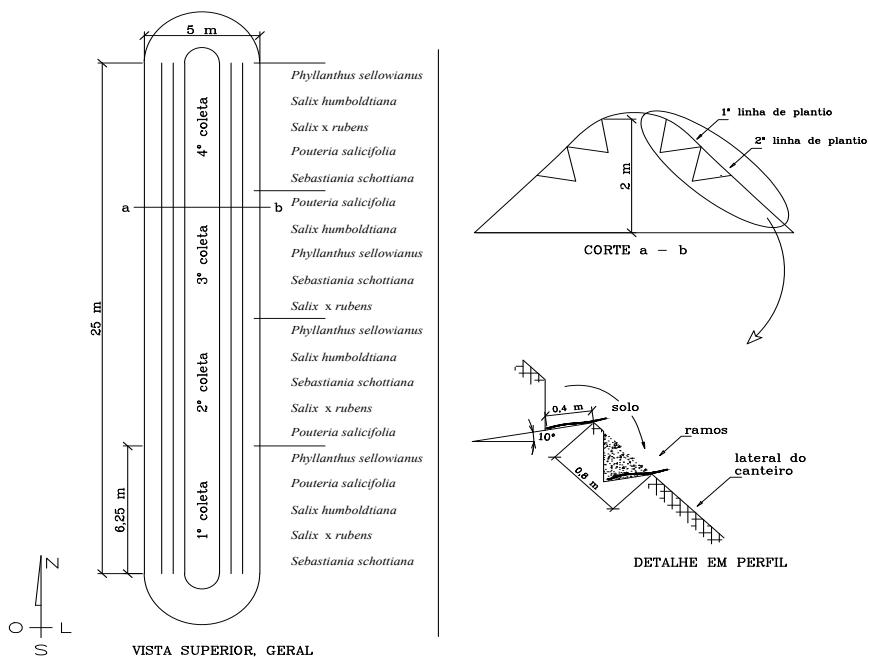
Dois meses após o plantio, deve ser feita a primeira coleta de dados e, na sequência, três novas coletas, uma a cada mês.

No momento de cada coleta, devem ser consideradas e anotadas a posição e a exposição de cada planta.

A fim de que as plantas possam ser retiradas com o seu sistema radicial intacto, para possibilitar uma boa contagem e medição de suas raízes, estas devem ser desenterradas cuidadosamente com a ajuda de água corrente, sob leve pressão.

A análise dos dados coletados fornece importantes informações, tais como o percentual de sobrevivência, o tempo para formação das raízes e brotos, o número, o tamanho, o volume e a distribuição das raízes e dos brotos. O experimento pode, convenientemente, ser repetido em diferentes épocas do ano, visando obter informações sobre o melhor período para o plantio de cada espécie nos taludes fluviais. Desse modo, torna-se possível escolher as espécies adequadas, visando combinar os plantios com os períodos em que a frequência de chuvas e enchentes é menor.

94



**Figura 5.3 – Canteiro experimental padrão**

### 5.6.2 – Análise preliminar de um canteiro experimental padrão<sup>1</sup>

Um primeiro canteiro experimental foi instalado em Faxinal do Soturno, RS, próximo ao Arroio Guarda-Mor. Embora não tenha sido analisado

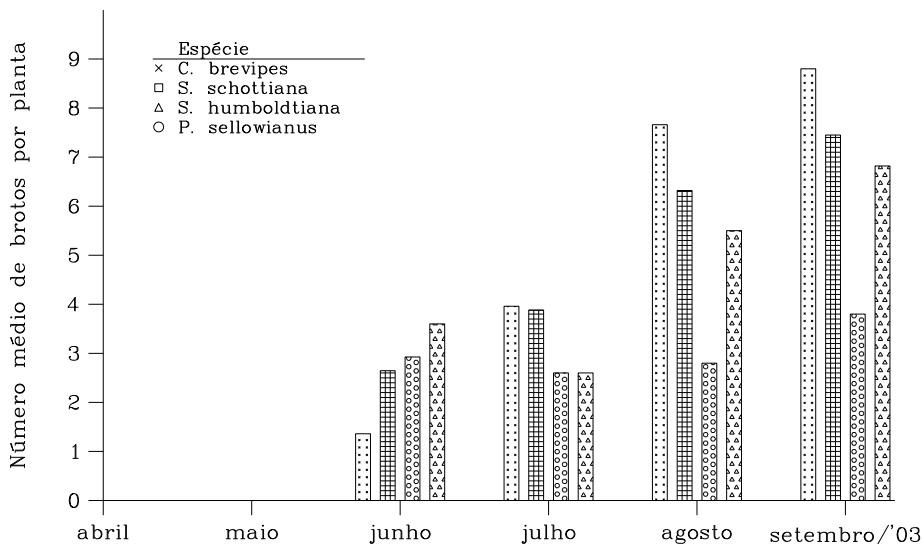
<sup>1</sup> Agradecimentos à Prefeitura Municipal de Faxinal do Soturno e, especialmente, a Werner Altreiter e Kathrin Plunger, estudantes da Universidade Rural de Viena (Universität für Bodenkultur).

completamente, já permitiu uma boa caracterização da aptidão biotécnica de quatro espécies reófilas de ocorrência local: *Calliandra brevipes*, *Phyllanthus sellowianus*, *Sebastiania schottiana* e *Salix humboldtiana*.

Como o experimento foi conduzido durante os meses de inverno, a primeira expectativa era quanto à capacidade de qualquer uma das plantas se desenvolver fora do período vegetativo tido como ideal. Surpreendentemente, *Sebastiania schottiana* apresentou 80% de pega e as outras espécies, mais de 90%.

Além do percentual de pega, outras características mais informativas quanto à aptidão biotécnica da espécie puderam ser observadas. Na figura 5.4, observa-se, graficamente, o número médio de brotos por planta em cada uma das coletas, para cada uma das espécies reproduzidas vegetativamente.

As plantas obtidas a partir de mudas tiveram maior mortalidade e mostraram desenvolvimento muito inferior às resultantes de reprodução vegetativa. Por esse motivo, e devido à sua menor importância quanto às propriedades biotécnicas e ao caráter preliminar dos resultados, as mudas foram desconsideradas na apresentação dos resultados.



**Figura 5.4** – Número médio de brotos por planta

Enquanto *Calliandra brevipes* conta com 8 brotos por planta após 5 meses, *Phyllanthus sellowianus* não apresentou mais que 3, em média.

Ao considerar a variável comprimento de brotos, vê-se que a tendência se inverte (Figura 5.5), ou seja, *Phyllanthus sellowianus* conta com os brotos mais longos, embora em menor número. No ajuste das médias, optou-se por uma regressão linear simples, sem intercepto. Mesmo que existam outras

funções de maior precisão, o ajuste linear justifica-se por sua simplicidade e grau de precisão adequado, evidenciado pelo alto coeficiente de correlação.

96

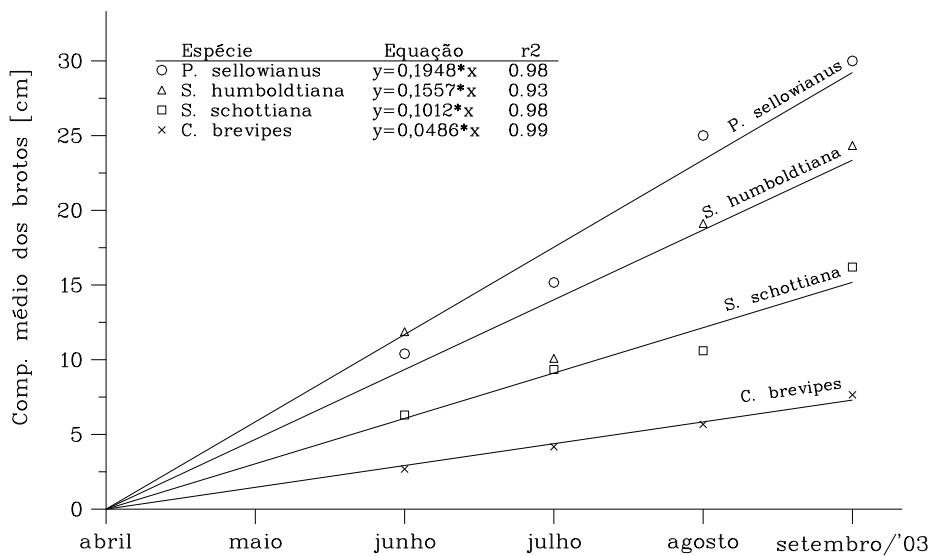


Figura 5.5 – Comprimento médio dos brotos para cada espécie

Se forem consideradas conjuntamente as duas características, número e comprimento de brotos, *Salix humboldtiana* possui a combinação que resulta em maior volume.

Quando o objetivo for unicamente reter o solo erodido superficialmente em uma encosta, as linhas de plantio devem contar com um grande número de brotos. Já as espécies com ramos mais vigorosos são apropriadas para locais em que se deseja conter materiais de maior diâmetro (cascalho, pedras, entulho etc.).

Mesmo que o desenvolvimento da massa aérea seja importante como forma de proteger e de estabilizar fisicamente os taludes fluviais, a principal característica a ser observada é a produção de raízes. Assim, na figura 5.6, é apresentado o número médio de raízes por metro de estaca enterrada. *Calliandra brevipes*, após 5 meses, não chegou a apresentar, na média, mais de uma raiz por metro de estaca. Portanto, os resultados para essa espécie foram desconsiderados no gráfico.

*Phyllanthus sellowianus*, após 2 meses, já contava, na média, com mais de 70 raízes por metro de estaca. No último mês, essa média ultrapassou 100 raízes por metro. A segunda espécie em número de raízes, *Salix humboldtiana*, não contava com mais de 28 raízes por metro de estaca após o segundo mês e somente ultrapassou 70 raízes por metro enterrado de estaca ao final do

experimento, após 5 meses. *Sebastiania schottiana*, com o menor número de raízes, produziu pouco mais de 40 raízes por metro de estaca, após os 5 meses.

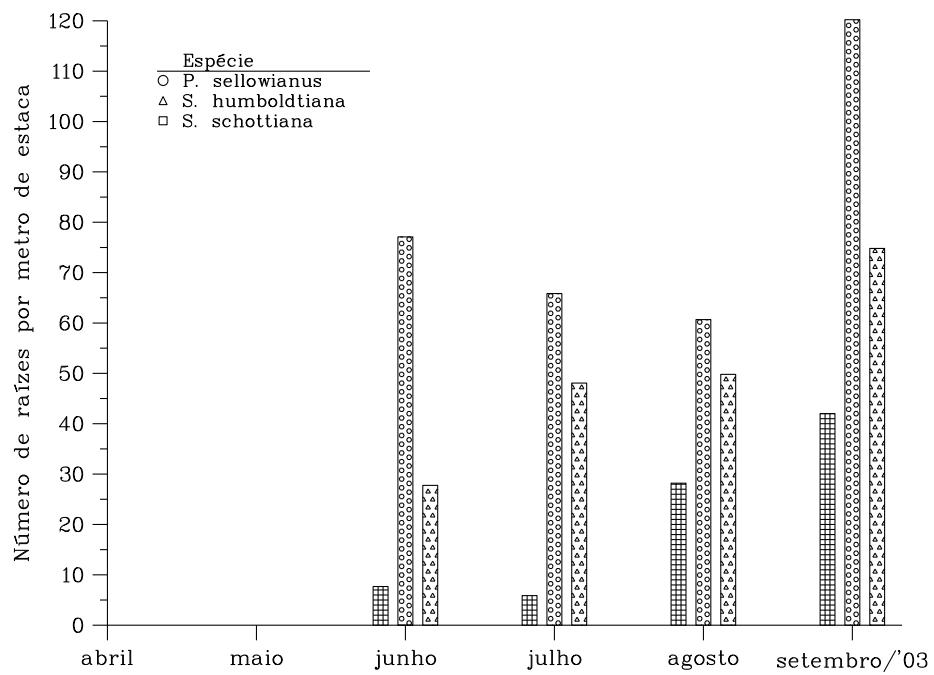


Figura 5.6 – Número médio de raízes por metro de estaca enterrada para cada espécie

97

Além do número médio de raízes, é importante o comprimento que elas podem alcançar. Na figura 5.7, é apresentada essa variável.

*Salix humboldtiana* possui as raízes mais longas, chegando a uma média de 16 cm após 5 meses. No entanto, como o desvio-padrão para essa variável é, logicamente, muito alto, não foi raro ocorrerem raízes com mais de 1 m de comprimento. Já *Sebastiania schottiana*, mesmo tendo o menor número de raízes por metro de estaca, possui raízes quase tão longas quanto as de *Phyllanthus sellowianus*.

Presumivelmente, os tratamentos vegetativos devem ser executados no término do inverno/início da primavera, quando o material possui o maior potencial de pega e desenvolvimento. Mesmo assim, verificou-se que esse potencial, durante o outono e inverno, é suficiente para viabilizar as obras de engenharia biotécnica. Ao final do inverno, quando se presume ocorrer a melhor época para os tratamentos vegetativos, os cursos de água costumam estar com seu nível máximo, dificultando ou até impedindo as intervenções físicas, necessárias em muitos casos. Daí a importância de se investigar a possibilidade de desenvolvimento de algumas espécies em diferentes épocas do ano.

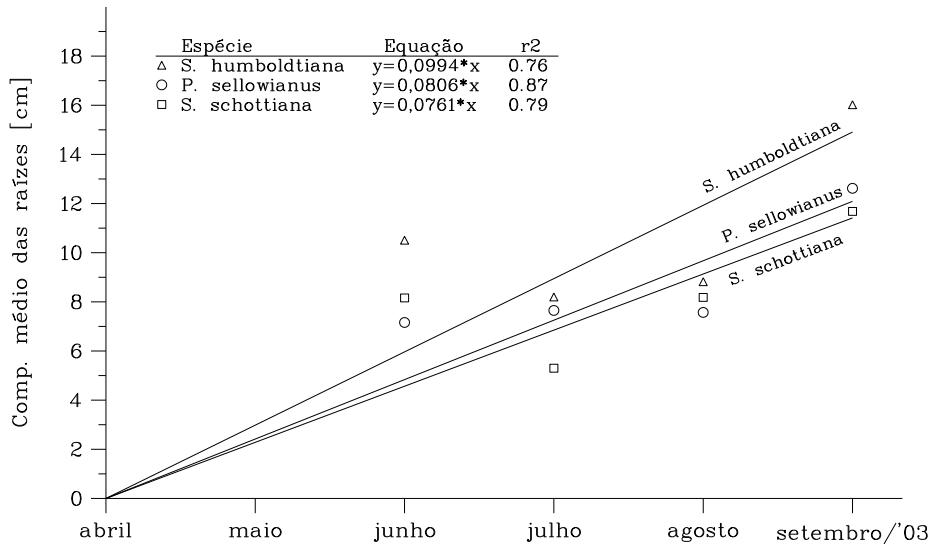


Figura 5.7 – Comprimento médio das raízes

*Calliandra brevipes*, apesar de apresentar um elevado poder de pega (90%) e desenvolver brotos, não foi capaz de produzir quantidade apreciável de raízes durante o período de abril a setembro de 2003 (2 raízes, em média, por metro de estaca enterrada). Isso a caracteriza como uma espécie pouco interessante para os tratamentos implantados vegetativamente, pelo menos na época em que foi testada.

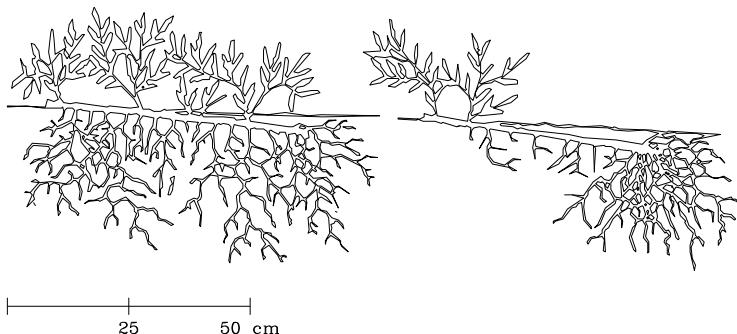
As outras três espécies – *Sebastiania schottiana*, *Phyllanthus sellowianus* e *Salix humboldtiana* –, além do elevado percentual de pega (80% para a primeira e mais de 90% para as duas últimas), foram capazes de providenciar brotos e enraizar-se suficientemente no mesmo período (abril a setembro), como demonstraram os dados das figuras 5.4 a 5.7. Na natureza, qualquer delas parece suportar condições extremas, como a submersão em água por períodos relativamente longos, o aterrramento (no caso de deposição de material) e a exposição parcial de suas raízes, no caso de erosão. Seu fácil, denso e profundo enraizamento, sua resistência à submersão e ao arrancamento pela força das águas e, especialmente, sua notável flexibilidade – quanto a *Phyllanthus sellowianus* e *Sebastiania schottiana* – distinguem essas espécies como capazes de produzir os efeitos desejados no controle de processos erosivos.

*Phyllanthus sellowianus* se reproduz vegetativamente muito bem, o que pode ser demonstrado pela sua capacidade de pega e, principalmente, por providenciar um grande número de raízes logo após o plantio (2 meses), revelando um enraizamento denso. Essa característica e, em especial, a rapidez com que um grande número de raízes é produzido fazem da espécie uma das

mais promissoras, entre as testadas, para o emprego biotécnico.

A produção, após 5 meses, de mais de 70 raízes por metro de estaca enterrada e, especialmente, o maior comprimento das raízes (16 cm em média, mas tendo frequentemente raízes com até 1,5 m) também fazem de *Salix humboldtiana* uma espécie com potencial biotécnico. Entretanto, o fato de ser uma árvore e não um arbusto limita o seu uso, exigindo formas particulares de plantio e tratos culturais. Por outro lado, os salseiros podem ser conduzidos para formar bons troncos – desde que plantados no leito de ocupação sazonal (leito maior e leito maior excepcional – Figura 2.3) e a uma distância da margem que não provoque o alavancamento dos taludes marginais. Sua exploração é viável para fins comerciais, sem causar prejuízos à função de proteção, desde que os cortes sejam de árvores singulares ou feitos em faixas. Não há necessidade de reposição após cada corte, em razão do intenso rebrote.

*Salix humboldtiana* e *Sebastiania schottiana* possuem uma característica que as distingue favoravelmente de *Phyllanthus sellowianus*. Esta última tem a clara tendência de providenciar a maioria de suas raízes apenas na base da estaca, enquanto as duas primeiras as distribuem igualmente em toda a extensão enterrada da estaca (Figura 5.8).



**Figura 5.8** – Representação mostrando a distribuição das raízes em estacas de *Salix humboldtiana* (esquerda) e de *Phyllanthus sellowianus* (direita)

Essa característica é conveniente para a maioria das situações em que a Engenharia Natural possa ser empregada, pois, de forma geral, garante que a estaca tenha mais estabilidade e seja mais dificilmente arrancada pela força das águas. Alguns métodos de plantio, como a esteira viva e o uso de feixes vivos, exigem que a espécie utilizada possua a característica de lançar raízes igualmente em toda a extensão do ramo.

É importante salientar que *Sebastiania schottiana*, mesmo apresentando o menor número de raízes, é promissora e importante, devido principalmente à sua maior abundância nos cursos de água do Rio Grande do Sul,

visto que, por vezes, o trabalho fica limitado pela disponibilidade local de material (tanto construtivo como vegetal). Assim, a opção por uma espécie de menor aptidão, porém de obtenção mais fácil, não significa, necessariamente, perda de eficiência e pode resultar em ganhos práticos de economia e exequibilidade da obra.

Além dessas, outras espécies parecem promissoras e merecem ser mais bem observadas. *Terminalia australis* e *Pouteria salicifolia*, por exemplo, ocorrem naturalmente no Arroio Guarda-Mor e, principalmente, no Rio Soturno, do qual o primeiro é afluente.

O conhecimento das características biotécnicas da vegetação é fundamental e precede as tentativas de estabilização dos taludes por obras de Engenharia Natural.

## 100 Bibliografia

BEGEMANN, W.; SCHIECHTL, H. M. *Ingenieurbiologie*: Handbuch zum ökologischen Wasser und Erdbau. 2. neubearbeitete Auflage. Wiesbaden und Berlin: Bauverlag GMBH, 1994.

BILONI, J. S. *Arboles autóctonos argentinos*. Buenos Aires: Tipográfica Editora Argentina, 1990.

BOELCKE, O. *Plantas vasculares de la Argentina nativas y exóticas*. Buenos Aires, 1981.

BURKART, A. Leguminosas. In: REITZ, P. R. *Flora ilustrada catarinense*. Itajaí: Herbário Barbosa Robrigues, 1979.

CABRERA, A. L. et al. *Flora de la Provincia de Buenos Aires*: oxalidáceas a umbelíferas. Parte IV. Buenos Aires: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (Inta), 1965.

DURLO, M. A.; MARCHIORI, J. N. C.; SPATHELF, P. Perspectivas do manejo florestal por árvores singulares. *Ciência & Ambiente*, Santa Maria, n. 20, p. 71-82, jan./jul. 2000.

\_\_\_\_\_; SUTILI, F. J. *Manejo biotécnico de cursos de água*: tratamento longitudinal. UFSM/CCR/Caderno Didático n. 11. Santa Maria: Ed. da UFSM, 2003.

FLORINETH, F. Ingenieurbiologische Maßnahmen bei Fließgewässern in Sudtirol. In: *Ökologie von Fließgewässern – Ingenieurbiologische*

*Sicherungsmaßnahmen*. Wien: Institut für Wassergüte und Landschaftswasserbau der TU, 1982.

\_\_\_\_\_. Weidenspreitlagen als Weg zur schenellen Uferbepflanzung und -sicherung. *Mitteilungen der Gesellschaft für Ingenieurbiologie Deutschlands*. Band 4, 1995.

\_\_\_\_\_; GERSTGRASER, C. *Ingenieurbiologie*. Wien: Institut für Landschaftsplanung und Ingenieurbiologie. Universität für Bodenkultur, 2000.

GERSTGRASER, C. H. *Ingenieurbiologische Bauweisen an Fließgewässern: Grundlagen zur Bau, Belastbarkeiten und Wirkungsweisen*. Diss. Wien: Universität für Bodenkultur, 1998.

GOMES, F. P. *Curso de estatística experimental*. 13. ed. Piracicaba, 1990.

GRAY, D. H.; LEISER, A. T. *Biotechnical slope protection and erosion control*. Florida: Krieger Publishing Company Malabar, 1982.

101

GUIDICINI, G.; NIEBLE, C. M. *Estabilidade de taludes naturais e de escavação*. São Paulo: Edgard Blücher, 1983.

HEWLETT, J. D. *Principles of forest hydrology*. Athens: University of Georgia Press, 1982.

LFU. *Naturgemäße Bauweisen - Oberirdische Gewässer*. Gewässerbiologie 47. 1. Auflage. Kalsruhe: Landesanstalt für Umweltschutz, 1996.

LOMBARDO, A. *Flora arbórea y arborescente del Uruguay*. 2. ed. Montevideo, 1964.

LONGHI, S. J. *Nomenclatura de espécies florestais e ornamentais do Rio Grande do Sul*. Santa Maria: Cepef/Fatec, 1988. (Série Técnica, 3).

LORENZI, H. Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil. Nova Odessa: Plantarum, 1992.

\_\_\_\_\_; SOUSA, H. *Manual de plantas ornamentais no Brasil: arbustivas, herbáceas e trepadeiras*. Nova Odessa: Plantarum, 1995.

MOLCHANOV, A. A. *The hydrological role of forest*. Jerusalém, 1963.

MARCHIORI, J. N. C.; SOBRAL, M. *Dendrologia das angiospermas: Myrtales*. Santa Maria: Ed. da UFSM, 1997.

\_\_\_\_\_. *Dendrologia das angiospermas: leguminosas*. Santa Maria: Ed. da UFSM, 1997.

MARCHIORI, J. N. C.; SOBRAL, M. *Dendrologia das angiospermas: das bixáceas às rosáceas*. Santa Maria: Ed. da UFSM, 2000.

\_\_\_\_\_. *Fitogeografia do Rio Grande do Sul: campos sulinos*. Porto Alegre: EST, 2004.

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

PINHEIRO, R. J. B. *Estudo de alguns casos de instabilidade da encosta da Serra Geral no Estado do Rio Grande do Sul*. 2000. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

REITZ, P. R. Combretáceas. In: \_\_\_\_\_. *Flora ilustrada catarinense*. Itajaí: Herbário Barbosa Robrigues, 1967.

102 \_\_\_\_\_. Euforbiáceas. In: \_\_\_\_\_. (Org.). *Flora ilustrada catarinense*. Itajaí: Herbário Barbosa Robrigues, 1988.

\_\_\_\_\_; KLEIN, R. M.; REIS, A. *Projeto Madeira do Rio Grande do Sul*. Superintendência do Desenvolvimento da Região Sul (Sudesul) – Governo do Estado do Rio Grande do Sul – Herbário Barbosa Robrigues (HBR), 1988.

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

TUCCI, C. E. M. *Hidrologia: ciência e aplicação*. Porto Alegre: Ed. da UFRGS, 1993.

WOLLE, C. M. Poluição e escorregamentos: causas e efeitos na Serra do Mar. In: COBRAMSEF, 8., 1986, Porto Alegre. *Anais...* Porto Alegre: ABMS, 1986. v. 7, p. 178-190.

# 6

## MANEJO DE CURSOS DE ÁGUA

### 6.1 – Introdução

Nos Capítulos 1, 2 e 3, tratou-se do intemperismo e da erosão, classificando-se tais fenômenos segundo suas origens, causas e formas e dando-se especial importância aos processos fluviais. Conhecidos os diferentes mecanismos e formas de manifestação da erosão, especialmente junto aos corpos de água, cumpre buscar técnicas para evitar, atenuar ou combater seus efeitos indesejáveis. Do ponto de vista prático, no que diz respeito à busca por soluções, as contribuições dadas por diferentes profissionais, historicamente, orientaram-se por aspectos nem sempre coincidentes. Surgiram, assim, modelos que vão desde a construção de pesadas obras de engenharia civil, com a retificação e concretagem do leito de cursos de água, até as fugazes campanhas de “educação ambiental”, que apresentam a simples revegetação – o reflorestamento – das margens como solução. As primeiras, em geral, solucionam os problemas, mas, além de onerosas, produzem drásticas modificações na paisagem que, por vezes, são desnecessárias e que nem sempre respondem da melhor maneira aos anseios ecológicos, econômicos e estéticos. Por outro lado, as numerosas campanhas de educação ambiental e a distribuição de mudas à comunidade, comuns em nosso meio, sem que se levem em conta aspectos técnicos que garantam a estabilização das margens, quase nunca são capazes de produzir os efeitos práticos esperados. Nesse contexto, desenvolve-se, recentemente, também no Brasil um campo especial da ciência, denominado Engenharia Natural.

A Engenharia Natural compreende os trabalhos de construção de estruturas físicas com materiais inertes, em combinação com material vegetal vivo, com vistas à estabilização e/ou recomposição de encostas, de áreas de-

gradadas e das margens de sargas, ravinas, arroios, córregos e rios. Quando se restringe aos cursos de água, a Engenharia Natural pode ser entendida no campo do Manejo Biotécnico de Cursos de Água. A ideia fundamental do manejo biotécnico de cursos de água é aproveitar as vantagens dos dois tipos de materiais construtivos, o inerte e o vivo, combinando-os para conseguir a estabilização e/ou a recuperação das áreas tratadas, sem descuidar dos aspectos ecológicos, econômicos e sociais envolvidos.

## 6.2 – Métodos utilizados no manejo de cursos de água

Os métodos disponíveis para o manejo de cursos de água foram classificados, de forma genérica, em dois grupos distintos:

- Manejo passivo;
- Manejo ativo.

No primeiro grupo, enquadram-se ações preventivas feitas para a bacia hidrográfica como um todo, sempre visando, entre outros aspectos, também o controle dos cursos de água. No segundo grupo, as ações são direcionadas a áreas relativamente pequenas, onde os problemas são mais pontuais. Incluem a limpeza dos cursos de água, a remodelagem, o recapeamento vegetal das margens e outras técnicas de Engenharia Natural.

As maiores possibilidades de êxito contra os prejuízos causados pela água encontram-se na solução dos problemas já na origem, isto é, na bacia de recepção. As ações para chegar a tal objetivo podem ser muito variadas, abrangendo desde medidas preventivas até as obras de correção.

As ações preventivas compreendem o manejo correto da área da bacia e consistem, basicamente, na alocação das diferentes atividades (econômicas) em consonância com as características ecológicas dos diferentes locais. De maneira genérica é quase sempre desejável, por exemplo, manter uma cobertura vegetal permanente (floresta, pastagem, fruticultura, etc.) nas encostas íngremes da bacia, destinar as áreas levemente inclinadas ao pastoreio e usar apenas as terras mais planas para os cultivos agrícolas, adotando, ainda, os cuidados específicos para cada área e cultura.

Dado o grande número de variáveis envolvidas – desde físicas até sociais –, o manejo correto das áreas rurais torna-se, por vezes, difícil de ser executado. Muitos proprietários rurais, entretanto, já perceberam a necessidade de tomar atitudes concretas de otimização do uso de suas terras, com vistas à preservação da capacidade produtiva e, até, ao eventual aumento da produtividade global de sua propriedade. Nesse sentido, evitam queimadas, fazem plantio direto, constroem curvas de nível e terraços, adotam a rotação de culturas e alocam

seus cultivares nos locais que, por experiência ou por informação obtidas de diversas fontes, lhes parecem os mais apropriados.

Os eventos relacionados ao fluxo da água, decorrentes de ações ou omissões passadas ou recentes, são inevitáveis. Não raro, tais eventos se constituem em problemas reais ou potenciais e carecem de solução. Nesses casos, podem ser adotadas, basicamente, duas formas de ação: o tratamento vegetativo e o tratamento construtivo. Tais ações podem ser empregadas isoladamente ou combinadas entre si, em diferentes graus e diferentes etapas, como preconiza a Engenharia Natural.

As medidas vegetativas por si sós, quando tomadas em tempo hábil, poderão ser suficientes para prevenir ou resolver os problemas. O tratamento vegetativo, quando visto de maneira mais ampla, pode incluir o remanejo das áreas, dedicando às culturas agrícolas perenes ou ao reflorestamento aquelas que, eventualmente, tenham sido usadas de forma inadequada. Como se sabe, as diferentes coberturas vegetais têm grande influência no comportamento do ciclo hidrológico, o que torna as plantas uma importante ferramenta para o manejo dos cursos de água.

Considerando-se toda a bacia de recepção, a questão parece resumir-se, simplesmente, na alocação correta de cada cultivar. Porém, em pontos isolados e ao longo de cursos de água, pode ser necessária a implantação de vegetação especial, com o objetivo principal, ou até exclusivo, de proporcionar solução dos problemas específicos existentes.

O que normalmente acontece, entretanto, é que a erosão, quer seja laminar, de entalhamento ou decorrente de movimentos de massa, somente é percebida quando o tratamento vegetativo, apenas, não é mais suficiente.. A percepção e o interesse pela solução do problema só ocorrem em um estágio em que, geralmente, já é difícil ou impossível a implantação de uma cobertura vegetal sem tratamento prévio da área. Nesses casos, para que as espécies a serem plantadas adquiram o vigor mínimo necessário para sobreviver, é preciso recorrer a uma série de trabalhos de melhoria e de consolidação do terreno.

As obras de melhoria e de consolidação do terreno podem ser simples e de baixo custo, porém devem ter vida útil, no mínimo, igual ao tempo necessário para assegurar a sobrevivência e o efeito protetivo da vegetação implantada. A melhoria do terreno implica, com frequência, na remodelagem (retaludamento) da área e sua eventual cobertura com diversos materiais, a fim de melhorar suas características para a vegetação a ser utilizada. A consolidação consiste na construção de pequenas obras, utilizando, de preferência, materiais de baixo custo, que possam ser encontrados no próprio local, como, por exemplo, restos de vegetais, galhos, madeira roliça e pedras, em diferentes proporções, combinações e disposições sobre o terreno.

Nos casos em que as condições edáficas naturais, ou a perda do horizonte vegetal provocada pela ação constante da erosão, não permitirem o cultivo de espécies protetoras, as obras de consolidação deverão preceder as de melhoria e ser de caráter permanente (obras longitudinais e transversais de madeira tratada, de alvenaria ou de pedra). Disso decorre a importância de agir-se preventivamente para evitar a construção de obras de caráter mais permanente, cujos custos, em geral, são mais elevados.

Assim, quando os problemas já se encontram em estágio avançado, a única possibilidade que se tem é a construção de obras permanentes para a retenção dos materiais transportados, com vistas a alcançar, sucessivamente, a formação de um perfil de compensação estável e, só depois, adotar-se o tratamento de consolidação e de cobertura vegetal.

Além do manejo passivo e do manejo ativo dos cursos de água, pode-se, ainda, citar as ações de regulamentação, nas quais se incluem todas as disposições legais de âmbito federal, estadual, municipal ou de entidades interessadas na questão. Essas disposições, entretanto, sempre podem ser enquadradas como manejo passivo ou ativo. As limitações ou as imposições da adoção de determinadas formas de uso e de descarte dos recursos hídricos, quando observadas do ponto de vista legal, compõem um campo de estudo específico, que ultrapassa os objetivos deste livro.

O que se pretende, neste contínuo, é fornecer alguns subsídio para as ações de estabilização e correção de cursos de água, motivo pelo qual serão tratadas apenas as medidas técnicas passivas e ativas, independentemente de serem ou não preconizadas pela legislação.

### **6.3 – Manejo passivo de cursos de água**

Por manejo passivo, numa visão mais abrangente, podem ser entendidas quaisquer ações executadas na bacia hidrográfica que indiretamente influenciem o comportamento dos cursos de água. Assim, a escolha de culturas, formas de preparo do terreno, formação de curvas de nível, terraços, muros, manutenção de cobertura vegetal morta ou verde, rotação de culturas etc., embora não se enquadrem como tratamento de cursos de água propriamente dito, têm grande influência sobre o seu comportamento. De maneira mais restrita, e no contexto deste livro, como manejo passivo são entendidas apenas as ações restritas às faixas marginais que não modificam as características físicas do eixo longitudinal, do perfil transversal e das margens dos cursos de água. No manejo passivo, portanto, não são modificadas as curvas do canal e a declividade do perfil longitudinal. Também permanecem inalteradas as

dimensões e as formas dos perfis transversais e não são feitas modificações nos materiais componentes dos taludes.

O manejo passivo dos cursos de água parte da suposição de que apenas a interrupção das atividades até então praticadas próximas às margens e o eventual incentivo da regeneração natural sejam suficientes para conferir a estabilização desejada.

### **6.3.1 – Isolamento de faixa marginal**

No meio rural, é bastante comum a expansão de cultivos agrícolas ou de áreas destinadas à pecuária até as margens dos cursos de água. Como isolamento, entende-se a interrupção do uso de uma determinada faixa ao longo dos cursos de água para essas atividades econômicas tradicionais. Tais atividades colocam em risco a estabilidade das margens, podendo resultar em prejuízos bem maiores do que a simples perda de área que o isolamento representa. A largura da faixa isolada pode ser uma decisão do proprietário, desde que respeitados os limites mínimos impostos pelas leis vigentes.

Vale ressaltar que, independente da legislação em vigor, o isolamento de uma faixa marginal, em muitos casos, pode ser uma boa solução para a estabilização das margens. Isso ocorre especialmente quando a vegetação natural do local é vital e agressiva, isto é, tem grande capacidade de dispersão e consegue superar as condições frequentemente adversas que costumam ocorrer às margens dos cursos de água. Outro requisito para o sucesso dessa prática passiva é que as margens já apresentem certa estabilidade natural, isto é, que não sofram movimentações frequentes (deslizamentos, desmoronamentos, corrosões) que impeçam a fixação natural da vegetação.

Nos casos em que a faixa confrontar com áreas de agricultura, o isolamento poderá ser materializado através da simples suspensão das atividades agrícolas. Quando necessário, isto é, quando não se reconhece visualmente o limite entre a faixa protegida e a área em uso, poderá ser feita a demarcação da linha limítrofe através de cercas ou de estacas (semelhantes a tramas) cravadas sobre o local. A demarcação feita dessa forma tem como objetivo lembrar a cada proprietário a necessidade da proteção e facilitar a vistoria a eventuais instâncias de fiscalização. A visualização por meio de estacas, entretanto, só precisará ser mantida (substituindo-se as danificadas e repondo-se as eventualmente desaparecidas) até que se estabeleça claramente o limite entre as áreas em uso e aquelas de preservação.

Nos casos em que a faixa de proteção passar por áreas destinadas à pecuária (pastagens, potreiros e similares), o isolamento implicará na colocação de dispositivos que impeçam o acesso de animais à faixa isolada. Nesses casos,

poderão ser construídas cercas elétricas, de arame, de madeira ou de qualquer outro material que cumpram com a finalidade de isolamento.

### 6.3.2 – Proteção da regeneração natural

Após o isolamento da área, a providência a ser tomada, quando se quer acelerar a recuperação ou estabilização das margens, é a proteção e, quando conveniente, o incentivo seletivo da regeneração natural presente na faixa protegida.

A proteção da regeneração natural implica, basicamente, no compromisso de não se efetuar roçadas e capinas, bem como evitar o usar herbicidas e similares na faixa segregada pelo isolamento, exceto quando tais ações sejam convenientes para o estabelecimento e desenvolvimento de espécies de características biotécnicas mais desejadas.

108

O objetivo da proteção da vegetação natural é conferir o máximo benefício possível às margens. Como vegetação natural, entendam-se todas as plantas nativas ou exóticas que venham a se estabelecer espontaneamente na faixa marginal. Isso engloba, fundamentalmente, três grupos com distintas características: o das gramíneas e herbáceas, o das arbustivas e o das plantas arbóreas.

A proteção das plantas do primeiro grupo (gramíneas e herbáceas) se justifica pelo fato de que elas possuem caráter pioneiro, grande agressividade e desenvolvimento rápido, instalando-se frequentemente em locais erodidos, pobres em nutrientes e matéria orgânica. As gramíneas têm grande capacidade de cobertura superficial e, geralmente, possuem um sistema radicial espesso e longo. As espécies herbáceas, por sua vez, oferecem ao local uma estabilização relativamente rápida e eficaz. Além disso, as plantas herbáceas são precursoras de plantas maiores, por melhorarem as condições dos habitats através da ciclagem de nutrientes, da deposição de material orgânico, do sombreamento, da retenção de umidade, da descompactação e da aeração do solo. Tais características biotécnicas fazem com que sejam boas protetoras e estabilizadoras de áreas degradadas, principalmente nos primeiros momentos do processo de estabilização.

No segundo grupo, existem algumas espécies arbustivas autóctones e frequentes nas margens da maioria dos cursos de água do Rio Grande do Sul. Essas espécies têm características biotécnicas de grande interesse para a estabilização das margens. Entre elas, Marchiori (2000, 2004) destaca o sarandi-amarilho (*Terminalia australis*), o sarandi-vermelho (*Sebastiania schottiana*), o sarandi-mata-olho (*Pouteria salicifolia*) e as caliandras vermelha e branca (*Calliandra tweediei* e *Calliandra brevipes*) além de *Phyllanthus sellowianus*.

Além dessas, pode-se incluir *Salix humboldtiana* e os vimes (*Salix viminalis*,

*Salix x rubens* e *Salix babylonica*), que, mesmo apresentando porte arbóreo, podem ser mantidos em porte arbustivo através de podas ou descepas periódicas.

Essas espécies, apesar de um desenvolvimento inicial mais lento do que as do primeiro grupo, estão muito bem adaptadas às condições ecológicas (adversas para outras espécies) dos cursos de água e, após sua consolidação, proporcionam um efeito protetivo mais intenso e de permanência mais longa.

Nas observações a campo, mesmo que expeditas, salientam-se outras características biotécnicas das caliandras, dos amarilhos e dos sarandis: apresentam boa capacidade de suportar a exposição parcial de suas raízes quando ocorre a erosão das margens, suportam bem o aterramento oriundo da deposição de material, são resistentes a períodos de seca e toleram períodos relativamente longos submersos em água. Essas características, aliadas ao seu sistema radical espesso e à grande flexibilidade dos ramos, as distinguem, a princípio, como ferramentas biológicas para o manejo de cursos de água.

Em razão disso, quando tais espécies ocorrem na faixa de proteção, devem ter seu estabelecimento, crescimento e reprodução incentivados. A instalação e o crescimento podem ser incentivados através do corte ou arranque de plantas menos nobres que lhes façam concorrência. A reprodução pode ser auxiliada pela dispersão intencional de suas sementes e de propágulos, pois todas as espécies citadas têm capacidade de reprodução vegetativa. Isso significa que, sempre que possível, devem ser coletadas sementes ou galhos que devem ser espalhadas ou plantadas em outros locais.

Muitas espécies florestais arbóreas ocorrem às margens dos rios e arroios que drenam o Estado do Rio Grande do Sul. Entre elas, destacam-se o acoita-cavalo, a guajuvira, o tarumá, o angico, o salseiro, o ingá, entre outras. As espécies que, quando adultas, adquirem grande porte, entretanto, não são as melhores para a estabilização de margens, especialmente quando estas já se encontram em processo de corrosão e desbarrancamento. Seu peso e o efeito de alavanca que exercem sobre as margens, especialmente na ocorrência de ventos fortes, as tornam, por vezes, prejudiciais à estabilização (Figura 5.1 e Tabela 5.1). Na ocorrência de grandes enchentes, tais árvores, especialmente quando tombam, constituem uma barreira física ao livre escoamento das águas e podem, com frequência, constituir-se em mecanismo de apreensão de materiais (lixo, galhos, troncos, árvores inteiras) que descem a corrente. Tal situação forma barragens temporárias que, ao se romperem, podem provocar grandes danos.

Em razão desses fatos, portanto, no processo de sucessão natural que se estabelece pelo isolamento, nem todas as plantas devem ser manejadas da mesma maneira. Para a faixa mais próxima à margem, devem ser incentivadas,

de preferência, as espécies que, de forma natural ou com os devidos tratos, possam assumir um porte rasteiro ou, no máximo, arbustivo. Quanto às espécies de porte arbóreo, devem ser conservadas apenas aquelas localizadas nas porções mais afastadas das margens, fora do leito maior.

O incentivo das plantas arbóreas se dá pela eliminação da concorrência através do coroamento (roçada e/ou capina) ao redor das mesmas. Sempre que possível, tais plantas deverão ser conduzidas para a formação de fustes longos e retos, através da poda (bem rente ao tronco) dos galhos laterais. Tal procedimento é feito com vistas à posterior utilização da madeira. O aproveitamento do tronco, que, obviamente, implica o corte de árvores singulares, em vez de provocar uma diminuição do efeito protetor, representa, geralmente, o reforço e a renovação desse efeito. A renovação se dá automaticamente quando ocorrer a brotação ou deverá ser induzida pelo plantio de novas árvores e pelo incentivo de novos indivíduos desejáveis.

## 6.4 – Manejo ativo de cursos de água

Por manejo ativo de cursos de água, também dito manejo biotécnico, entendem-se as ações que modificam as características dos cursos de água. O manejo ativo engloba a limpeza dos leitos, o uso de obras longitudinais e transversais isoladamente ou em combinação, além do revestimento vegetal induzido (artificial) das margens.

### 6.4.1 – Limpeza do canal

A limpeza dos cursos de água consiste basicamente na retirada de materiais de seu leito, bem como de suas margens. Não se trata aqui, pois, da limpeza no sentido restrito da coleta de lixo depositado diretamente ou trazido pela ação das enchentes (embora isso também seja necessário). A limpeza é tomada no sentido técnico e engloba (além do lixo) a retirada de blocos singulares de pedras, conjuntos de seixos e materiais vegetais, depositados em posições que impeçam ou dificultem o livre fluxo das águas.

Os blocos maiores de pedra, transportados das partes mais altas ou expostos pela ação de escavação, podem constituir-se em obstáculos para o fluxo da água e ocasionar turbilhonamento, divisão e desvio do fluxo, tendo como consequência uma maior ação erosiva nas barrancas laterais e em profundidade. A remoção desses materiais de posições inconvenientes e sua acomodação adequada junto às margens, enfileiradas próximo à linha de água, são ações que aumentam a estabilidade de forma significativa.

A retirada de depósitos de seixos, por vezes formadores de pequenas ilhas, que dividem e desviam o corpo de água, é também recomendável quando a finalidade técnica for o requisito mais importante. A realocação desses seixos, como material de enchimento, em posições onde estão ocorrendo desbarancamentos, preferencialmente atrás da linha de blocos de pedras maiores ou das paredes de madeira (Item 7.5.3.2 e Figuras 7.19 a 7.21) proporciona maior segurança às margens. Sempre que possível, o manejo dos blocos singulares e dos seixos deve objetivar também a eliminação de mudanças muito abruptas na direção do curso, conferindo-lhe curvas mais suaves.

A retirada de material vegetal inclui a remoção de plantas, galhos, touceiras e troncos que se encontram dentro do leito, como também daqueles que representam ameaça potencial. São englobadas, portanto, também aquelas plantas que, devido às suas dimensões, à sua idade e ao seu posicionamento em relação à margem, não conferem resistência, podendo ser substituídas por outras que desempenhem melhor esse papel. Isso significa o corte (e eventual utilização) de árvores.

Conforme já comentado, as árvores grandes ou touceiras de taquaras, quando muito próximas ao leito dos cursos de água, podem se tornar um impedimento ao livre fluxo das águas, especialmente na ocorrência de enchescentes. À primeira vista, isso pode parecer bom, pois rouba energia erosiva da água. Na maioria dos casos, porém, é causa do surgimento de erosões e desbarancamentos, devido ao efeito de turbilhonamento exercido na água e pelo fato de as árvores funcionarem como alavancas sobre a margem.

O efeito negativo da existência de árvores junto às margens é ainda mais provável quando os troncos se encontram muito inclinados na direção do leito. Quando já caídos, o problema ocorre de imediato e se agrava a cada cheia. Nesses casos, a limpeza do leito é uma medida imprescindível. O material retirado poderá ser utilizado pelo proprietário, preferencialmente, para a correção de problemas no próprio leito, ou na forma que julgar conveniente, especialmente em se tratando de troncos de madeira de boa qualidade.

#### **6.4.2 – Revestimento vegetal das margens**

Nos casos em que, na faixa marginal isolada, ocorrerem áreas erodidas e sem cobertura vegetal, pode ser necessária a indução do revestimento vegetal, através da semeadura ou plantio de espécies de rápido crescimento (vide métodos adiante). As plantas a serem empregadas para tal fim podem ser diferentes de local para local. O importante é que as plantas tenham capacidade de recobrimento rápido das áreas degradadas e que consigam melhorar as condições para o estabelecimento futuro de outras espécies mais nobres – com vistas à even-

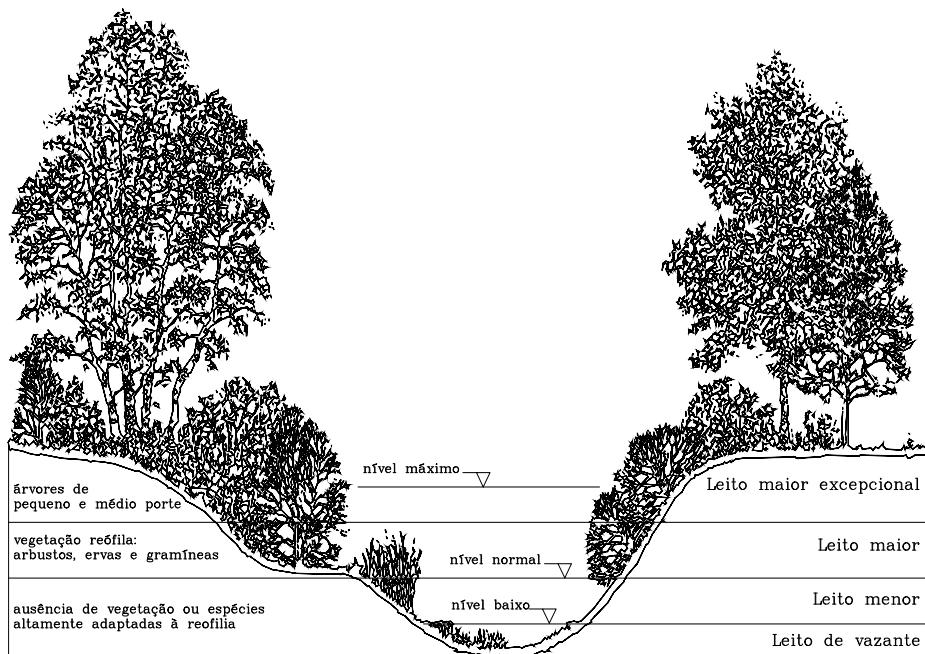
tual utilização – e, especialmente, de ação protetiva mais eficaz e duradoura.

Sempre que possível, a escolha das espécies usadas no recapeamento das margens deve recair sobre aquelas que, além da proteção pretendida, possam ser utilizadas nas propriedades ou que possam ser comercializadas *in natura* ou após beneficiamento.

Pelas razões expostas anteriormente, para a faixa protegida mais próxima à margem, quando for necessário e possível induzir o recapeamento vegetal, este deverá ser feito com espécies de menor porte e características biotécnicas adequadas às condições do ambiente. Exigem-se agressividade e rusticidade, além de flexibilidade da parte aérea. As plantas devem, ainda, ter sistema radial apropriado, isto é, longo, denso e com capacidade de suportar inundações e exposições temporárias.

Para a parte mais afastada da margem, na faixa fora do leito maior, poderão ser empregadas espécies de porte arbóreo. Assim, constituir-se-á uma configuração conveniente da vegetação ribeirinha em relação ao perfil transversal, conforme exemplificado esquematicamente na figura 6.1.

112



**Figura 6.1** – Estrutura vertical e horizontal (corte transversal) desejável para a vegetação ribeirinha

Com o aumento da distância em relação ao centro do perfil transversal, no leito maior excepcional, ou para pequenos cursos de água ou taludes com incli-

nação suave é possível que se busque a proteção utilizando-se espécies de maior porte, inclusive as madeireiras, como o angico (*Parapiptadenia rigida*), a guajuvira (*Cordia americana*), o açoita-cavalo (*Luehea divaricata*), e muitas outras.

A produção de madeiras nobres nativas, que crescem bem nesses locais, é o mais desejável. Espécies exóticas aselvajadas e que já se desenvolvem bem nas áreas marginais, com o devido manejo, podem ser de interesse. Assim, além de proteger as margens, os proprietários têm um aproveitamento econômico da área.

#### 6.4.2.1 – Renovação da proteção

Os primeiros metros junto ao leito – os taludes fluviais propriamente ditos –, que, após eventual modelagem, precisam ser tratados com material vivo, devem ser recobertos apenas com vegetação não arbórea. Mesmo assim, pode ser necessário o corte (poda drástica) da parte aérea das plantas, para manter e, eventualmente, aumentar sua capacidade protetiva. A poda proporciona um maior enraizamento e visa também evitar a diminuição excessiva da seção de vazão e o consequente aprisionamento de materiais vindos de montante (galhos, troncos, lixo).

Para a revegetação do restante da faixa marginal, fora da barranca propriamente dita, podem ser utilizadas espécies de maior porte. Mesmo que o plantio seja feito com poucas espécies ou até uma única, independente se nativa ou exótica, não se incorre em problema ecológico para o local: dada a pequena largura da faixa que, de fato, interessa à estabilização das margens dos cursos de água, a incidência lumínica pelas laterais geralmente é suficiente para o estabelecimento e o desenvolvimento de vários estratos vegetacionais, compostos por espécies nativas, proporcionando, assim, uma excelente proteção marginal e estabilidade ecológica. Dessa forma, pode-se obter produção madeireira e proteção das margens simultaneamente.

A formação de faixas florestais às margens dos cursos de água, seja pelo plantio de espécies produtoras de madeira, seja pela condução de plântulas oriundas de regeneração natural, pressupõe o aproveitamento dos troncos. Tal aproveitamento representa também uma renovação da proteção, na medida em que ocorra a brotação dos tocos ou na medida em que as árvores exploradas sejam substituídas por novas plantas.

Ressalta-se, pois, que a proteção das margens e a exploração madeireira, quando feitas adequadamente, não são mutuamente excludentes, e sim, complementares (DURLO; MARCHIORI; SPATHELF, 2000). Além disso, a perspectiva de uso da madeira produzida pode representar uma potente ferramenta de incentivo à proteção das áreas ribeirinhas. Dessa maneira, o manejo

correto de cursos de água implica o corte de árvores maduras situadas próximas às margens. Tal ação, tecnicamente necessária à estabilização e à recuperação desses locais é, ainda, economicamente benéfica e ecologicamente correta.

### 6.4.3 – Engenharia Natural

Em muitas situações, o recapeamento vegetal das margens não é suficiente para conferir-lhes estabilidade. Existem inúmeros casos em que tal medida é até mesmo inviável.

Como estabilizar, por exemplo, um barranco friável e abrupto, de três metros de altura, situado no raio externo de uma curva? Em casos assim, pode-se lançar mão da chamada Engenharia Natural.

As obras de Engenharia Natural para o tratamento de cursos de água incluem materiais inertes e materiais vivos em diferentes graus de combinação, caracterizando um campo de estudos relativamente recente no Brasil. Tais obras devem ser simples e de baixo custo.

A simplicidade é uma característica que permite, no caso de pequenas aplicações rurais, que tais intervenções possam ser entendidas e também executadas pelos próprios proprietários, utilizando-se de materiais encontradiços localmente. Contudo, no caso de obras de infraestrutura ou de maior complexidade, deve-se consultar especialistas, para obter o adequado dimensionamento da construção, preferencialmente procedendo a confecção e a aprovação de projetos técnicos.

As diversas formas, funções, limitações, características e os diferentes materiais de construção das obras de Engenharia Natural são abordados no capítulo seguinte.

## Bibliografia

DURLO, M. A.; MARCHIORI, J. N. C.; SPATHELF, P. Perspectivas do manejo florestal por árvores singulares. *Ciência & Ambiente*, Santa Maria, n. 20, p. 71-82, jan./jun. 2000.

MARCHIORI, J. N. C. *Dendrologia das angiospermas: das bixáceas às rosáceas*. Santa Maria: Ed. da UFSM, 2000.

\_\_\_\_\_. *Fitogeografia do Rio Grande do Sul: campos sulinos*. Porto Alegre: EST, 2004.

# 7 ENGENHARIA NATURAL

## 7.1 – Introdução

### 7.1.1 – Definição

O conhecimento das exigências e características biológicas da vegetação e, especialmente, de sua capacidade para a solução de problemas técnicos de estabilização de taludes fluviais e encostas, combinado com a construção de obras de grande simplicidade, caracteriza a Engenharia Natural.

Gray e Leiser (1982) reconhecem que as biotécnicas usam elementos mecânicos (estruturas), combinados com elementos biológicos (vegetação), para controlar e prevenir os deslizamentos e a erosão. Os materiais inertes e vivos devem funcionar em conjunto, de maneira integrada e complementar.

Para Binder, Jurging e Karl (1983), em vez do uso de materiais artificiais, recorre-se, na engenharia biotécnica, unicamente à vegetação como meio de proteção das margens dos cursos de água. Os autores, portanto, não incluem no conceito de Engenharia Natural o uso de materiais inertes.

Schiechtl e Stern (1992) sustentam que a Engenharia Natural vale-se de técnicas biológicas (biotécnicas) em que plantas, ou partes destas, são usadas como material vivo de construção. Sozinhas, ou combinadas com materiais inertes, tais plantas devem proporcionar estabilidade às áreas em tratamento.

### 7.1.2 – Histórico e benefícios

De acordo com Schlüter (1984) apud Florineth e Gerstgraser (2000), os registros mais antigos que tratam das propriedades técnicas da vegetação datam do Império Romano. Leonardo da Vinci já teria feito referência à

importância do sistema radicial dos salseiros para a fixação das margens dos canais. Contudo, foi somente a partir do século XVII que trabalhos e descrições de técnicas de Engenharia Natural começaram a aparecer na Europa.

O uso de métodos de Engenharia Natural remonta ao século XII (BRASIL, 2003). Nessa época, na China, já se utilizavam feixes de galhos (feixes vivos) para a estabilização de taludes. No século XX, técnicas semelhantes foram utilizadas também na China para o controle de enchentes e erosões no Rio Amarelo. Na Europa, especialmente na Alemanha, métodos de Engenharia Natural têm sido utilizados há 150 anos. Nos Estados Unidos, os trabalhos remontam aos anos de 1920, quando foram realizadas estabilizações de erosões em margens de rios e taludes rodoviários. Após a Segunda Guerra Mundial, com o aumento do emprego de equipamentos para movimentação de terra e com o surgimento de técnicas estruturais para estabilização de erosões, as práticas de Engenharia Natural desapareceram.

116

Nos últimos vinte anos, principalmente nos Estados Unidos e Europa, as técnicas de Engenharia Natural têm sido utilizadas e reconhecidas cada vez mais como excelentes alternativas no combate à erosão (BRASIL, 2003).

Segundo Schiechl (1973, 1980), na Europa (especialmente na Alemanha, Suíça e Áustria) e nos Estados Unidos, o uso das técnicas de Engenharia Natural – ou da Bioengenharia – já ocorre há décadas. Foi justamente com os trabalhos de Hugo Meinhard Schiechl, iniciados na década de 1950, que a Engenharia Natural ganhou força e que, cada vez mais, a vegetação passou a ser reconhecida como uma importante ferramenta na estabilização de encosta e perenização de cursos de material.

Atualmente, as biotécnicas passam a ser uma promissora alternativa a algumas técnicas tradicionais. Ainda, Morgan e Rickson (1995) ressaltam que a Engenharia Civil está reconhecendo cada vez mais a importância das plantas nos trabalhos de construção, sobretudo pelo efeito estético que se pode ter com esse tipo de obra.

No Brasil, a Engenharia Natural ainda é pouco conhecida e empregada. Não existe, até o momento, conhecimento suficiente sobre as características das plantas potencialmente utilizáveis, que possibilite a implantação segura das obras de Engenharia Natural. Somente com uma visão sistemática, decorrente de estudos, experimentos e observações, será possível o emprego seguro dessas técnicas no país.

## 7.2 – Técnicas do manejo de cursos de água

A estabilidade de um talude fluvial pode ser buscada reduzindo-se, por exemplo, a velocidade da água e, assim, o seu potencial de erosão e/ou aumentando as forças de resistência do talude. As biotécnicas podem produzir tanto um quanto outro desses efeitos ou os dois, simultaneamente.

Grande parte das configurações biotécnicas podem ser divididas em dois grandes grupos: obras transversais e obras longitudinais.

As primeiras (estruturas postas transversalmente ao curso de água) têm como principal efeito a redução da velocidade da água através do desenvolvimento de um perfil de compensação (Item 3.7, Figura 3.12) que modifica a inclinação original do leito e, consequentemente, favorece o depósito de sedimentos, consolidando o leito e estabilizando as margens. Isso é conseguido com a construção das chamadas barragens de consolidação, soleiras ou cintos basais. Essas estruturas são normalmente inertes, mas, por vezes, podem ou devem ser complementadas por medidas vegetativas.

As obras longitudinais (estruturas construídas ao longo do curso de água), por sua vez, não alteram a declividade do leito, e suas funções são, mais especificamente, reconstruir, proteger e estabilizar as margens. Isso pode ser conseguido tanto com o revestimento vegetal e/ou físico das margens como pela construção de râmpolas (defletores) que visam, igualmente, reduzir a velocidade da água e forçar o depósito de sedimentos no local desejado (próximo à margem em tratamento), porém sem alterar a declividade do leito.

Os revestimentos buscam conferir às margens (taludes) maior resistência à força da água e podem ir de um simples enrocamento com pedras, passando pelo uso de cilindros inertes e gabiões, até a construção de paredes de madeira roliça, ferro ou concreto, combinados com modelos especiais de revegetação.

A Engenharia Natural preconiza uma série de formas de revegetação e modelos de construção. O efeito proporcionado e os resultados conseguidos ficam na dependência tanto do tipo de material e modelo de construção como das espécies vegetais e forma de revegetação que se combina às estruturas.

As biotécnicas podem trazer, em comparação com outros métodos, ganhos para a ecologia, para a economia e para os aspectos paisagísticos. Na dependência dos objetivos e do tipo de construção, pode-se dar mais ênfase a um ou a outro desses aspectos.

Segundo Morgan e Rickson (1995), a Engenharia Natural dá prioridade à reprodução vegetativa. Contudo, os métodos germinativos são importantes em situações específicas, sendo normalmente utilizados de maneira associada

ou complementar aos métodos de reprodução vegetativas.

As principais formas de plantio mencionadas na literatura são relacionadas e resumidamente explicadas no quadro 7.1.

Quanto aos materiais inertes, deve-se fazer a opção com base em suas características técnicas, facilidade de aquisição e abundância na região e também em função de seu custo. Esses materiais podem ser alvenaria, madeira “in natura” ou serrada, restos culturais, grandes pedras ou seixos obrigados ao trabalho solidário através de estruturas feitas com arames, telas ou madeira.

Schiechtl e Stern (1994) salientam que, no tratamento de curso de água com o uso de biotécnicas – contrariamente aos métodos tradicionais –, deve-se seguir os princípios da manutenção da morfologia típica do curso e a dinâmica das águas. Assim, é necessário evitar a retificação, a eliminação de poços de água e a uniformização da velocidade da água e da largura do curso. Ao mesmo tempo, deve-se buscar a implantação, o desenvolvimento e o tratamento com plantas ecologicamente adequadas para o lugar, levando-se em conta a multifuncionalidade do curso de água; e, ao fazer a exploração agrícola ou florestal das áreas ribeirinhas, ter em vista a proteção dos rios.

Além da solução técnica do problema, devem ser considerados os aspectos ecológicos, econômicos, sociais e estéticos. Procura-se, assim, manter a morfologia do canal natural, com meandros e perfis transversais assimétricos, e sugere-se a preservação ou a criação de habitats naturais para a flora e a fauna. Tenta-se evitar construções grandes e “pesadas”, procurando-se modificar ao mínimo as condições naturais preexistentes.

Muitas vezes, os efeitos da corrosão e dos deslizamentos em um talude fluvial evoluem a tal ponto que o desenvolvimento de vegetação torna-se difícil ou mesmo impossível. Assim, quando o declive apresentado pela margem de um curso de água não proporcionar a estabilidade necessária, o primeiro passo é o retaludamento, buscando uma inclinação adequada. Em gradientes superiores a 1:1 ( $45^\circ$ ) aproximadamente, o restabelecimento da vegetação torna-se muito difícil, necessitando-se do uso de métodos mais tradicionais, com maior investimento em estruturas inertes ou em geotêxteis.

A forma do topo do declive também é importante, não devendo ser abrupta. Uma forma arredondada, que produza uma transição gradual entre o declive e a linha do terreno, é muito mais propícia para o desenvolvimento da vegetação (ANIMOTO, 1978). A atenuação do ângulo é formada entre a linha do chanframento (declive) e o nível do terreno.

Nome	Breve descrição	Característica principal (função)
<b>Métodos vegetativos</b>		
<b>1. Estacas</b>	Estacas simples, com cerca de 40 cm, que são cravadas no talude.	Fácil implementação, preparo e transporte do material vegetal. Resultados menos imediatos. As estacas podem ser facilmente levadas pela força da água.
<b>2. Feixes</b>	Ramos longos, amarrados, formando feixes. São usados parcialmente enterrados e fixados com pilotos e pedras, dispostos ao longo da margem.	Além do efeito normal esperado pelo desenvolvimento da vegetação, produzem imediatamente uma proteção física. É a forma ideal para ser usada entre os vãos das estruturas de madeira.
<b>3. Banquetas</b>	Degraus transversais à inclinação do talude são preenchidos com estacas, que são, por vezes, presas com madeira e/ou pedras e, ao final, cobertas com solo.	Ideais para taludes artificiais, como os que resultam da construção de estradas, e onde se queira criar um efeito de retenção dos sedimentos que descem da encosta.
<b>4. Esteiras</b>	Ramos no seu máximo comprimento são dispostos acompanhando a inclinação do talude e com as suas bases dentro da água, firmemente presas por pedras e/ou troncos. Pilotos de madeira com varas de bambu ou arame são usados para fixar os ramos contra o talude, sendo tudo coberto por uma fina camada de solo.	Restringem-se a taludes fluviais e requerem uma grande quantidade de material vegetal. Quando possíveis de ser implantadas, produzem os efeitos protetivos mais rápidos. Muito eficientes em taludes nos quais a força da água é de impacto frontal. Logo após a implantação, já suportam tenções muito altas.
<b>5. Tranças</b>	Ramos longos têm suas bases encravadas no solo e são trançados entre pilotos (vivos ou inertes).	Produzem ótimos efeitos quando usadas para proteger a linha da água em pequenos cursos e para reter sedimentos em taludes que não sofram impacto frontal da água.

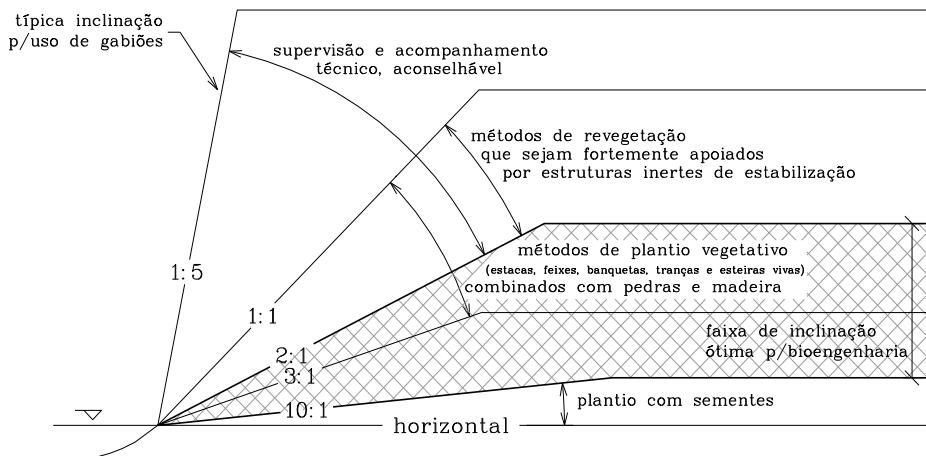
<b>6. Leivas</b>	Leivas, normalmente de gramíneas, são transplantadas para a área, que é completamente recoberta ou o plantio pode ser feito em faixas ou quadrículas.	Podem produzir um efeito estético e de proteção quase imediato. São caras e não muito importantes para taludes fluviais de grande instabilidade.
<b>Métodos germinativos</b>		
<b>1. Sementes</b>	Sementes são lançadas manualmente sobre o talude, previamente modelado.	Suficientes para locais com pequena inclinação. Em taludes fluviais, são normalmente uma medida complementar.
<b>2. Geotêxteis</b>	Malhas construídas com restos culturais ou fibras vegetais degradáveis são impregnadas de sementes e adubos e fixadas, com estacas contra o talude.	Uma das alternativas mais caras, mas produz estabilização rápida. Pode ser usada em taludes muito íngremes e bastante degradados.
<b>3. Hidrosemedura</b>	Sementes são misturadas à água, cola e adubo e lançadas mecanicamente sobre o talude.	Método dispendioso. Rápido e fácil de ser implantado quando se dispõe dos recursos e acesso para máquinas.
<b>4. Mudas</b>	Mudas são produzidas em viveiros e, quando adquirem o tamanho ideal, são plantadas no talude.	É importante para as espécies que não se reproduzem bem, vegetativamente.

**Quadro 7.1** – Caracterização e descrição de formas de plantio e arranjos construtivos utilizados pela Engenharia Natural

A seleção da técnica de plantio é função de diferentes fatores, como das características biotécnicas das plantas a serem utilizadas, das propriedades do substrato, da frequência, do volume e da velocidade das vazões, bem como da profundidade do curso de água.

A figura 7.1, adaptada da *Federal Interagency Stream Restoration Working Group* (FISRWG, 1998), aconselha o uso de diferentes formas de plantio e de materiais, na dependência da inclinação do talude. À medida que as encostas ou os taludes fluviais se tornam mais abruptos e/ou instáveis, tanto mais é necessária a utilização de formas e arranjos especiais para a revegetação

(sementes → estacas simples → tranças → esteiras e feixes vivos etc.), como também que se empreguem e combinem estruturas inertes como pedras, madeira, telas, paredes de madeira etc. com a vegetação. De acordo com Gray e Sotir (1996), o estabelecimento da vegetação é dificultado quando as inclinações do terreno ultrapassam 1:1,5 (H:V).



121

**Figura 7.1 – Determinação do método apropriado em função da inclinação (H:V) da margem**  
**Fonte:** FISRWG (1998).

A figura 7.1 exibe, na parte hachurada, a faixa de inclinação (ótima) dos taludes fluviais, em que se pode utilizar com vantagens as técnicas de Engenharia Natural. Taludes de corte em terraços pequenos, com inclinações de aproximadamente 3:1, podem ser mais vantajosos, pois permitem maior acúmulo de umidade, o que favorece o desenvolvimento das plantas.

No caso de margens de cursos de água, a corrosão acontece frequentemente pela retirada da base de apoio do talude, devido à força da correnteza, ao turbilhonamento e à ação das ondas junto à faixa que acompanha o nível normal da água. Essa região, portanto, deve receber atenção especial, principalmente pelo emprego de materiais inertes em sua base, que auxiliarão o futuro estabelecimento da vegetação.

É preciso ter em mente que as obras de Engenharia Natural não alcançam sua total efetividade logo após a implantação. Primeiro, há que se aguardar a pega e o desenvolvimento radicular e aéreo das plantas. Nessa fase, podem ser necessárias intervenções de reposição vegetal e/ou tratos culturais. Somente após a fase de implantação, cuja duração depende de diversos fatores, é que as obras começam a desempenhar integralmente sua ação corretiva e duradoura sobre o problema que se pretende solucionar.

## **7.3 – Tipologia e função das obras de Engenharia Natural**

Como visto anteriormente, as obras dividem-se em dois grupos, segundo sua posição em relação ao eixo do curso de água e sua função: as longitudinais e as transversais. Muitas vezes, ao longo de um curso de água, essas obras precisam ser construídas em conjunto, de maneira que uma complemente a ação da outra. Além das obras longitudinais e transversais, pode-se reconhecer ainda alguns tratamentos bastante simples, de caráter temporário e emergencial, que funcionam como preparação para os trabalhos posteriores e que precisam ser destacados.

## **7.4 – Ações preparatórias, preventivas e emergenciais**

122

A ação da água sobre as margens, embora possa ser prevista com certa probabilidade, só é detectada e levada em consideração quando os problemas dela decorrentes são bem visíveis e começam a causar preocupação.

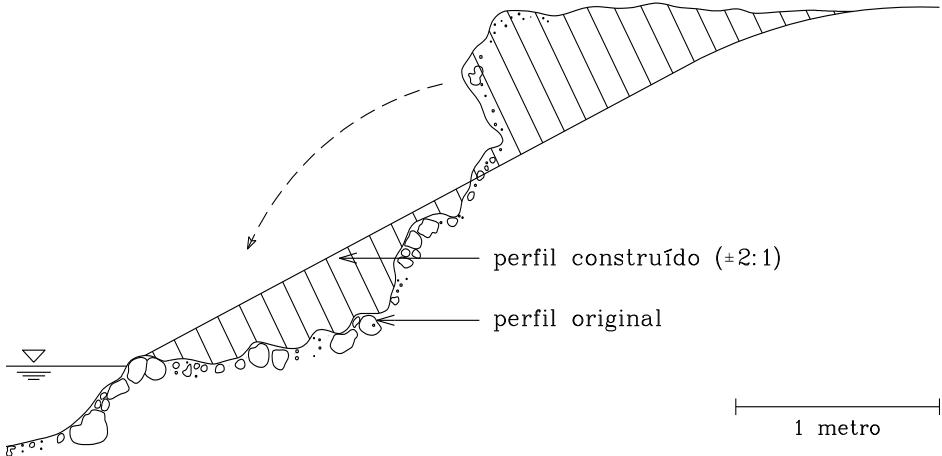
Ao observar uma erosão recente, ocorrida por ocasião de um eventual período chuvoso, deve-se pensar em tomar logo uma medida corretiva, especialmente se determinados bens (casas, galpões, pontes, estradas, áreas agrícolas, dutos etc.) estiverem sendo ameaçados.

Quando o impedimento para a tomada de medidas duradouras for apenas a falta de recursos ou a indisponibilidade de tempo, a solução parcial dos problemas pode ser a adoção de uma correção temporária, que representa, simultaneamente, uma medida preventiva e preparatória para ações mais incisivas posteriores.

Uma barranca abrupta (perfil original da Figura 7.2) não permanecerá estável por muito tempo ao sofrer a ação da água  $p$ , especialmente se constituída por material friável.

Com frequência, ocorrerão corrosões e consequentes deslizamentos ou desmoronamentos. Em casos semelhantes ao mostrado na figura 7.2, a remodelagem do perfil pode ser uma boa medida preventiva.

A diminuição da declividade da barranca, através de sua remodelagem, pode, em muitos casos, até ser suficiente para sua estabilização: a menor inclinação conferida, além de diminuir o potencial físico de movimentação da encosta, proporciona melhores condições para o surgimento natural de vegetação, cuja ação protetora pode ser muito importante para os eventos torrenciais vindouros.



123

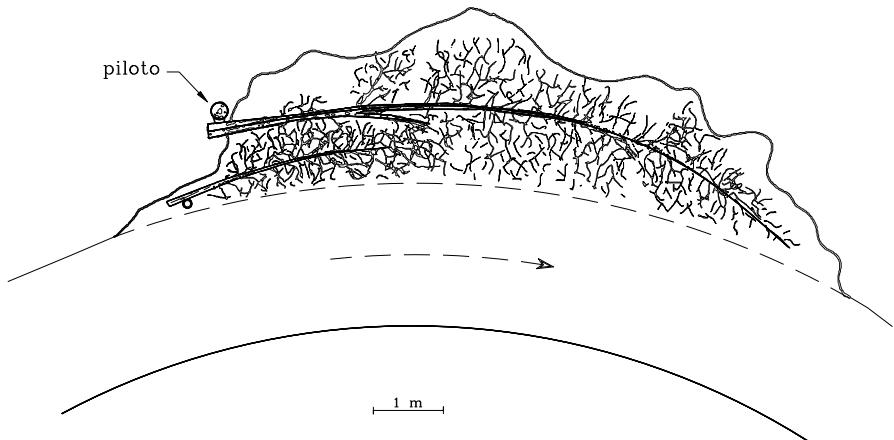
**Figura 7.2** – Remodelagem do talude fluvial como ação corretiva e/ou preventiva da corrosão, deslizamento ou desmoronamento da margem.

A remodelagem das barrancas é também um trabalho preparatório ou complementar, que antecede ou que acompanha a maioria das obras, porém representa uma movimentação e desestruturação momentânea do material que forma o talude. Essa desestruturação, do ponto de vista de estabilidade, é potencialmente perigosa. Por essa razão, a remodelagem não deve ser feita em períodos de enchentes, a fim de que a massa movimentada tenha tempo suficiente para experimentar certa compactação.

Em períodos de precipitações normais ou de secas, não se espera que os problemas existentes nas margens venham a se agravar de forma preocupante, motivo pelo qual são os mais propícios para a execução da remodelagem.

Em outras situações, podem ser o fluxo de água existente e/ou a recorrência frequente de fortes precipitações que impedem, dificultam ou desencorajam construções de caráter mais duradouro. Nesses casos, é recomendável a adoção de medidas emergenciais, de cunho temporário, a exemplo da figura 7.3.

O objetivo principal das medidas emergenciais é apenas impedir que o problema percebido avance e tenha consequências ainda mais indesejáveis. Tais medidas se resumem, basicamente, na colocação e fixação adequada de materiais como galhos, troncos, árvores inteiras e/ou pedras nas margens que se quer proteger.



**Figura 7.3** – Desenho esquemático de ação emergencial: uso de árvores inteiras, em área sob corrosão

124

A figura 7.3 mostra um exemplo de uso de árvores para a proteção temporária da corrosão no raio externo da curva de um córrego. A intenção da medida é criar, mesmo que temporariamente, um obstáculo para o livre fluir da água, ou seja, um dissipador de energia. Se, por um lado, a velocidade da água junto à margem se torna menor e perde sua capacidade de erosão, por outro, devido à diminuição da velocidade da água, é alcançada a velocidade limite de transporte, para os materiais de maior granulometria, tendo como consequência a sua deposição. Esse depósito de materiais, num processo interativo, provoca uma diminuição ainda maior da velocidade, de maneira que a ação emergencial é potencializada.

Para maximizar o efeito protetivo, é importante que o material vegetal utilizado seja bastante denso, isto é, tenha muitos galhos (flexíveis) e folhas.

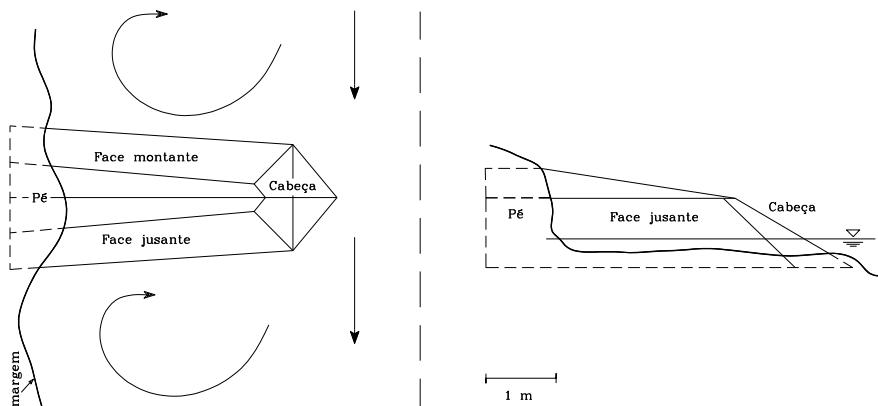
## 7.5 – Obras longitudinais

Existe uma ampla gama de possibilidades para os tratamentos longitudinais, que vão desde o simples retaludamento até a construção de obras mais complexas de estabilização. As diferenças entre os tratamentos residem principalmente no material utilizado, no método de trabalho, na forma e no peso dos elementos e materiais utilizados na intervenção.

Quanto aos materiais, como regra básica, deve-se dar preferência aos que se encontram na região, levando em consideração os aspectos de economia, ecologia e estética. Esse preceito vale para os materiais inertes e, especialmente, para os materiais vivos.

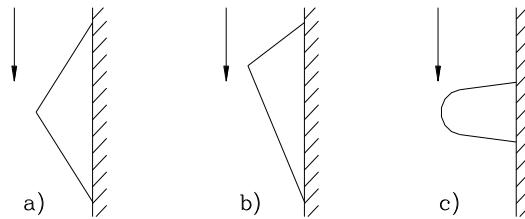
### 7.5.1 – Râmpolas ou espigões transversais

As râmpolas ou espigões transversais são obras semelhantes às barragens, mas que não chegam a atravessar toda a seção transversal do curso de água (Figura 7.4). Os espigões transversais, embora levem esse nome, são classificados como obras longitudinais, já que sua função primordial é a proteção ao longo das margens.



**Figura 7.4** – Vista superior e frontal de um espigão transversal (râmpola)

A porção da râmpola que fica engastada na margem chama-se pé da râmpola ou pé do espigão transversal. A ponta que fica mais para dentro do leito denomina-se cabeça da râmpola ou, analogamente, cabeça do espigão transversal. A face voltada para a nascente do curso de água pode chamar-se de face montante, enquanto a voltada para o sentido contrário denomina-se face jusante. Além da forma esquematizada na figura anterior, as râmpolas podem apresentar outros formatos (Figura 7.5).



**Figura 7.5** – Vista superior de três tipos de râmpolas

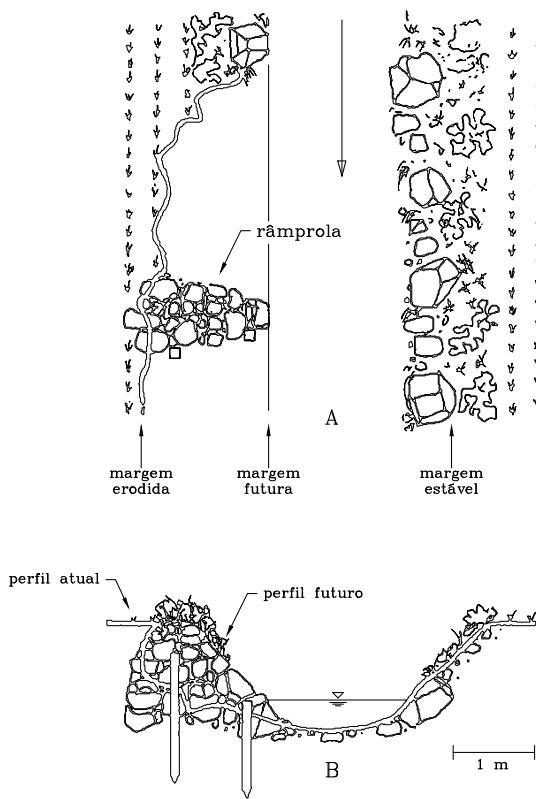
**Fonte:** Begemann e Schiechl (1994).

As formas apresentadas diferenciam-se entre si, fundamentalmente, pelas dimensões de seu pé e pela inclinação de suas faces, montantes e jusantes,

em relação ao eixo do curso de água. As dimensões do pé estão diretamente ligadas à estabilidade da construção, enquanto o ângulo em relação ao eixo longitudinal do leito influencia o comportamento da água ao atingi-la.

As râmpolas têm duas finalidades: conduzir a água para o centro da torrente e provocar o depósito de materiais transportados em locais desejados. A primeira finalidade é conseguida pela sua forma de construção: partindo da margem ou do pé da râmpola, sua altura vai diminuindo constantemente em direção à sua cabeça, que aponta para o centro do curso de água. Suas faces, montante e jusante, são inclinadas. Essa configuração faz com que o eixo de distribuição de velocidades seja modificado, de modo que os perfis centrais fiquem mais velozes. A cabeça dos espiões transversais deve terminar exatamente onde se deseja que fique situada a futura margem do curso de água (Figura 7.6).

126



**Figura 7.6** – Vista superior (A) e frontal (B) de uma râmpola perpendicular ao leito

A função de retenção de materiais (Figura 7.7) é exercida pela posição transversal da construção, em relação ao eixo longitudinal do canal. Essa posição faz com que a água diminua sua velocidade antes e depois de cada

construção, passe a um fluxo turbulento e, por esses dois fatores, deposite os materiais cuja velocidade limite de transporte tenha sido alcançada.

### 7.5.1.1 – Posicionamento das râmpolas

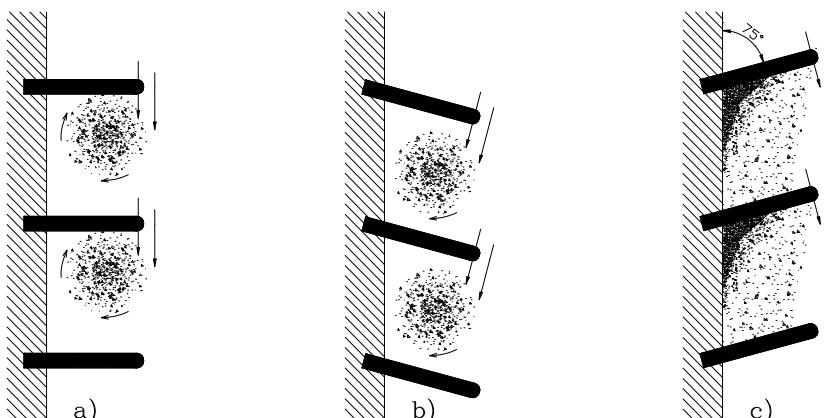
O posicionamento das râmpolas se refere a dois aspectos:

- 1 – Ao eixo do curso de água;
- 2 – À distância entre estruturas consecutivas.

Em relação ao eixo do curso de água, as râmpolas podem ser construídas de três maneiras (posições): perpendicular, declinante e inclinante (Figura 7.7a, b, c), respectivamente.

Em relação à margem, as râmpolas declinantes ou inclinantes podem apresentar um ângulo entre  $60^\circ$  e  $120^\circ$ . O ângulo de construção exerce influência sobre a sedimentação de material nas proximidades de cada espigão, conforme esquematizado na figura 7.7.

127



**Figura 7.7** – Diferenças na posição de depósitos de materiais para râmpolas:

a) perpendiculares, b) declinantes, c) inclinantes

As râmpolas perpendiculares favorecem o depósito de material na posição intermediária entre as duas estruturas consecutivas, enquanto as declinantes proporcionam o depósito próximo à face de montante da râmpola seguinte. As râmpolas inclinantes provocam maior deposição de materiais próximos ao seu próprio pé na face jusante.

A distância entre estruturas consecutivas também deve ser considerada, tendo em vista que uma râmpola exerce sua ação em um trecho limitado da margem. Assim, na dependência da extensão da margem em processo de erosão, uma única râmpola, muitas vezes, não consegue proporcionar o efeito de proteção desejado. Portanto, para que ocorra a proteção efetiva e integral

da margem, pode ser necessária a construção de um conjunto de espigões, corretamente distanciados entre si.

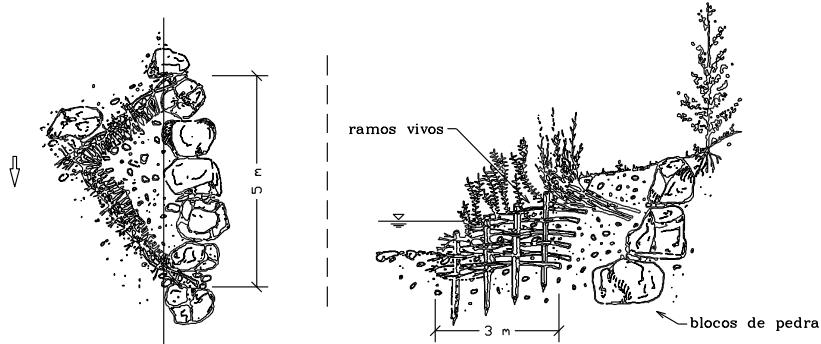
A distância entre as estruturas pode ser calculada analítica ou graficamente, considerando se a margem em tratamento é retilínea ou em curva. No entanto, como regra simplificadora, a distância entre duas obras consecutivas é de quatro vezes o comprimento da râmprola, medido de sua cabeça até seu engastamento com a margem.

#### 7.5.1.2 – Exemplos de râmprolas

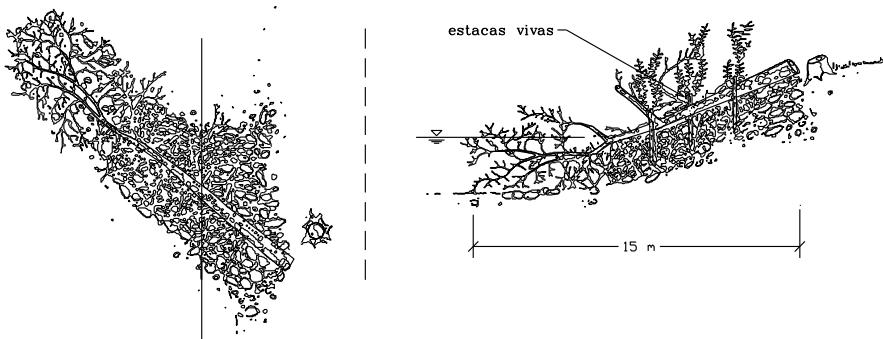
Os espigões transversais podem ser construídos com diferentes materiais, tais como pedras, madeira, material vegetal vivo ou morto e combinações entre eles (Figura 7.8).

128

a)



b)



**Figura 7.8** – Exemplos de construção de râmprolas

**Fonte:** Florineth e Gerstgraser (2000).

As duas râmprolas apresentadas como exemplo (Figura 7.8a, b) são simples e de fácil construção. A vista superior (esquerda) e a vista em corte (direita)

da figura 7.8a mostram que se trata de um espião em forma triangular, composto por pedras estrategicamente posicionadas e material vegetal, tudo devidamente estabilizado através de pilotos de fixação. A figura 7.8b mostra um espião inclinante, de composição ainda mais simples: apenas uma árvore (com grande galhosidade), fixada com pilotos formando um ângulo de aproximadamente 60 com o eixo do curso de água.

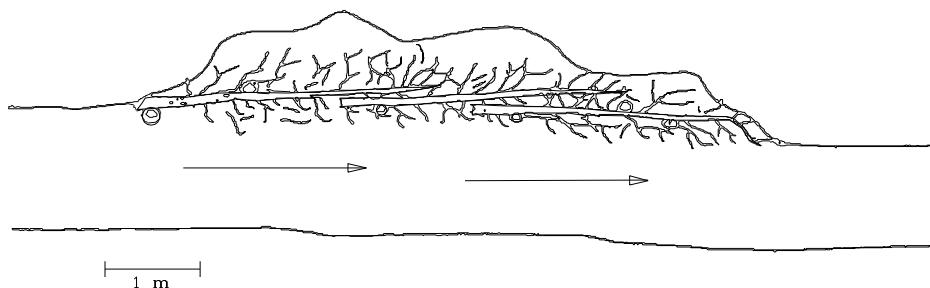
### 7.5.2 – Râmpolas longitudinais

Para a diminuição da erosão lateral, em vez de revestir totalmente o leito da torrente, além do uso de espiões transversais ou râmpolas transversais, pode-se construir râmpolas longitudinais (Figura 7.9).

As râmpolas longitudinais assemelham-se aos revestimentos de margens, diferenciando-se apenas por terem pequena extensão e por não serem construídas em contato marginal direto.

Da mesma maneira que os râmpolas transversais, as longitudinais têm a função de direcionar o fluxo da água para o centro do leito.

Embora não tenha contato constante com as margens, esse tipo de construção precisa ter a extremidade a montante ou ambas as extremidades engastadas na margem do curso de água. O engastamento, à montante, deve ser bem executado, para impedir que a água, especialmente por ocasião das enchentes, contorne e solape a construção. As râmpolas longitudinais também podem ser construídas de diferentes formas e com diferentes materiais; frequentemente, porém, usa-se madeira roliça. Uma forma bem simples de espião longitudinal, composto por árvores, é apresentada na figura 7.9.



**Figura 7.9** – Espião longitudinal composto por árvores

A râmpola apresentada, embora de caráter temporário, pode ser bastante eficiente, favorecendo depósitos de materiais, propiciando o aterrimento e permitindo a revegetação do local erodido, de forma que, com frequência, não precisa ser substituída por uma estrutura mais estável.

## 7.5.3 – Revestimentos do leito

### 7.5.3.1 – Tratamentos na linha da água

Como linha de água, entende-se a posição onde a água entra em contato com as margens, quando o fluxo está em regime normal de escoamento. O nível normal de escoamento é difícil de ser exatamente definido. Assim, a linha de água pode ser tomada, na prática, como uma área (faixa) das margens que está em contato direto com a água, na maior parte do ano. Essa área é a mais exposta à corrosão e, portanto, à subtração de peso basal, uma das principais causas de deslizamentos e desmoronamentos em taludes fluviais.

Considerando o eixo longitudinal de um curso de água, encontram-se trechos suficientemente estáveis, onde não há necessidade de revestimento. O mesmo pode ser constatado quando se considera a seção transversal: pode não ser necessário revestir o leito desde a base (fundo) até o topo das margens. Em muitos casos, é mais conveniente, e até necessário, o tratamento diferenciado do fundo, da linha de água e do restante das margens acima desse nível.

O tratamento correto da linha de água pode ser suficiente para conferir estabilidade a toda a seção de vazão: ao eliminar a corrosão nessa faixa, evitam-se os movimentos de terra no restante da barranca, dando tempo para o surgimento e a fixação natural de vegetação ou para o plantio de espécies desejáveis.

Para o tratamento na linha de água, pode-se empregar o arranjo de pedras e troncos, os cilindros inertes, os cilindros vivos e as tranças vivas.

#### A – Arranjo de pedras e troncos

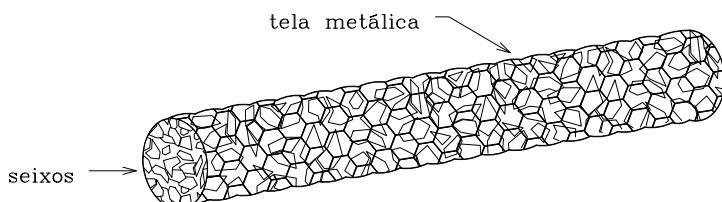
Quando se faz a limpeza do leito, o material retirado das posições inadequadas precisa ser depositado em algum lugar. Ocorre que os melhores locais de depósito são, muitas vezes, as próprias margens do curso de água. Por um lado, isso evita o transporte de materiais para mais longe, diminuindo custos e, por outro, utiliza o próprio material retirado durante a limpeza como matéria-prima para a correção de pequenos focos de erosão, para o realinhamento do eixo longitudinal do canal, para a modelagem, para o fortalecimento e até para o revestimento das margens.

O arranjo de pedras e troncos deve ser feito tendo em vista a velocidade limite de transporte (vide 3.6) dos materiais usados. Assim, para locais com alta velocidade da água, especialmente nos raios externos das curvas, deve-se colocar materiais de grandes dimensões. Na ausência de materiais maiores, é necessário garantir que os de menores dimensões trabalhem de modo solidário.

Isso pode ser conseguido na medida em que sejam agrupados em conjuntos compactos, ou mantidos unidos por estruturas externas, como blocos maiores, pilotos encravados a jusante, gabiões, telas e paredes de madeira roliça.

## B – Cilindros inertes

Trata-se de cilindros de tela, com diâmetro variável, preenchidos com materiais inertes, como seixos retirados do próprio leito e dispostos de maneira adequada ao longo da margem (Figura 7.10). Dessa forma, a proteção é proporcionada inicialmente só de maneira física, sem a implantação proposital de materiais vivos, embora, devido à porosidade da estrutura, espere-se o desenvolvimento natural da vegetação sobre a mesma com o passar do tempo.



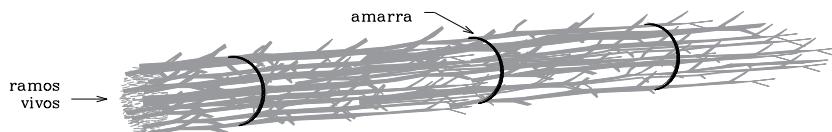
131

**Figura 7.10** – Cilindro inerte

Quando se usa material vegetal, a tela para o cilindro pode ser substituída por amarrações de arames, de maneira a formar um feixe compacto semelhante ao que pode ser visto na figura 7.11. Para que o feixe permaneça mais seguramente na posição pretendida, pode-se aumentar seu peso pela inclusão de pedras em sua parte central, além de fixá-lo à margem, através de pilotos.

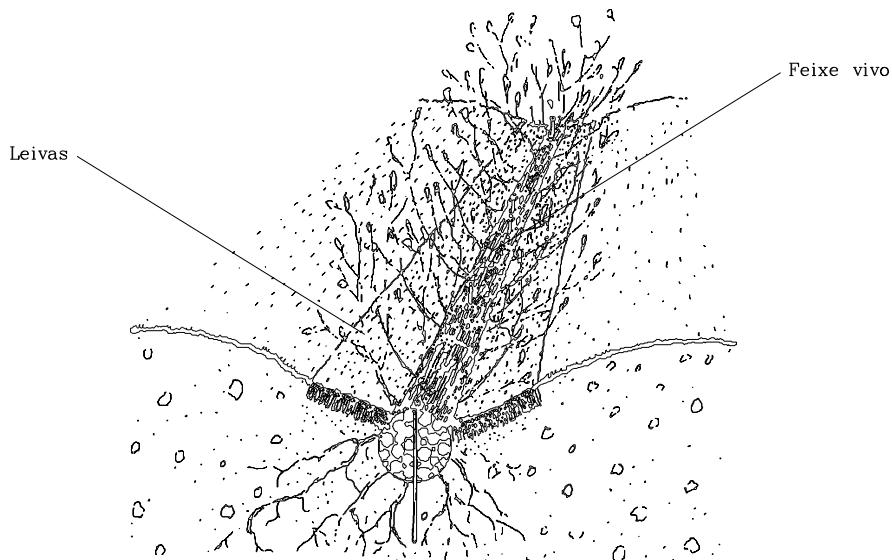
## C – Feixes vivos

São feixes confeccionados com galhos e ramos vivos com potencial de desenvolvimento vegetativo (Figura 7.11), que são dispostos e fixados junto à margem. De forma semelhante aos cilindros inertes, procura-se uma proteção física imediata no local de uso, porém visando uma consolidação posterior, pelo enraizamento, brotação e crescimento do material vegetal.



**Figura 7.11** – Feixe vivo

Os feixes vivos são também uma forma de plantio eficiente para impedir ou, pelo menos, diminuir o progresso da erosão linear, no início da sua formação (Figura 7.12).



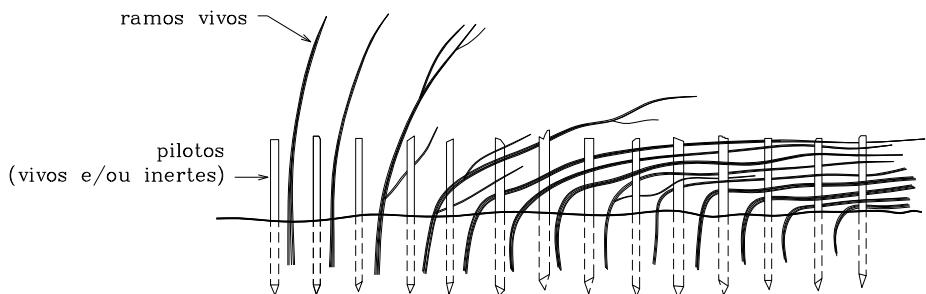
132

**Figura 7.12** – Emprego do cilindro vivo na prevenção de erosões lineares

#### D – Trança viva

Consiste em formar uma trama de varas com poder de regeneração vegetativa, que são encravadas e fixadas junto à linha de água do local em tratamento (Figura 7.13). Para a confecção das tranças vivas, adaptam-se, especialmente, as plantas cujos galhos são flexíveis.

Com a trança viva junto à linha de água, é criada uma proteção física imediata pelo material usado. Ao passar do tempo, a proteção será ainda maior, por conta do enraizamento e da brotação do material vegetal utilizado.



**Figura 7.13** – Trança viva, em confecção

### 7.5.3.2 – Revestimento integral das margens

Por revestimento integral das margens entende-se conferir ao total ou às partes dos taludes fluviais uma cobertura que proporcione maior estabilidade às margens. Os revestimentos de margens abordados a seguir servem, em princípio, também para estabilizar e corrigir encostas naturais não fluviais, com problemas de estabilidade (áreas de deslizamentos e desmoronamentos), como também para fixar encostas artificiais (cortes e aterros), que não estão em contato direto com cursos de água.

Como revestimentos marginal, são enquadrados os tratamentos contínuos de trechos relativamente longos de uma ou ambas as margens podendo incluir também trechos do base do leito dos cursos de água. Para tanto, podem ser empregadas diversas técnicas, materiais e formas de tratamento. O revestimento pode ser feito apenas com material inerte, somente com material vegetal ou, ainda, com a combinação de ambos.

O revestimento das margens é um procedimento normalmente mais caro do que a construção de râmpolas transversais ou espiões longitudinais e também costuma ser mais caro que a maioria das obras transversais. Entretanto, nos trechos onde os declives são muito acentuados, sua modificação por meio de barragens transversais pode tornar-se mais dispendiosa que o revestimento total. Também existem situações em que o revestimento, mesmo que parcial, é um complemento necessário às obras transversais. Por vezes, ocorrem também circunstâncias em que as râmpolas e obras transversais não são apropriadas para a estabilização das margens, como por exemplo, em trechos onde o fluxo da água passa por terrenos muito friáveis. Nesses casos, é preferível recorrer a um revestimento contínuo das margens e também do fundo do leito.

O primeiro passo, antes do revestimento, que deve anteceder também o retaludamento, sempre que se pretende revestir as duas margens, é a estimativa da seção transversal do curso de água, necessária para dar escoamento às maiores enchentes. Em cursos de água onde existe o risco de danos a bens econômicos, é imprescindível o dimensionamento preciso da seção de vazão. Nesses casos, pode-se assumir que a seção transversal existente será suficiente para dar a vazão necessária, especialmente após as correções da margem (re-modelagem) e a suavização de eventuais curvas muito acentuadas. A seção transversal trapezoidal é a forma mais frequentemente escolhida, dadas as suas características favoráveis de vazão (raio hidráulico grande) e facilidade de construção.

Para diminuir a velocidade da água e para acompanhar a declividade do leito, pode-se fazer soleiras em determinados pontos, preferivelmente onde

exista uma quebra natural da inclinação do leito. Tais ressaltos são convenientemente construídos (ou reforçados) com madeira ou com os maiores blocos de pedra disponíveis no local (Item 7.6: Obras transversais).

Antes de qualquer revestimento, verifica-se a necessidade de remodelagem das margens. A remodelagem torna-se necessária quando houver indícios de instabilidade: grande inclinação (margens abruptas em terreno instável), ausência de vegetação, presença de desmoronamentos e deslizamentos recentes nas margens.

Como visto anteriormente (Figura 7.2), a modelagem das barrancas representa um tratamento emergencial e preparatório para outros tratamentos. Muitas vezes, porém, apenas essa medida pode ser suficiente para estabilizar o talude fluvial, devido à diminuição do potencial físico de movimentação e por proporcionar condições para o surgimento natural de vegetação.

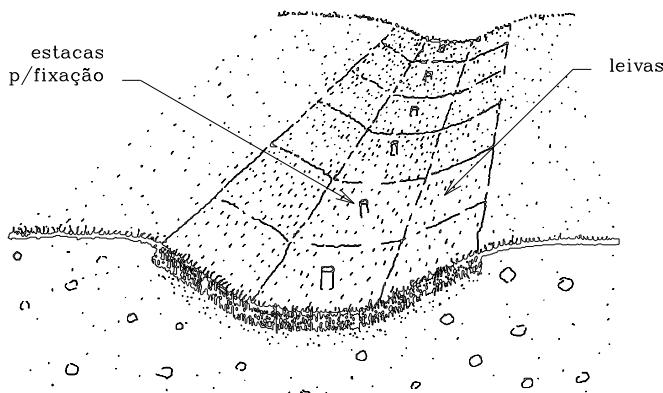
A cobertura superficial da encosta remodelada pode ser acelerada por ações adicionais, tais como cobertura com palhas e implantação de espécies vegetais. Esta última, por sua vez, pode ser executada de diferentes maneiras: semeadura, plantio de leivas e mudas, uso de estacas, varas e outras partes de vegetais, em diferentes arranjos, como será explicado mais adiante.

#### A – Plantio de leivas

O revestimento de terrenos erodidos ou potencialmente sujeitos à erosão com o emprego de leivas gramadas é uma prática comum no Brasil. Muitos jardins são revestidos dessa forma, embora o objetivo seja mais estético do que propriamente o de evitar ou combater focos de erosão. Nos cortes e aterros de estradas, no entanto, essa técnica é frequentemente empregada com vistas à estabilização de tais locais. No tratamento de margens de cursos de água, essa técnica é pouco empregada devido à sua resistência relativamente baixa à ação da água. Mesmo assim, pode ser empregada em cursos efêmeros e como complemento de obras transversais e longitudinais (Figura 7.14). O plantio de leivas gramadas é, contudo, uma operação cara, ficando restrita a áreas relativamente pequenas. Todavia, para contornar esse problema, as leivas podem ser dispostas de forma descontínua, formando faixas ou quadrículas intercaladas. Podem ser utilizadas leivas encontráveis nas proximidades, que serão transportadas de locais próximos à obra, reduzindo os custos em relação a compra de leivas comerciais.

Dispondo as leivas de forma descontínua, perde-se, evidentemente, o efeito de proteção imediata de toda a área, porém poupa-se muito em material e mão de obra. O efeito de proteção integral é, nesses casos, alcançado apenas quando, pelo crescimento das gramíneas, ocorrer o fechamento das partes não cobertas

no início. Em taludes inclinados ou nos pontos onde a força da água for mais efetiva, como no centro do canal (Figura 7.14), a fixação das leivas pode ser auxiliada pela colocação de pilotos de madeira, taquaras ou grampos de metal.



135

**Figura 7.14** – Uso de leivas gramadas no revestimento do fundo e da margem de um curso de água efêmero

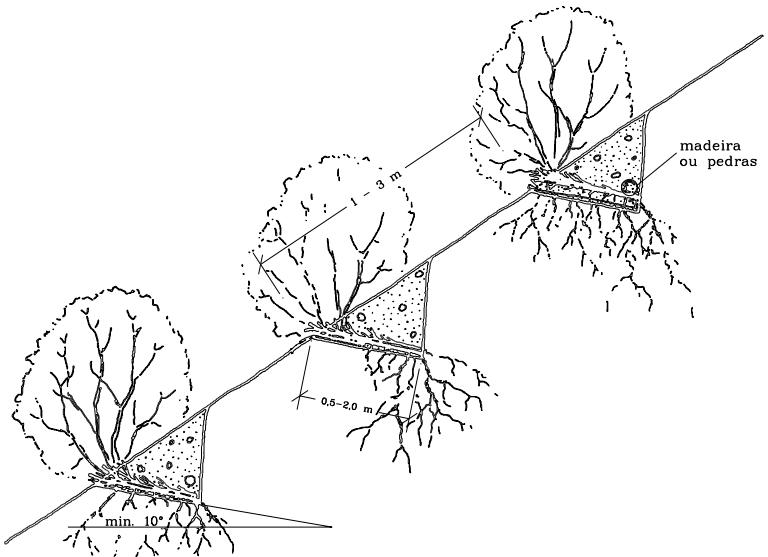
**Fonte:** Schiechl e Stern (1992).

### B – Plantio em banquetas

A remodelagem das barrancas, conforme salientado anteriormente, representa uma medida emergencial e preparatória, podendo ser necessária antes que se faça o revestimento vegetal.

Além da remodelagem mais comum, que consiste em dar uma inclinação contínua e uniforme ao talude, essa reconfiguração geométrica do talude pode ser feita em forma de banquetas (degraus), de maneira a possibilitar o plantio de estacas durante ou logo após esse trabalho, como esquematizado na figura 7.15.

No plantio em banquetas, deve-se utilizar estacas com capacidade de enraizamento e brotação. Com essa forma de plantio, consegue-se também uma proteção física imediata após o término do trabalho. De início, a proteção não é muito expressiva e fica na dependência da quantidade de estacas utilizadas, que podem ser dispostas paralelamente umas às outras ou de forma cruzada. Quanto mais estacas por metro de banquetas, tanto maior será o efeito protetivo físico imediato e tanto melhor e mais rápido virá o efeito protetivo após o enraizamento e a brotação das varas. Para melhor fixar as varas ao talude, podem ser colocados troncos ou pedras na base das estacas antes de aterrá-las.

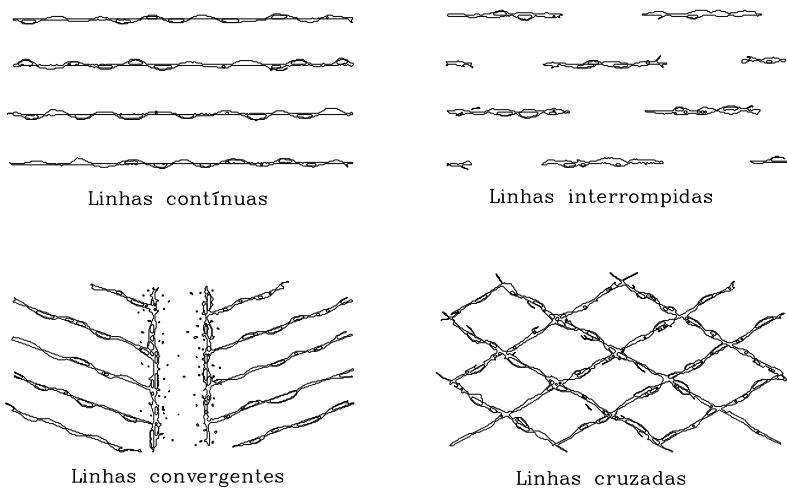


136

**Figura 7.15** – Esquema de parte de um talude tratado com plantio em banquetas

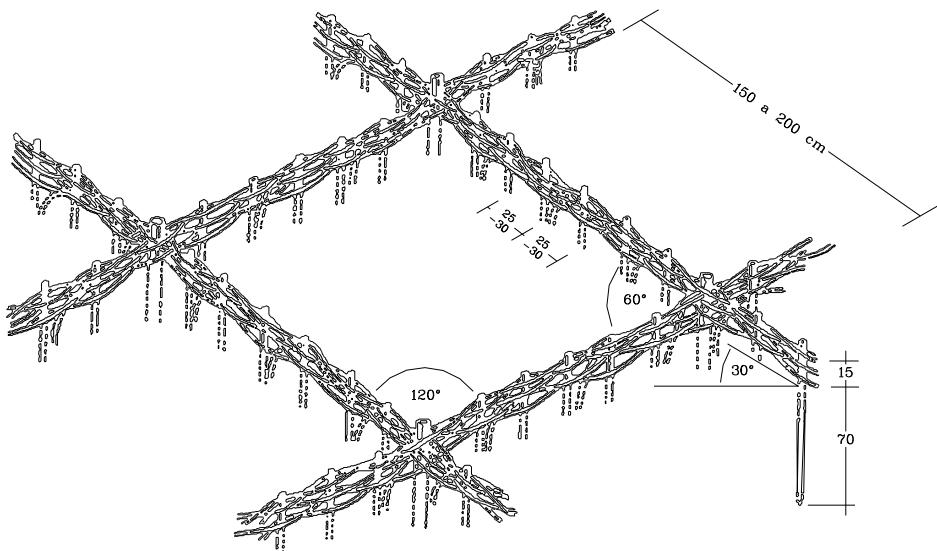
### C – Trança viva

A mesmo tipo de trança viva utilizada junto à linha de água pode ser empregada também para o revestimento dos taludes, com diferentes arranjos. Entretanto, não se consegue uma cobertura completa imediata da área em questão, como no caso do plantio de leivas. Mesmo assim, dependendo do arranjo empregado e da distância entre as tranças, pode-se assegurar um efeito protetivo imediato, mesmo que parcial (Figura 7.16).



**Figura 7.16** – Diferentes arranjos das tranças vivas, para revestimento de taludes

Na figura 7.17, observam-se alguns detalhes importantes para a construção de tranças vivas, em arranjo em linhas cruzadas.



137

**Figura 7.17** – Detalhes do arranjo em linhas cruzadas das tranças vivas

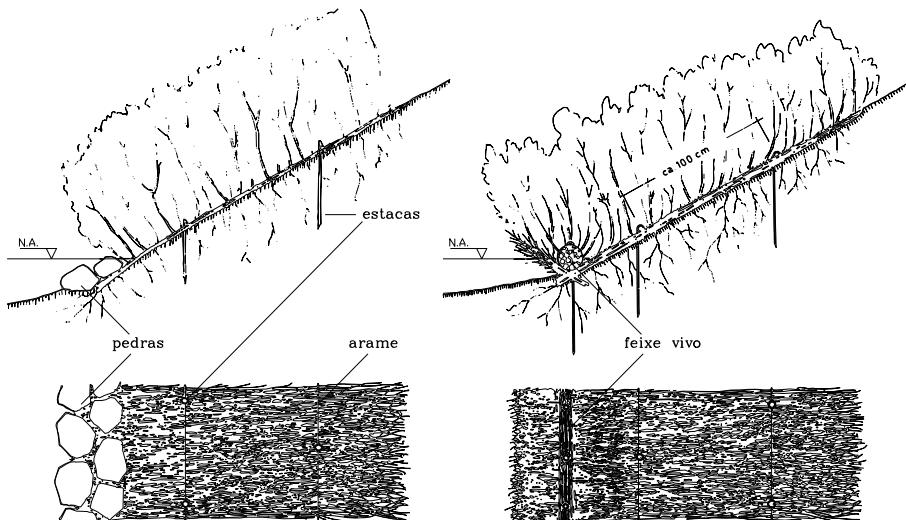
**Fonte:** Schiechl e Stern (1992).

A proteção fornecida pelas tranças vivas que, inicialmente, é apenas parcial, vai aumentando à medida que ocorrem o enraizamento e a brotação da parte aérea.

#### D – Esteira viva

Consiste em estender sobre o talude fluvial uma grande quantidade de material vegetal (ramos inteiros). A base dessas varas deve ser enterrada, a uma profundidade de aproximadamente 20 cm adentrando o curso de água. O restante do seu comprimento deve ser fixado bem junto ao talude, com o auxílio de taquaras, arames ou varas maiores. A base da esteira viva pode ser apoiada com pedras, feixes inertes ou vivos ou troncos de madeira roliça(Figura 7.18).

A esteira viva é um excelente tratamento vegetativo, especialmente no raio externo das curvas dos cursos de água, onde o impacto da água é frontal. A justaposição de hastes nas margens proporciona, de imediato, uma proteção de caráter físico, que é reforçada posteriormente, pelo enraizamento.



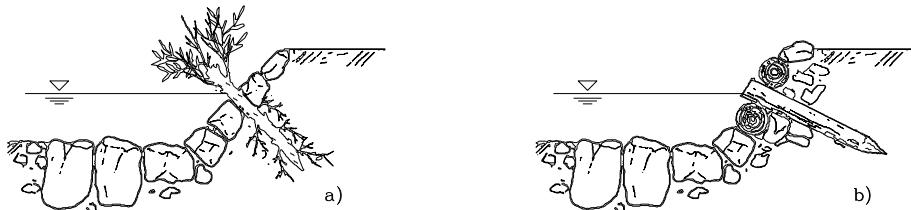
**138** **Figura 7.18** – Vista em corte transversal e superior de esteiras vivas, após sua brotação  
**Fonte:** Begemann e Schiechl (1994).

A esteira viva deve ser densa, visando à proteção da encosta desde o momento de sua instalação, isto é, antes do enraizamento e da brotação das hastes. Na dependência das características da torrente e do terreno, a cobertura com esteira viva já pode ser suficiente para a estabilização. Quando houver um bom enraizamento e brotação das hastes, o efeito protetivo aumentará com o passar do tempo. Begemann e Schiechl (1994) reportam que as esteiras vivas podem suportar tensões de erosão de até 50 Pa logo após sua construção, aumentando para até 150 Pa após dois períodos vegetativos.

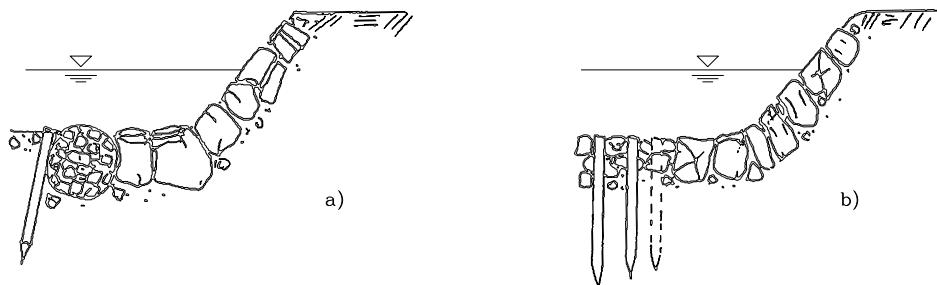
Para que se mantenham as propriedades de proteção e para que não seja diminuída demasiadamente a seção de vazão, pelo crescimento da parte aérea das plantas, é necessário que seja feito tratamento periódico adequado na esteira, através do corte (poda) dos galhos. Desse modo, é forçada a rebrotação, a renovação da flexibilidade dos ramos e o enraizamento denso e profundo.

#### E – Revestimento com madeira e blocos de pedras

O revestimento das margens com madeira roliça, com blocos de pedras ou com a combinação destes, em diferentes formas (Figuras 7.19 e 7.20), tem por finalidade organizar e fixar materiais sobre as margens, de maneira a conseguir o máximo de estabilidade e proteção física imediata. O plantio de estacas, ou o uso de feixes vivos em associação com revestimento inerte, serve para acelerar e garantir a estabilidade das margens no futuro, bem como para melhorar o aspecto estético do local (Figura 7.19a).



**Figura 7.19** – Vista transversal de revestimento da margem com blocos de pedra e estacas vivas (a) e madeira roliça (b)

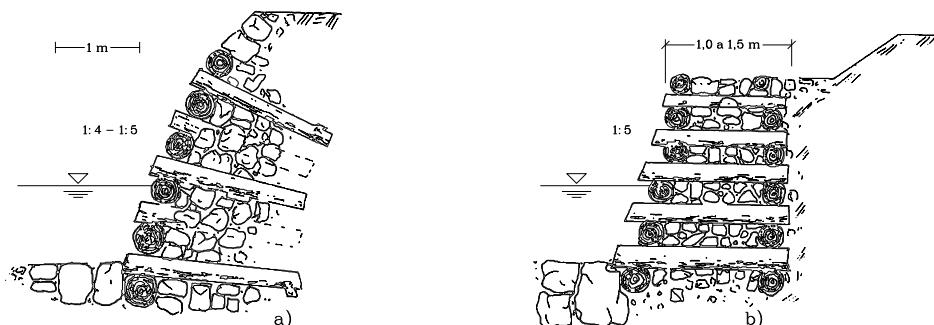


139

**Figura 7.20** – Vista transversal do revestimento marginal com blocos de pedras e fixação da base por cilindro inerte (a) e por piloteamento (b)

Uma forma bastante eficiente de revestimento de taludes fluviais é a parede vegetada de madeira (Parede Krainer), conforme mostrado na figura 7.21.

As Paredes Krainer podem ser simples (Figura 7.21a) ou duplas (Figura 7.21b), porém são sempre complementadas por feixes vivos entre sua estrutura, para que, posteriormente, a proteção física por elas desempenhada seja apoiada e até mesmo substituída pelo desenvolvimento da vegetação. Os feixes vivos devem ser colocados entre as varas horizontais, já no momento da construção (veja o Estudo de Caso no Capítulo 8).



**Figura 7.21** – Parede Krainer de madeira simples (a) e dupla (b)

## F – Outros revestimentos

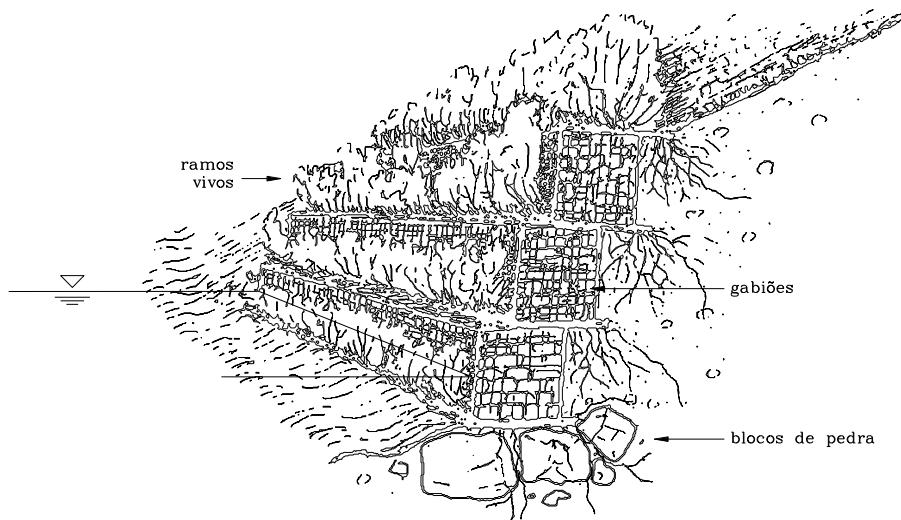
Além de plantas, madeira e pedras, pode-se usar outros tipos de revestimento, tais como os geotêxteis, hidrossemeaduras, os gabiões e, menos frequentemente, a alvenaria e o concreto armado.

Os geotêxteis são fabricados com fibras degradáveis e impregnados por adubos e sementes. Esse material é estendido sobre o talude, previamente modelado, e fixado com estacas de madeira ou grampos de metal. Quando comerciais, os geotêxteis podem ter alto custo; no entanto, soluções caseiras que empreguem restos culturais, como palhas, talos de milho ou bagaço de cana, podem representar soluções eficazes e de baixo custo.

O uso de sementes e mudas pode ser uma ação complementar. A utilização de sementes de gramíneas e ervas, como as empregadas para adubação verde, pode significar uma boa proteção até que a vegetação definitiva se estabeleça. As mudas, quando adquiridas a um baixo preço, podem complementar a revegetação, especialmente nas partes mais altas do talude, onde não se exigem formas especiais de plantio, como esteiras e feixes vivos.

Os gabiões (Figura 7.22) são de uso frequente na estabilização de encostas. São relativamente caros, porém são bastante eficientes e, quando vegetados, produzem efeitos estéticos agradáveis.

Estruturas de alvenaria ou concreto armado são bem mais caras do que as construídas com pedras e madeiras e só se justificam em casos excepcionais. Nesses casos, a Engenharia Natural passa a ter papel complementar, trabalhando para melhorar as características ecológicas e estéticas.



**Figura 7.22** – Uso de gabiões no o revestimento de margens ou ancoramento de encostas.

## **7.6 – Obras transversais**

As obras transversais são estruturas dispostas, quase sempre, de maneira perpendicular ao eixo longitudinal do leito de pequenos cursos de água.

Existem fundamentalmente dois grupos de obras transversais utilizadas no manejo biotécnico de cursos de água, caracterizados segundo sua função principal: obras transversais de consolidação, também denominadas obras transversais de estabilização, e obras transversais de retenção.

### **7.6.1 – Obras transversais de consolidação**

As obras transversais de consolidação têm como objetivo principal a estabilização e a consolidação do fundo, como também das margens dos cursos de água em tratamento.

Em um primeiro momento, a estabilização e a consolidação são conseguidas pelo alargamento do fundo do leito, através da estrutura física em si: a existência de um corpo fixo, resistente e bem engastado transversalmente ao curso de água impede que o fluxo escave em profundidade. Se a estrutura for complementada com asas laterais, a erosão nas margens também é impedida ou amenizada. Se a estrutura tiver, ainda, seu coroamento (sua borda superior) acima do nível do fundo do leito, ocorre a formação de um pequeno perfil de compensação (Item 3.7), que representa um alargamento do fundo a montante da posição da estrutura transversal. O perfil de compensação assim formado torna-se, por sua vez, uma base de apoio para os taludes marginais.

Tendo-se em vista o “peso” da construção e, especialmente, sua forma de ação, as obras transversais de estabilização ou consolidação podem ser divididas em quatro tipos:

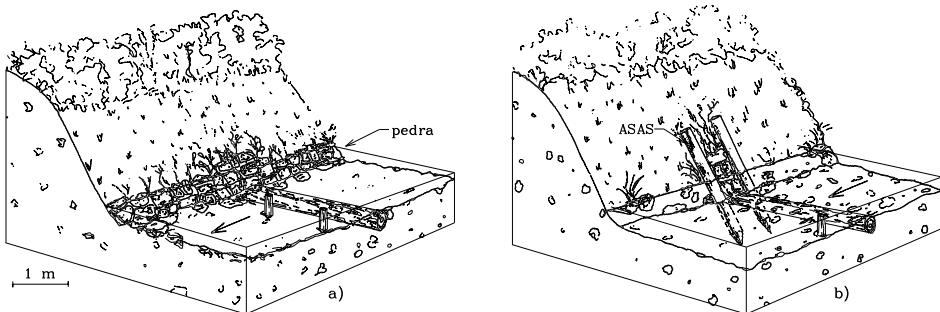
- A – Cinto basal simples;
- B – Soleira;
- C – Cinto basal saliente;
- D – Barragens de consolidação.

Os três primeiros tipos têm duas funções principais: o impedimento da erosão em profundidade e a formação de um leito definido para a torrente, não permitindo que ela corra difusamente. As barragens de consolidação, além dessas duas funções, têm também o objetivo de forçar o depósito e reter sedimentos vindos de montante.

- A – Cinto basal simples

O cinto basal simples (Figura 7.23) é uma estrutura construída

transversalmente ao eixo longitudinal do curso de água e tem sua parte superior situada no mesmo nível do fundo do leito. Sua construção é bastante simples e resulta em baixo custo. Os cintos basais simples podem ser construídos com diversos materiais, mas o uso de madeira roliça é muito frequente.

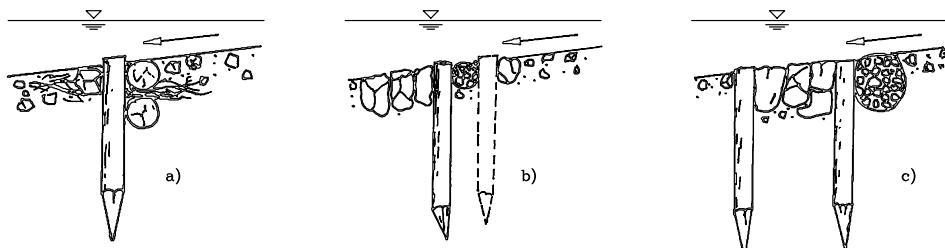


142

**Figura 7.23** – Cinto basal simples, confeccionado com madeira roliça

Nos casos mais simples, o cinto basal compõe-se de apenas um tronco de árvore, de diâmetro e comprimento variáveis em função da largura e do volume de água, que é enterrado de forma transversal até o nível do leito. Suas extremidades devem ser convenientemente engastadas nos taludes fluviais, para evitar sua remoção pela força da água durante as enchentes. Quando for preciso evitar a corrosão dos taludes fluviais, é conveniente construir reforços laterais (asas), que trabalhem de forma solidária com o cinto basal. Esses reforços podem ser construídos com madeira presa ao cinto ou com pedras encravadas na margem ou, ainda, com esteira viva sozinha ou complementando o trabalho das asas.

Quando a velocidade da água for grande ou quando o seu volume aumenta muito durante as maiores precipitações, é conveniente a construção de cintos basais mais reforçados, compostos por mais de um tronco de madeira e, se possível, em combinação com pedras e ancorados por pilotos (Figura 7.24).



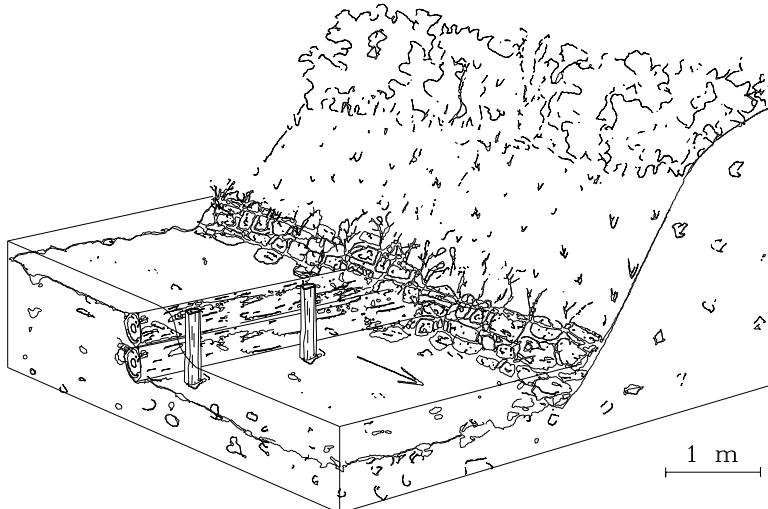
**Figura 7.24** – Corte transversal em cintos basais simples, com diferentes materiais e conformações

Quando se usam pedras para a confecção dos cintos basais, é aconselhável selecionar as de maiores dimensões e dispô-las com o seu maior comprimento a favor do fluxo de água, com vistas a utilizar a vantagem de sua alta velocidade limite de transporte. Na ausência de pedras grandes, pode-se usar seixos menores, desde que forçados ao trabalho solidário, o que pode ser conseguido, por exemplo, pela confecção e correto posicionamento de cilindros inertes (Figura 7.24c).

### B – Soleira

As soleiras, também chamadas de cintos basais com desnível, assemelham-se aos cintos basais simples, deles diferindo apenas por formar uma pequena queda de água a jusante. A altura de queda normalmente não deve ultrapassar os 40 cm (Figura 7.25).

143



**Figura 7.25** – Cinto basal com desnível, confeccionado com madeira roliça

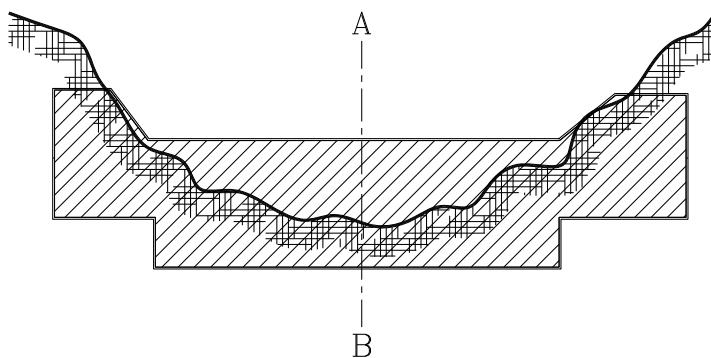
Os cintos basais com desnível também podem ser construídos com madeira ou blocos de pedra, existentes no próprio leito da torrente. Seu emprego é conveniente quando se trabalha em leitos de pouca declividade, eventualmente com pequenos ressaltos ou corredeiras naturais.

O desnível provoca a redução da velocidade da água através de sua queda e consequente turbilhonamento, diminuindo com isso o risco de erosão no trecho a jusante. Entretanto, exatamente no ponto de queda da água, muitas vezes, forma-se uma erosão por escavo, que precisa ser controlada, pela colocação de pedras maiores, para evitar a destruição da própria obra.

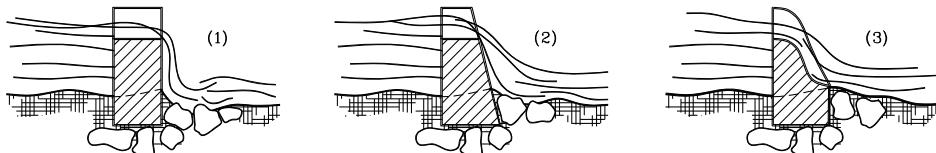
## C – Cinto basal saliente

O cinto basal saliente é também uma estrutura transversal, semelhante às anteriores, porém mais “pesada” e com o coroamento emergente do fundo do leito. A obra é, portanto, mais elevada que o fundo natural, provocando um represamento a montante e uma pequena queda de água a jusante. Apenas em períodos de maior vazão o espelho superior das águas é influenciado pelo inferior. Visto em corte transversal, o cinto basal saliente pode apresentar formas retilíneas, inclinadas ou sinoidais (Figura 7.26). Sua altura normalmente não chega a 1,5 m.

144



Cortes A – B



**Figura 7.26** – Cinto basal saliente, em vista frontal e em cortes transversais: (1) retilíneo, (2) inclinado, (3) sinoidal

Os cintos basais salientes podem ser construídos com diversos materiais, entre os quais se destacam a madeira e os blocos de pedra. Suas funções principais são formar um pequeno perfil de compensação, pela diminuição da velocidade da água a montante, e provocar um turbilhonamento a jusante. Com isso, busca-se o controle da erosão por escavo e também das margens, tanto a montante quanto a jusante da obra.

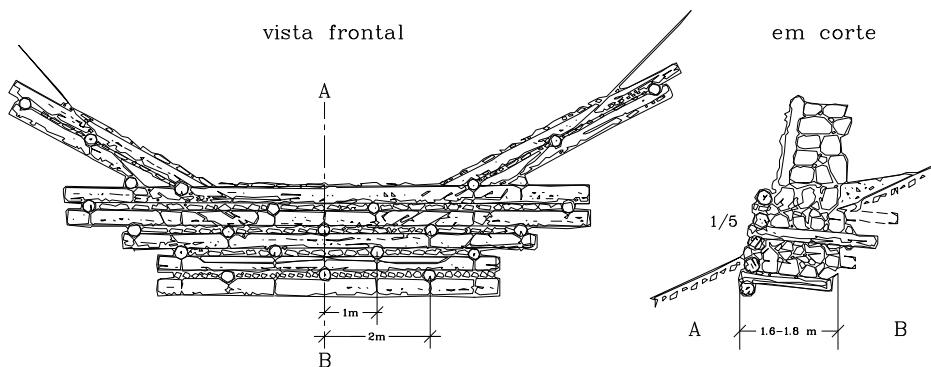
A erosão em profundidade, ou escavo, que ocorre imediatamente a jusante dos cintos basais salientes, é mais acentuada que nas soleiras. Tal problema

pode ser resolvido pela colocação de pedras grandes a jusante ou pela construção de um cinto basal simples complementar, com vistas a formar um colchão de água, para amortecer o impacto do fluxo que cai do cinto basal saliente.

#### D – Barragens de consolidação

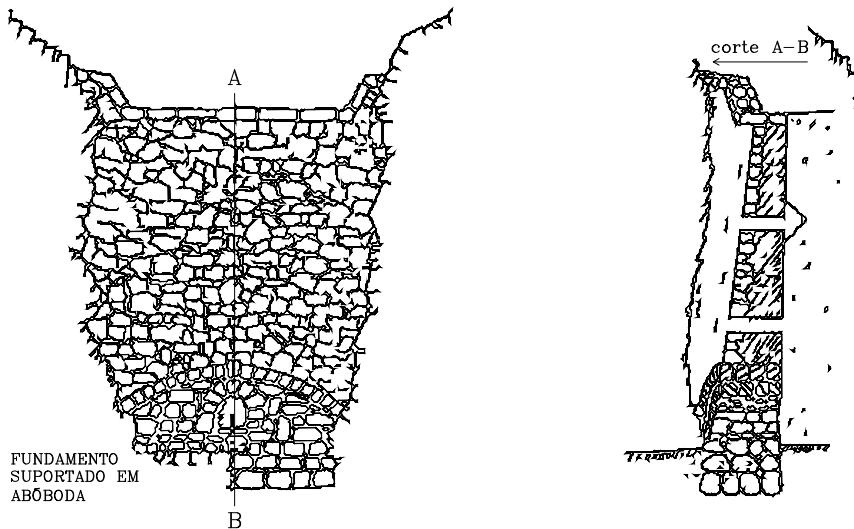
As obras transversais, cuja altura de queda da água ultrapassa 1,5 m, são denominadas barragens de consolidação. Tais obras podem ser construídas com madeira, pedras, gabiões, alvenaria ou concreto armado. Normalmente, procura-se aproveitar os materiais disponíveis no local da obra. Especialmente para obras de pequenas dimensões, troncos, pedras e seixos existentes no próprio leito são os materiais de preferência (Figura 7.27 e 7.28).

145



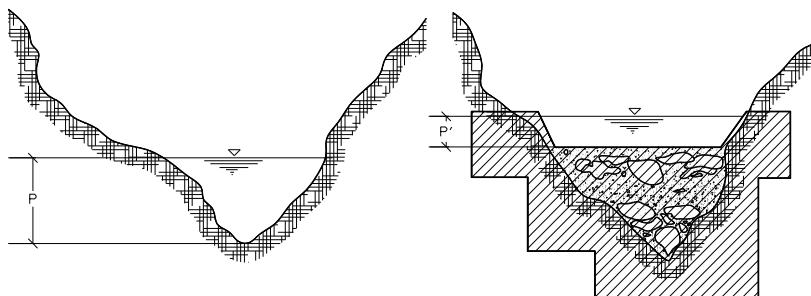
**Figura 7.27** – Barragens de consolidação construídas em madeira e pedras

O objetivo principal das barragens de consolidação é a diminuição da velocidade da água a montante e a jusante. A montante, a velocidade fica reduzida porque a barragem provoca um represamento da água. A jusante, a diminuição se dá pela queda e turbilhonamento: a água começa a escoar, partindo da velocidade zero. Com a redução da velocidade da água a montante, muitos materiais alcançam sua velocidade limite de transporte e se depositam. Mesmo não sendo sua principal função, as barragens de consolidação funcionam também como retentoras de materiais transportados pelas enxurradas. Assim como nos cintos basais salientes, forma-se, também, um perfil de compensação, que proporciona a base de apoio aos taludes marginais. Além disso, o perfil de compensação corresponde a um aumento da cota de inundação, o que implica redução da profundidade para uma mesma vazão (Figura 7.29) e, consequentemente, menor força erosiva da água (menor tensão de erosão).



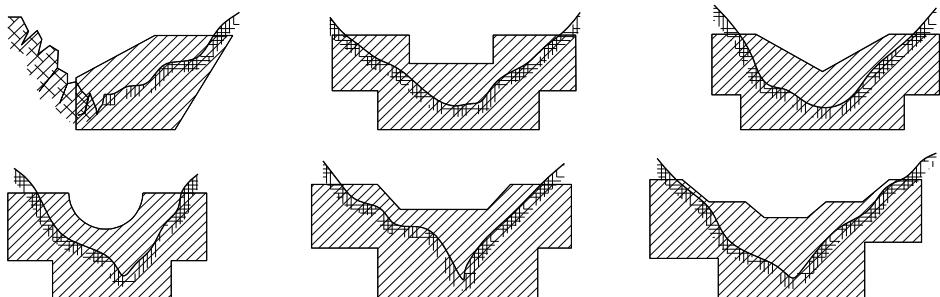
146

**Figura 7.28** – Barragem de consolidação construída com pedras



**Figura 7.29** – Perfil transversal de um curso de água antes e depois da construção de uma barragem de consolidação

As barragens de consolidação são classificadas pelas bocas, que podem ser assimétricas, retangulares, em forma de “V”, em segmento de círculo, trapezoidais simples ou duplas (Figura 7.30).



**Figura 7.30** – Vista frontal de diferentes seções de vazão (bocas) de barragens de consolidação

Outro aspecto importante das barragens é que elas, em vazões normais, só permitem a passagem da água através de suas respectivas seções de vazão (bocas), o que significa direcionamento do fluxo: a maior velocidade da água tende a se posicionar na direção do centro da boca, diminuindo a velocidade próximo aos taludes marginais.

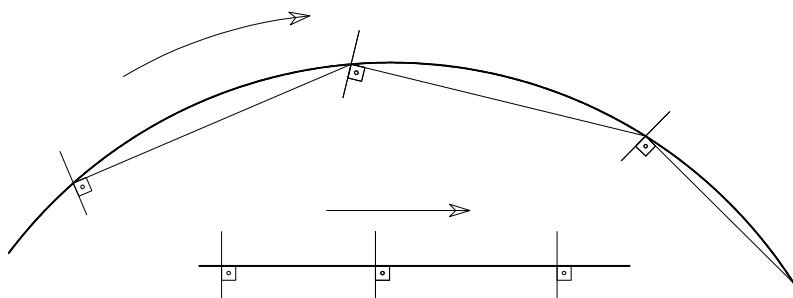
Na dependência dos casos, as barragens são complementadas por tratamentos longitudinais, cintos basais e soleiras. Esses complementos têm a função de dar maior estabilidade às barragens e diminuir os seus custos de construção.

## 7.6.2 – Determinação da posição das barragens

### 7.6.2.1 – Posição relativa ao eixo do curso de água

Quanto à posição das barragens em relação à direção do leito da torrente, deve-se fazer a distinção entre trechos retos e curvos (Figura 7.31).

147



**Figura 7.31** – Posicionamento das obras transversais em relação ao eixo do curso de água em trecho curvo e retilíneo

Em trechos retilíneos, as barragens são normalmente construídas em ângulo reto em relação à direção do canal.

Em trechos curvilíneos, deve-se fazê-las perpendiculares à corda que une o seu ponto médio com a que se segue, a jusante (Figura 7.31). Com essa configuração, a água é direcionada mais para o raio interno da curva, atenuando sua força no raio externo, evitando ou diminuindo a corrosão nesse trecho.

### 7.6.2.2 – Distância entre as barragens

Para a escolha do local de construção das barragens e para a determinação da distância entre uma obra e outra, deve-se levar em consideração, simultaneamente, três aspectos:

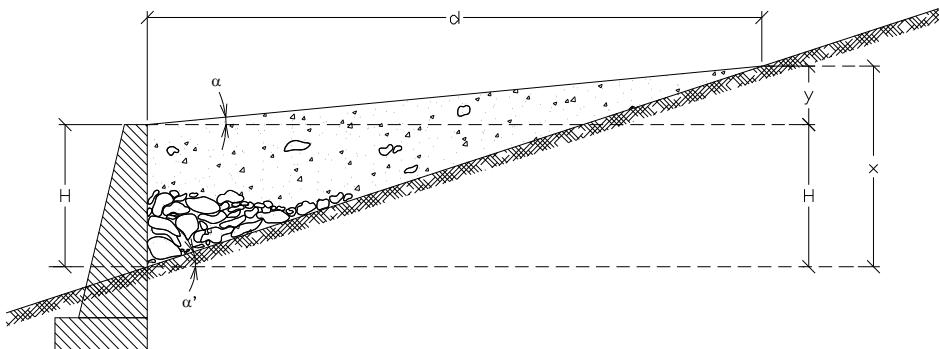
- A – Comprimento do trecho corrigido pelo perfil de compensação;  
 B – Segurança da intervenção;  
 C – Economia da obra.

A – Comprimento do trecho corrigido pelo perfil de compensação

Cada barragem construída tem um trecho de ação limitado. O alcance de sua ação corretiva e protetiva depende, fundamentalmente, de três variáveis:

- 1 – Dos materiais que se depositam a montante (já que deles depende a inclinação do perfil de compensação);
- 2 – Da inclinação original do leito;
- 3 – Da altura da construção.

Para calcular a distância corrigida por uma obra de altura conhecida ou para saber-se que altura deverá apresentar a barragem para corrigir um determinado trecho da torrente, basta analisar a figura 7.32.



**Figura 7.32** – Distância de influência de uma barragem de consolidação

onde:

$d$  = Distância corrigida pela barragem;

$H$  = Altura da barragem;

$\alpha$  = Ângulo do perfil de compensação;

$\alpha'$  = Ângulo do declive atual da torrente.

Observando-se novamente a figura 7.32, percebe-se que:

$$x = H + y \quad (7.1)$$

ou

$$H = x - y \quad (7.2)$$

como

$$x = d \cdot \operatorname{tg}\alpha' \quad e \quad y = d \cdot \operatorname{tg}\alpha \quad (7.3)$$

portanto,

$$H = d(\operatorname{tg}\alpha' - \operatorname{tg}\alpha) \quad (7.4)$$

que corresponde à altura da obra transversal, necessária para corrigir um determinado trecho de comprimento  $d$ .

Analogamente, invertendo os termos da fórmula, tem-se:

$$d = \frac{H}{\operatorname{tg}\alpha' - \operatorname{tg}\alpha} \quad (7.5)$$

que corresponde ao alcance do perfil de compensação de uma determinada barragem de altura  $H$ , em um trecho com inclinação natural do leito  $\alpha'$  e inclinação esperada do perfil de compensação igual a  $\alpha$ .

149

Para trechos de maior extensão, o número aproximado ( $N$ ) de obras transversais, com altura conhecida, é dado por:

$$N = \frac{E}{d} \quad (7.6)$$

Pela substituição de 7.5 em 7.6, resulta:

$$N = \frac{E(\operatorname{tg}\alpha' - \operatorname{tg}\alpha)}{H} \quad (7.7)$$

onde:

$E$  = Extensão total do trecho a corrigir;

$d$  = Trecho corrigido por cada obra transversal.

O resultado da equação 7.7 só é válido, evidentemente, para trechos com características relativamente uniformes, onde seria possível a construção de obras transversais de alturas semelhantes. Na prática, isso raramente ocorre, de maneira que o resultado deve ser considerado apenas como uma estimativa aproximada.

## B – Segurança da intervenção

Por esse critério, o local de construção da primeira e demais barragens deve situar-se em trechos cujas margens sejam estáveis: a estabilidade das margens implica também na estabilidade da obra. Esse fator deve ser cuidadosamente considerado, em especial no caso de barragens situadas no extremo inferior do leito a corrigir, já que sua eventual destruição afetaria a segurança das outras à montante.

## C – Economia da obra

Naturalmente, as obras transversais devem ser construídas em pontos mais estáveis e estreitos, que proporcionem maior economia, tanto de material como de mão de obra.

150

A estabilidade do local permite que os fundamentos e a ancoragem lateral sejam menores. A largura do curso de água no ponto escolhido também está diretamente relacionada com as dimensões da obra. Locais mais estreitos e estáveis permitem construções mais leves, mas mesmo assim suficientemente fortes para cumprir sua função.

### 7.6.2.3 – Sequência para a estabilização de cursos de água

A sequência de trabalho aconselhada para a estabilização biotécnica de um curso de água, independente se perene, intermitente ou efêmero, consiste em partir das intervenções maiores, mais complexas, para as menores e mais simples.

Assim, antes de se pensar na revegetação dos taludes, há que se verificar a necessidade de estabilização, pela construção de obras transversais e/ou de obras longitudinais mais elaboradas, a não ser que a construção selecionada já inclua o uso de vegetação, como é o caso das paredes vegetadas de madeira que são, necessariamente, complementadas com feixes vivos. O recobrimento vegetal dos taludes é, contudo, uma etapa a ser feita posteriormente à estabilização física. Não tem sentido, por exemplo, proceder à revegetação das margens quando houver risco de os taludes ruírem nas próximas enchentes.

Como foi visto, a estabilização projetada de um curso de água, pelos métodos da Engenharia Natural, não ocorre imediatamente após as correções. Por outro lado, existe pouquíssima experiência no uso da Engenharia Natural no Brasil. Devido a esses fatos, recomenda-se o monitoramento periódico dos trabalhos executados, fazendo-se observações sistemáticas, com vistas a usar as informações obtidas para trabalhos posteriores, em condições semelhantes.

### 7.6.3 – Obras transversais de retenção

Quando os maiores problemas causados pela ação da água não forem as escavações, mas sim as deposições, o objetivo principal das barragens deverá ser o de impedir que deposições venham a ocorrer, ocasionando prejuízos. Nesses casos, podem ser construídas as barragens de retenção.

A capacidade de retenção de uma barragem, isto é, sua vida útil como retentora de materiais, é limitada. Dependendo da quantidade de material transportado e da capacidade volumétrica das barragens, estas estarão preenchidas em um determinado espaço de tempo. Para avaliar o tempo de vida útil dessas construções, deve-se saber, pelo menos aproximadamente, qual a quantidade de detritos captados anualmente (assunto que foge ao escopo deste capítulo) e qual o volume total que poderá ser retido pela construção.

A quantidade de detritos que chegam anualmente à barragem deverá ser estimada por observações e medições, enquanto, para se ter um valor aproximado da capacidade de retenção da obra, pode-se fazer uso novamente da figura 7.32.

Observando-se a figura 7.32, pode-se deduzir que a área (a) do triângulo formado pelo perfil de compensação é:

$$a = \frac{H \cdot d}{2} \quad (7.8)$$

Utilizando a equação 7.5, a área pode ser escrita como:

$$a = \frac{1}{2} \left| \frac{H}{\operatorname{tg}\alpha' - \operatorname{tg}\alpha} \right| \cdot H \quad \text{ou seja,} \quad a = \frac{1}{2} \left| \frac{H^2}{\operatorname{tg}\alpha' - \operatorname{tg}\alpha} \right| \quad (7.9)$$

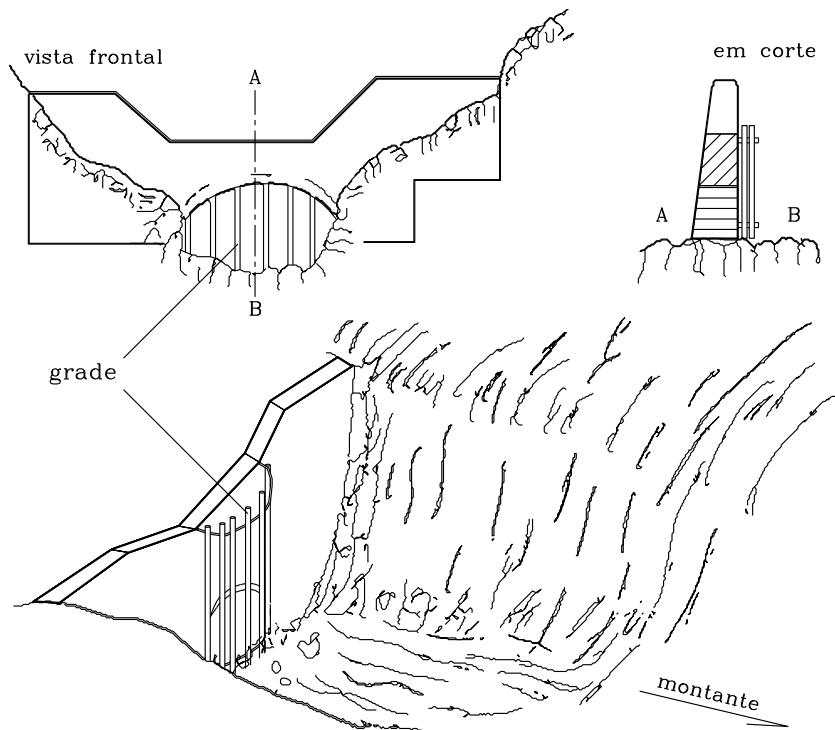
Essa área, multiplicada pela largura média da seção transversal “L”, que pode ser obtida por levantamento expedito, resultará na capacidade aproximada de retenção da barragem (v):

$$v = \frac{1}{2} \left| \frac{H^2}{\operatorname{tg}\alpha' - \operatorname{tg}\alpha} \right| \cdot L \quad (7.10)$$

A retenção total dos materiais transportados pela força das enxurradas traria consigo a desvantagem de materiais pequenos ficarem retidos em grande quantidade, o que teria como consequência uma diminuição de vida útil da

obra, pois esta seria preenchida mais rapidamente. Para evitar tal situação, devem-se construir as barragens de retenção com saídas para a água e para os materiais menores, deixando, por exemplo, um ou mais orifícios e instalando-se grades na parte inferior da face a montante (Figura 7.33).

152



**Figura 7.33 – Barragem de retenção com saída para a água**

A distância da malha das grades ou a dimensão dos orifícios são variáveis, dependendo da dimensão dos materiais que deverão ter passagem livre. A princípio, só se permite a passagem de material cuja velocidade limite de transporte seja menor que a velocidade das águas da torrente nos pontos onde não se quer deposição, evitando-se, com isso, que os materiais atravessem a malha e se depositem nesses locais.

## 7.7 – Dimensionamento de obras biotécnicas

A estabilidade de uma estrutura qualquer depende, a princípio, da confrontação de dois conjuntos de forças. De um lado, estão os esforços desestabilizantes, sejam eles de compressão, tração, flexão, cisalhamento ou torção,

que agem sobre a estrutura. De outro, encontram-se as forças estabilizantes ou resistentes da estrutura. Se as forças de deformação forem superiores às forças de resistência, ocorrem danos estruturais irreversíveis.

No manejo de cursos de água, podem ser necessárias obras de grande vulto, como a construção de grandes barragens, comportas, diques, canais de desvio etc. Até mesmo a construção de hidroelétricas, muitas vezes, além da produção de energia, visa também ao manejo de rios como objetivo secundário (por vezes até principal). Tais obras, evidentemente, necessitam de correto dimensionamento estático e envolvem grande quantidade de cálculos, testes e complexas simulações.

O manejo de cursos de água, pela Engenharia Natural, tem outro enfoque. Em vez de grandes estruturas de concreto armado, trata-se da execução de obras pequenas, frequentemente temporárias, onde, via de regra, são empregados materiais inertes em combinação com material biológico vivo.

Para a maioria dessas construções, não foram ainda desenvolvidos métodos exatos de dimensionamento analítico. Diferentemente do que ocorre com obras de engenharia tradicional, uma grande variedade de pequenas obras para o manejo de cursos de água é executada, com base em experiências práticas, sem que para elas seja necessária a determinação analítica da estabilidade. Esse fato é tanto mais verdadeiro quanto mais forem empregados materiais vivos nas obras de correção ou prevenção dos problemas. Entretanto, obras maiores para correção ou prevenção, como canalizações, barragens de consolidação em concreto e muros de arrimo, especialmente em locais onde eventuais deslizamentos ou desmoronamentos possam colocar em risco pessoas e/ou bens de valores relativamente elevados, certamente, precisam ser dimensionadas pelos métodos tradicionais da engenharia.

Existe, pois, uma diferença fundamental entre as obras de engenharia tradicional e as obras de Engenharia Natural que utilizam material vivo. As primeiras, representadas por pontes, estradas, moradias e outras edificações, são inertes e podem, se corretamente calculadas e construídas, ser consideradas estáticas. Apenas o tempo, como elemento dinâmico, age sobre a construção e, exceto nos primeiros momentos após o término da obra, quase sempre no sentido da diminuição da sua resistência. Nas obras da Engenharia Natural é diferente, pois o material usado, ou parte dele, é vivo e, portanto, sofre modificações muito grandes com o passar do tempo. O material vegetal se desenvolve, cresce e, posteriormente, morre. Ao contrário do que ocorre com as edificações tradicionais, a ação do tempo, por um longo período, é benéfica para as características de resistência da construção, devido ao crescimento do vegetal. Além disso, a morte das plantas componentes de uma estrutura não significa necessariamente a ruína dessa estrutura. Após a morte, as plantas

ainda exercem uma ação protetiva por bom tempo, permitindo que sua substituição seja feita e que a estrutura continue a desempenhar seu papel.

Embora o dimensionamento estático não seja legalmente exigido nem inteiramente factível com o conhecimento atual, dado o grande número de variáveis envolvidas no uso de material vivo, são necessários alguns cuidados, para assegurar a estabilidade. Na falta de metodologia comprovada de dimensionamento, a compreensão da influência dos diversos fatores envolvidos torna-se uma ferramenta indispensável para a construção de obras estáveis.

A figura 7.34 representa, de forma esquemática, o conjunto de fatores que determinam a estabilidade de uma obra de Engenharia Natural.

154

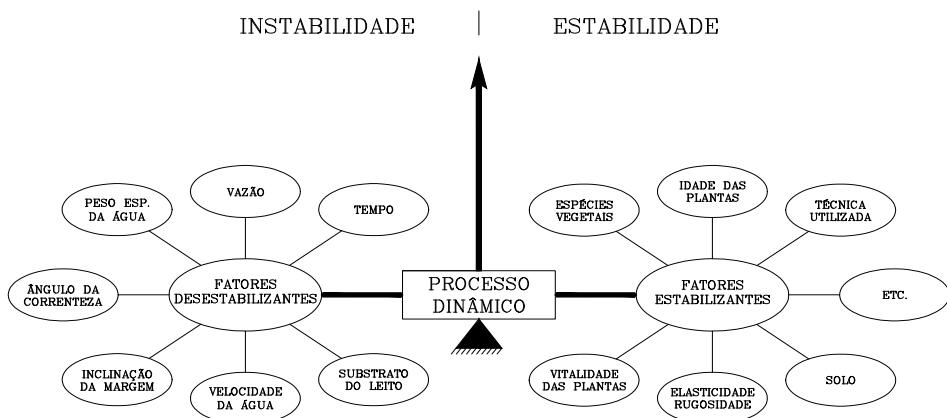


Figura 7.34 – Fatores desestabilizantes e estabilizantes

Do equilíbrio dinâmico desses dois conjuntos de fatores, representados na figura 7.34, depende a estabilidade da construção. Basta que qualquer um dos fatores relacionados com as forças de deformação ou com as forças de resistência seja alterado, para que a balança se movimente mais para o lado da estabilidade ou da instabilidade. É função da Engenharia Natural contribuir para que o “ponteiro” da balança esteja sempre voltado para a estabilidade.

Esse processo dinâmico tem inúmeras variáveis, que se modificam paulatinamente ao longo do tempo, tais como o crescimento vegetal, a idade e a vitalidade das plantas, o grau de recobrimento superficial, o substrato do leito, a inclinação da margem e as características do solo. Outras variáveis, como a vazão, o peso específico (densidade), a velocidade da água e o ângulo da correnteza, modificam-se de forma quase repentina. As características fisiográficas, como geometria, tamanho, profundidade do leito e forma do canal, também podem sofrer fortes e quase repentinhas modificações. Assim, pode-se imaginar que as obras ora se encontrem em perfeita estabilidade e ora próximas à ruína.

No grupo dos fatores desestabilizantes, existem várias características que podem ser modificadas positivamente no sentido de diminuir as tensões que causam. É possível, por exemplo, que se modifiquem a velocidade da água, a inclinação da margem e o ângulo da correnteza, de forma relativamente fácil. Outros fatores, como vazão, peso específico da água e substrato do leito, são mais difíceis de modificar ou se modificam forçosamente em consequência da modificação dos anteriores.

De maneira análoga, existem diversos fatores no grupo das forças de resistência que podem ser utilizados convenientemente para aumentar a estabilidade das construções.

A Engenharia Natural é uma ciência na qual são arranjados os diferentes fatores mostrados na figura 7.34 de modo que, no conjunto, as forças favoráveis à estabilidade prevaleçam sobre as forças desfavoráveis.

155

## Bibliografia

ANIMOTO, P. Y. *Erosion and sediment control handbook*. Sacramento, California: Department of Conservation, 1978.

BEGEMANN, W.; SCHIECHTL, H. M. *Ingenieurbiologie*: Handbuch zum ökologischen Wasser und Erdbau. 2. neubearbeitete Auflage. Wiesbaden und Berlin: Bauverlag GMBH, 1994.

BINDER, W.; JURGING, P.; KARL, J. Natural river engineering: characteristics and limitations. *Garten und Landschaft*, 2, p. 91-94, 1983.

BRASIL. Ministério do Exército, Diretoria de Obras de Cooperação. *Utilizando a Bioengenharia*. Boletim Técnico. Disponível em: <[http://www.exercito.gov.br/06OMs/Diretori/doc/bol\\_tec/bioengenharia.htm](http://www.exercito.gov.br/06OMs/Diretori/doc/bol_tec/bioengenharia.htm)>. Acesso em: 16 maio 2003.

FISRWG. *Stream Corridor Restoration*: principles, processes, and practices. By the Federal Interagency Stream Restoration Working Group (FISRWG). 15º Federal agencies of the US gov't, 1998.

FLORINETH, F.; GERSTGRASER, C. *Ingenieurbiologie*. Wien: Institut für Landschaftsplanung und Ingenieurbiologie. Universität für Bodenkultur, 2000.

GRAY, D. H.; LEISER, A. T. *Biotechnical slope protection and erosion control*. Florida: Krieger Publishing Company Malabar, 1982.

\_\_\_\_\_; SOTIR, R. B. *Biotechnical and soil bioengineering*. New York: John Wiley & SONS: INC, 1996.

- MORGAN, R. P. C.; RICKSON, R. J. *Slope stabilization and erosion control: a bioengineering approach*. London: E&FN Spon, 1995.
- SCHIECHTL, H. M. *Bioengineering for land reclamation and conservation*. Edmonton: University of Alberta Press, 1980.
- \_\_\_\_\_. *Sicherungsarbeiten im Landschaftsbau*. München: Callway, 1973.
- \_\_\_\_\_. STERN, R. *Handbuch für naturnahen Erdbau: Eine Einleitung für ingenieurbiologische Bauweisen*. Wien: Österreichischer Agrarverlag, Druck und Verlagsgesellschaft m.b.H., 1992.
- \_\_\_\_\_; \_\_\_\_\_. *Handbuch für naturnahen Wasserbau: Eine Einleitung für ingenieurbiologische Bauweisen*. Wien: Österreichischer Agrarverlag, Druck und Verlagsgesellschaft m.b.H., 1994.

# 8

## ESTUDO DE CASO: O ARROIO GUARDA-MOR

### 8.1 – Introdução

Para a apresentação do estudo de caso, escolheu-se a área de drenagem do Arroio Guarda-Mor, por ser típica para uma região significativa do Estado do Rio Grande do Sul. A maioria dos cursos de água de dimensões semelhantes, que descem do Planalto Gaúcho para a Depressão Central, apresenta similaridade com o Guarda-Mor. Assim, têm-se razões suficientes para acreditar que as informações levantadas e as formas de manejo testadas podem ser válidas, com as devidas adaptações, também para outros cursos de água da região.

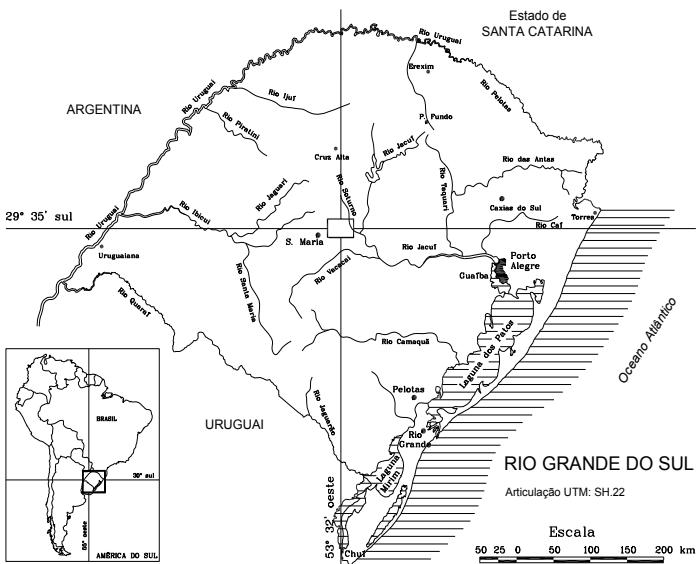
Para a caracterização da área de estudo, deu-se mais importância a descrições genéricas, de cunho prático, que são válidas não só para a bacia do Guarda-Mor. Na sequência, descreveu-se a construção e o comportamento de duas pequenas obras de Engenharia Natural: uma parede vegetada de madeira (Parede Krainer) e uma esteira viva.

### 8.2 – Caracterização geral da área

#### 8.2.1 – Localização e hidrografia

A figura 8.1 mostra a localização da área de estudo na rede hidrográfica do Rio Grande do Sul.

Situado entre as regiões fisiográficas do Planalto e Depressão Central do Rio Grande do Sul, o Arroio Guarda-Mor une-se ao Rio Mello cerca de 600 m antes do seu deságue no Rio Soturno, que, por sua vez, é tributário do Rio Jacuí, principal curso de água que contribui à Laguna Guaíba.



**Figura 8.1** – Localização da área de estudo

A cabeceira do arroio faz a divisa dos municípios de Ivorá, ao norte, e de Silveira Martins, ao sul, pertencendo uma parte, no extremo oeste, ao município de Júlio de Castilhos, na altura do distrito de Três Mártires. O terço jusante da área de drenagem pertence ao município de Faxinal do Soturno.

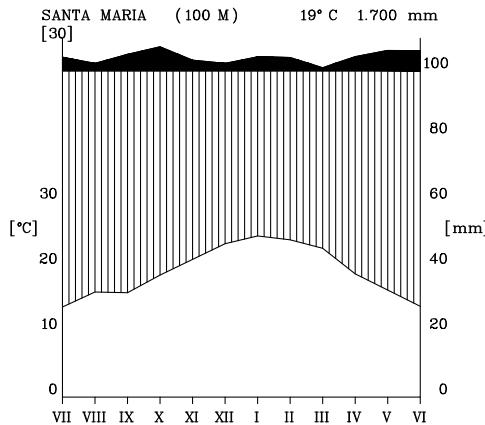
## 8.2.2 – Clima

O clima dessa região do Estado é subtropical do tipo Cfa 2, segundo a classificação de Köppen (MORENO, 1961), o que corresponde a condições climáticas úmidas, com verões quentes e chuvas bem distribuídas durante o ano. No entanto, pode ocorrer déficit hídrico nos meses de temperaturas mais elevadas (novembro a março).

Por outro lado, a ocorrência de precipitações que podem somar 2.500 mm anuais, alcançando mais de 400 mm nos meses mais chuvosos, marca os chamados anos de El Niño, que ocorrem com uma frequência aproximada de cinco anos.

A temperatura média da região é de 19°C, e a precipitação anual é de 1.700 mm. O diagrama climático da figura 8.2 mostra a variação anual da temperatura e precipitação.

Os dados utilizados para compor o diagrama climático mostrado na figura 8.2 são provenientes da estação agrometeorológica da Universidade Federal de Santa Maria, que fica a 18 km da nascente do Arroio Guarda-Mor.

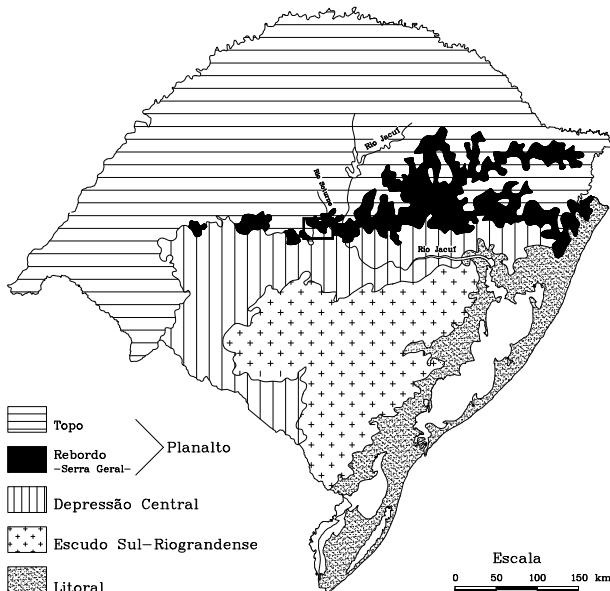


**Figura 8.2 – Diagrama climático da região de Santa Maria**

159

### 8.2.3 – Geomorfologia, geologia e solos

A metade norte do Rio Grande do Sul (Alto Uruguai, Missões, Planalto Médio, Encosta Inferior do Nordeste, Encosta Superior do Nordeste, Campos de Cima da Serra) e mesmo a região da Campanha pertencem ao grande compartimento geomorfológico do Planalto Meridional Brasileiro, subdividido em topo (planalto propriamente dito) e Rebordo do Planalto, que dá forma à Serra Geral (Figura 8.3).

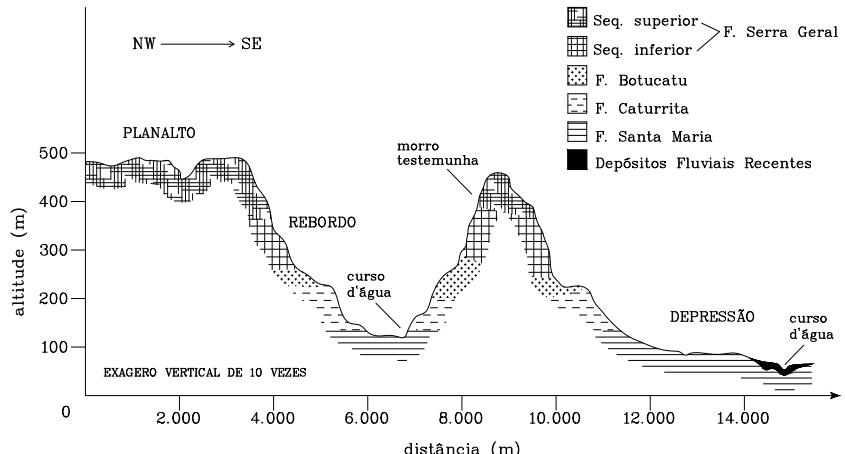


**Figura 8.3 – Compartimentação geomorfológica do Rio Grande do Sul, posição do Rio Jacuí e bacia do Arroio Guarda-Mor**

A Serra Geral possui uma escarpa nordeste com cerca de 150 km de extensão, aproximadamente paralela à costa, que é a feição mais proeminente do Estado (relevos locais superiores a 1.000 m), e outra, bem mais extensa (mais de 600 km), que se estende de leste a oeste, formando uma borda profundamente recortada e intemperizada.

A escarpa de sentido leste-oeste é conhecida como Rebordo do Planalto ou vertente sul da Serra Geral. São frentes abruptas que descem em direção à Depressão Central Gaúcha, formando patamares escalonados, expostos para o sul. A região fisiográfica da Depressão Central, que se situa sobre um compartimento geomorfológico de mesmo nome, é subdividida em áreas de coxilhas e de planícies aluviais. O Rio Jacuí nasce no Planalto e possui seu curso médio fortemente encaixado no Rebordo; em seguida, passa a descrever o seu curso entre planícies e coxilhas da Depressão Central, ao sopé da escarpa leste-oeste da Serra Geral. As pequenas variações altimétricas da Depressão Central só são interrompidas pelos relevos residuais relacionados à Serra Geral, que testemunham a profunda reesculturação e recuo para o norte, devido aos processos de erosão e ao entalhamento regressivo dos cursos de água que drenam a encosta. O Arroio Guarda-Mor é um desses pequenos cursos de água que drenam a escarpa leste-oeste da Serra Geral, nascendo no Planalto e alcançando a Depressão Central, com diferença altimétrica entre o topo e o talvegue superior a 400 m.

Segundo Pontelli (1994), a formação geológica do Rebordo do Planalto pertence à sequência sedimentar gondwânica, que preencheu a Bacia do Paraná (Formação Santa Maria, Caturrita e Botucatu), como também aos derrames fissurais do final do Jurássico e início do Cretáceo, representados pela Formação Serra Geral, com uma sequência inferior básica (basaltos) e uma superior ácida (granófiros e vitrófiros), conforme pode ser observado na figura 8.4.



**Figura 8.4 – Perfil topográfico-geológico (adaptado do mapa geológico da carta de Camobi)**

A figura 8.4 mostra a sequência litológica, normalmente encontrada em um corte transversal do Rebordo do Planalto, na região em questão.

No Planalto, segmento superior da Formação Serra Geral, o relevo é suavemente ondulado, onde predominam solos profundos e fortemente intemperizados, os Latossolos. À medida que se aproxima do Rebordo do Planalto, as inclinações tornam-se mais acentuadas e se inicia a ocorrência de Argissolos, de profundidade mais variável. A parte superior do Rebordo do Planalto é constituída de frentes abruptas e escarpadas, que expõem tanto a sequência superior quanto a inferior da Formação Serra Geral. Nessas áreas, ocorrem Argissolos e também Neossolos Litólicos. Devido à instabilidade dessas encostas, os deslizamentos e o entalhamento regressivo acabam expondo constantemente as rochas. Na sequência, encontra-se a Formação Botucatu e, ao sopé dos contrafortes (já na Depressão Central), a Formação Caturrita, caracterizadas por rochas de constituição arenítica (esta última mais resistente), onde ocorrem principalmente Alissolos. Por vezes, a Formação Botucatu pode ocorrer entreposta (intertrapes) às camadas do derrame basáltico, que constituem a Formação Serra Geral. Perifericamente à Formação Caturrita, estende-se uma planície aluvial, que recebe o nome de Formação Santa Maria, dividida em membro Alemao e Passo das Tropas. Essa formação dá origem aos Planosolos, por vezes associados à presença de Gleissolos. À margem dos grandes cursos de água da região, existe a presença de Depósitos Fluviais Recentes, que formam Neossolos Flúvicos.

### **8.2.4 – Vegetação original**

A vegetação original é predominantemente florestal e pertence à região ecológica da Floresta Estacional Decidual,<sup>1</sup> que, por sua vez, é compartimentada nas formações aluvial, submontana e montana (TEIXEIRA; COUTA NETO, 1986; PASTORE; RANGEL FILHO, 1986; LEITE, 1994, 2002).

Em altitudes superiores a 400 m, ocorre a formação montana. A floresta submontana recobre a vertente sul da Serra Geral, a oeste do Rio Caí, bem como os terrenos dissecados no vale do Uruguai, ao norte do Rio Ijuí, limitada às cotas altimétricas de 400 m. A formação aluvial corresponde às matas ciliares de rios, como Jacuí, Ibicuí, Santa Maria e também Uruguai e respectivos afluentes (MARCHIORI, 2002).

A área de drenagem do Arroio Guarda-Mor possui suas cabeceiras em

---

<sup>1</sup> Apesar de os termos “estacional” e “decidual” serem inadequados, como bem demonstra Marchiori (2002), vale lembrar que, de acordo com Leite (2002), tais termos referem-se ao aspecto fisionômico desse tipo florestal, que é marcado pela queda da folhagem de mais de 50% das árvores do estrato superior, durante a estação fria.

cotas que superaram o limite de 400 m. Os pequenos cursos de água que aí se formam, em seguida passam a drenar os contrafortes da vertente sul da Serra Geral, alcançando, então, os vales do Rio Soturno, um dos principais afluentes do Rio Jacuí. A área de drenagem do Arroio Guarda-Mor recebe, assim, influência das três formações da floresta estacional decidual, com destaque às formações submontana e aluvial.

Conforme Leite (2002), a floresta decidual apresenta estrutura distinta, que pode ser agrupada em quatro estratos: o primeiro, descontínuo, das árvores altas e emergentes; o segundo, bastante denso, de árvores com altura mais ou menos uniforme; o terceiro, de arvoretas; e o quarto, de arbustos.

Na formação montana, tem-se um número pequeno de espécies, sobressaindo-se *Parapiptadenia rigida* (angico-vermelho), *Cedrela fissilis* (cedro), *Cabralea canjerana* (canjerana), *Myrocarpus frondosus* (cabriúva), *Cordia americana* (guajuvira), *Luehea divaricata* (açoita-cavalo), entre outras.

Estruturalmente, a formação florestal submontana caracteriza-se por apresentar um estrato arbóreo emergente, no qual predominam *Apuleia leiocarpa* (grápia), *Parapiptadenia rigida* (angico-vermelho), *Myrocarpus frondosus* (cabriúva), *Cordia trichotoma* (louro), *Phytolacca dioica* (umbú); um estrato dominado, constituído essencialmente por *Cordia americana* (guajuvira), *Luehea divaricata* (açoita-cavalo), *Nectandra megapotamica* (canela-preta), *Eugenia rostrifolia* (batina), *Ocotea puberula* (canela-guaicá) e *Pachystroma longifolium* (mata-olho); e um estrato de arvoretas, onde se destacam *Gymnanthes concolor* (laranjeira-do-mato), *Sorocea bonplandii* (cincho) e *Trichilia clausenii* (catiguá), além de um estrato de arbustos e gramíneas.

Na formação aluvial, ocorrem pequenas variações estruturais e florísticas, em função do solo e das condições locais de drenagem. Assim, nas áreas frequentemente inundáveis e de drenagem lenta, o estrato arbóreo é aberto, sendo dominado por *Erythrina cristagalli* (corticeira-do-banhado), *Salix humboldtiana* (salseiro), *Inga vera* (ingá), *Sebastiania commersoniana* (branquinho), *Syagrus romanzoffiana* (jerivá), *Sapium glandulosum* (toropi), entre outras.

Nos locais de solos drenados e só esporadicamente inundáveis, a cobertura arbórea é densa, sendo formada principalmente pelas espécies: *Luehea divaricata* (açoita-cavalo), *Cordia americana* (guajuvira), *Parapiptadenia rigida* (angico-vermelho), *Ruprechtia laxiflora* (farinha-seca) e *Cupania vernalis* (camboatá). No estrato das arvoretas, dominam os “sarandis” (*Phyllanthus sellowianus*, *Pouteria salicifolia*, *Sebastiania schottiana* e *Terminalia australis*), bem como *Casearia sylvestris* (chá-de-bugre) e *Bambusa trinii* (taquaraçu). Nesse estrato, é comum a presença das “caliandas”, *Calliandra brevipes* de forma mais expressiva e *Calliandra tweediei* com menor ocorrência (TEIXEIRA; COUTA NETO, 1986; PASTORE; RANGEL FILHO, 1986).

### 8.2.5 – Vegetação atual e usos da terra

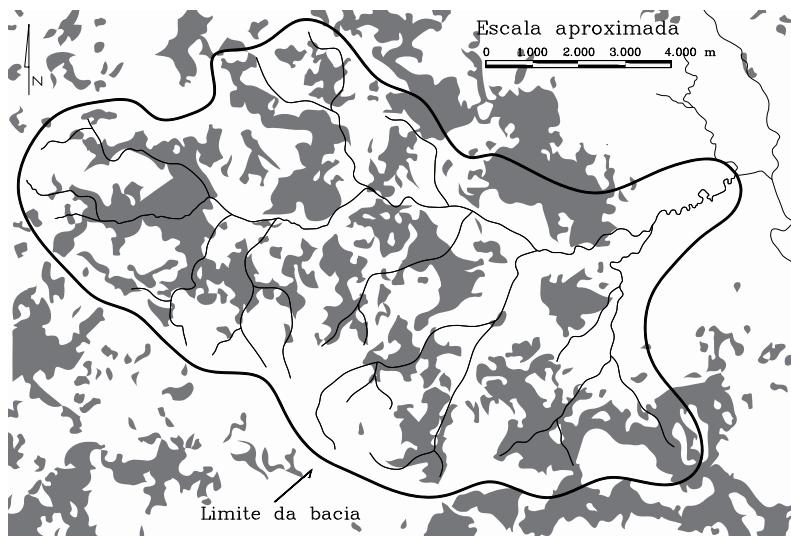
A vegetação atual dessa região colonial do Estado ainda é significativamente composta por florestas (Tabela 8.1 e Figura 8.5).

**Tabela 8.1** – Características demográficas e cobertura florestal dos municípios que possuem áreas na bacia do Arroio Guarda-Mor

Municípios	Área (km <sup>2</sup> )	Floresta (%)	Propriedades rurais (número)	Propriedades rurais por classe de tamanho (ha)			
				0-25	25-50	50-100	+100
Faxinal do Soturno	166	32	690	50%	38%	11%	< 1%
Ivorá	130	23	481	55%	31%	13%	< 1%
Silveira Martins	122	31	378	71%	21%	5%	3%

**Fonte:** Prodesus (1998).

Os dados da tabela 8.1 evidenciam que a região se caracteriza pela presença de pequenas propriedades rurais (90% delas com menos de 50 ha). A economia local fundamenta-se no policultivo, e a cobertura florestal concentra-se, principalmente, nas cabeceiras dos cursos de água, encravados no Rebordo (Figura 8.5).



**Figura 8.5** – Limite da bacia hidrográfica, rede de drenagem e cobertura florestal do Arroio Guarda-Mor

**Fonte:** adaptada de Prodesus (1998).

Nos fragmentos florestais, principalmente nas áreas de topografia acidentada, ainda se pode reconhecer a estrutura e a composição primitiva (original) da vegetação. Atualmente, entretanto, essas florestas possuem uma riqueza biológica bem menor que a original, principalmente com relação às espécies euxilóforas. Os espécimes de valor e porte comercial são agora raros, e o manejo dessas florestas e capoeiras emergentes não é praticado. Por este motivo, grande parte das áreas de topografia acidentada é atualmente improdutiva.

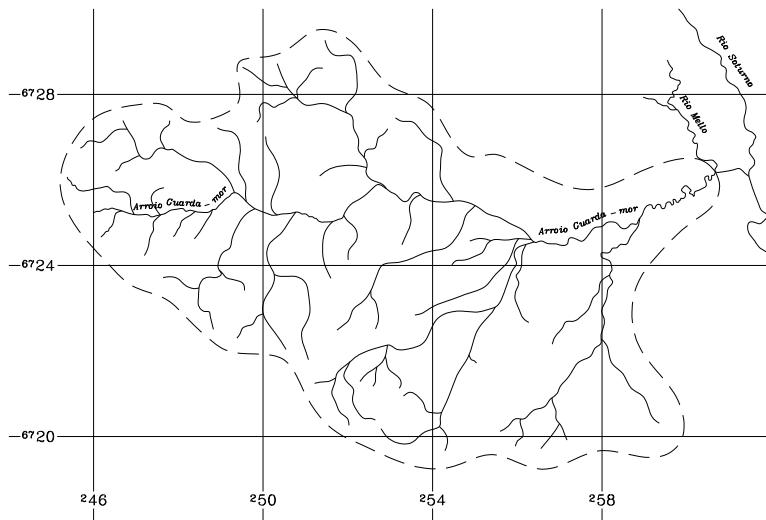
A atividade produtiva, normalmente de caráter agrícola, é praticada nas áreas menos declivosas, tanto no Planalto como na Depressão Central e nas áreas intermediárias do Rebordo. No Planalto, a exploração baseia-se tanto na pecuária como na agricultura, tendo como principais produtos a batata, a soja, o trigo, o milho e o feijão. Nas áreas intermediárias do Rebordo, o fumo, a fruticultura e a cultura da batata são importantes. As várzeas da Depressão são destinadas, quase que exclusivamente, para a produção de arroz.

164

## 8.3 – O Arroio Guarda-Mor

### 8.3.1 – Fisiografia fluvial

A rede de drenagem do Arroio Guarda-Mor é do tipo exorreica, com um padrão geométrico tipicamente dendrítico (Figura 8.6), que, de acordo com Cunha (2001), desenvolve-se sobre rochas de resistência uniforme ou em rochas estratificadas horizontalmente, como é o caso da região do Rebordo.



**Figura 8.6** – Bacia hidrográfica e rede de drenagem do Arroio Guarda-Mor

A área da bacia é de aproximadamente 9.300 ha, tendo cerca de 120 km de cursos de água permanentes que a drenam, ou seja, uma densidade de drenagem de 1,3 km/km<sup>2</sup>, valor considerado baixo pelos limites fornecidos por Sousa (1977).

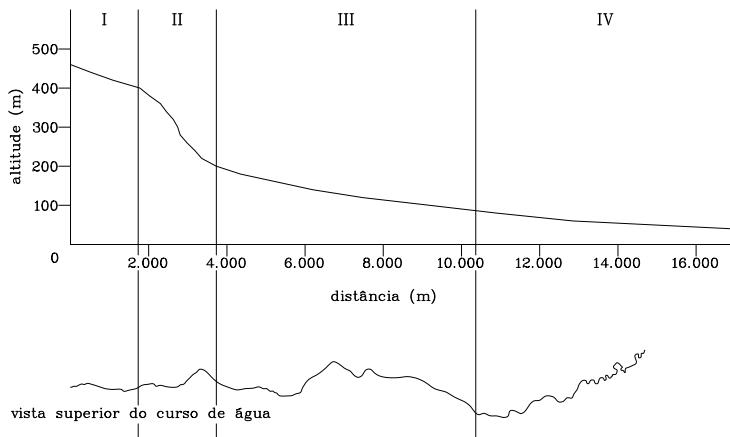
Além do padrão geométrico a figura 8.6 mostra a hierarquia da rede fluvial e a maneira com que o Arroio Guarda-Mor, curso de água de 4<sup>a</sup> ordem, une-se ao Rio Mello, de 5<sup>a</sup> ordem, para, só então, afluir ao Rio Soturno. A mesma figura permite verificar ainda os limites e a posição geográfica da área de drenagem, respectivamente, pela linha pontilhada e pela georreferência em coordenadas UTM (Universal Transversa de Mercator).

Com base nos critérios de Christofeletti (1981), constatou-se que o Arroio Guarda-Mor possui canais com um padrão fisionômico predominantemente do tipo retilíneo. O padrão tipicamente meandrante é assumido somente nos dois últimos quilômetros. Neste trecho, o valor do índice de sinuosidade chega a 1,78, o que, segundo a classificação proposta por Schumm (1972), considera-se como meandrante regular. Se for observada toda a extensão do Arroio Guarda-Mor (da foz à nascente), vê-se que ele percorre aproximadamente 18,5 km, em um vale que tem 14,7 km de extensão. Isso equivale a um índice de sinuosidade de 1,26, valor considerado transicional.

Cunha (2001) menciona que os canais meandrinos são encontrados, com frequência, em áreas úmidas cobertas por vegetação ciliar, descrevendo curvas sinuosas, harmoniosas e semelhantes entre si. Além disso, possuem um único canal, que transborda na época das cheias, sendo distinguidos dos outros padrões por um índice de sinuosidade igual ou superior a 1,5. Com exceção da vegetação ciliar, que nos últimos anos foi quase eliminada na área, essas são as características típicas que o Arroio Guarda-Mor assume na sua porção final. Isso faz com que o arroio, conforme a nomenclatura de Christofeletti (1981) e FISRWG (1998), possua um leito menor e de vazante, utilizado nos períodos de menor precipitação, e um leito maior, que é ocupado nos períodos torrenciais.

### 8.3.1.1 – Perfil longitudinal

Com base nos dados levantados na Carta do Exercito (Cartas Camobi e Faxinal do Soturno), foi construído o perfil longitudinal do Arroio Guarda-Mor (Figura 8.7). A conformação resultante é típica também para os demais cursos de água que, como o Guarda-Mor, descem os contrafortes da Serra Geral do Rio Grande do Sul. O perfil longitudinal foi dividido em quatro seções (Figura 8.7), distinguíveis, a princípio, pela declividade.



**Figura 8.7** – Perfil longitudinal do Arroio Guarda-Mor (I, II, III e IV, correspondem a diferentes seções classificadas pela declividade)

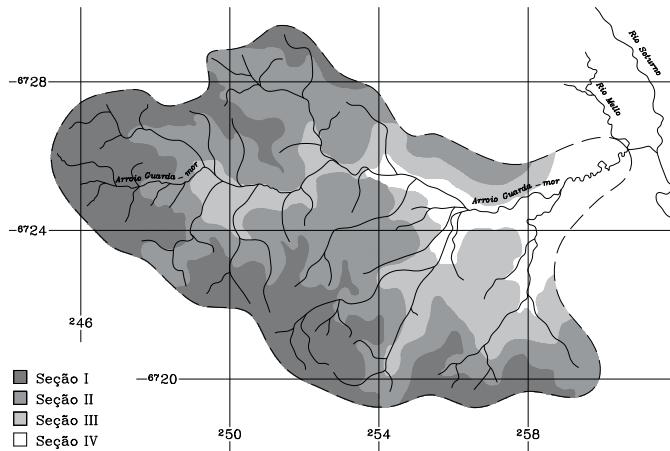
166

A seção I, pouco extensa, tem uma declividade relativamente forte (40%) e corresponde às nascentes do Guarda-Mor. A seção II, igualmente de pequena extensão, caracteriza-se por uma declividade muito forte (100%). Esta seção corresponde à descida, propriamente dita, do Planalto para a Depressão Central. A seção III, bastante extensa, se comparada com as anteriores, continua a descida para o vale, porém com declividade bem mais suave (20%). A seção IV situa-se na parte baixa do curso, com declividade relativamente pequena (< 10%). Tal divisão, feita inicialmente com base apenas na declividade, fica mais evidente quando associada a outras características peculiares de cada seção, tais como geologia, solo, vegetação e, principalmente, atividade humana.

As características exclusivas do Rebordo do Planalto dão ao perfil longitudinal do Arroio Guarda-Mor uma forma bastante particular, que não combina totalmente com a tradicionalmente esperada. Observa-se uma forma convexa na transição entre a seção I (porção pertencente ao Planalto) e a seção II. Somente a partir desse ponto aparece a forma esperada e descrita por Christofoletti (1981): uma parábola côncava, com declividades maiores em direção à nascente e com valores cada vez mais suaves em direção à foz.

### 8.3.2 – Processos fluviais

Os padrões de declividade mostrados pelo perfil longitudinal do Guarda-Mor, bem como as expressões da topografia, solos, vegetação e atividade humana, repetem-se nos pequenos cursos de água tributários. Com base nesses padrões, é possível dividir toda a bacia em áreas semelhantes. Essa divisão é demonstrada, em planta baixa, na figura 8.8.



**Figura 8.8 –** Vista, em planta, da divisão das seções da bacia hidrográfica do Guarda-Mor

### Seção I

167

Nessa seção, o Arroio Guarda-Mor apresenta uma declividade média relativamente forte (40%), no entanto verificou-se que as áreas do entorno são formadas por colinas suaves.

A exploração agrícola diversificada, a pecuária extensiva, os capões de mato e as matas ciliares formam um belo mosaico e mantêm o solo normalmente protegido. Esse padrão, somado ao pequeno volume de vazão e à manutenção de uma estreita faixa de vegetação florestal ao longo dos pequenos cursos de água, garante uma atividade processual mínima, não preocupante.

### Seção II

Os cursos de água, após percorrerem um pequeno trecho na parte superior da bacia, começam a descer os contrafortes da Serra Geral. Suas águas, devido às altas pendentes (por vezes superiores a 100%), adquirem grande velocidade e formam cascatas, o que caracteriza tais cursos como rios de montanha, com capacidade de escavação e de transporte.

Grandes trechos desses cursos de água, no entanto, encontram-se diretamente esculpidos sobre um substrato basáltico, ou fluindo entre rochas de grandes dimensões e alta velocidade limite de transporte. Esse fato faz com que as águas, embora apresentem grande velocidade, não causem problemas significativos, com exceção em eventos torrenciais catastróficos.

Praticamente em toda a área dessa seção, não ocorre o desenvolvimento de processos de erosão que tenham tido o homem como agente causador.

Esse fato deve-se a fatores geológicos, à cobertura vegetal bastante própria e à pouca atividade humana na área. No entanto, é em regiões como essa que os movimentos de massa, devido a causas naturais, têm lugar. Após precipitações intensas e/ou cumulativas, é comum a ocorrência de deslizamentos, facilmente detectáveis na região em estudo, por suas cicatrizes mais recentes. Devido à alta velocidade da água, característica dessa seção, todo o material que é escavado do próprio leito e/ou gerado pelos deslizamentos e que, de alguma forma, alcança o leito dos riachos é transportado em grande velocidade para a seção seguinte ou para as demais, podendo aí se depositar. Isso indica, eventualmente, a conveniência da construção de obras transversais de retenção nessa seção.

Grande parcela da cobertura vegetal permanente da bacia se encontra nessa seção. Na sua maior parte, a vegetação é formada por florestas nativas, entremeadas por poucas e pequenas áreas de lavouras (fumo, milho e batata) e potreiros.

### Seção III

Em toda a área da seção III, a cobertura vegetal já não é tão densa e homogênea, como a verificada na seção anterior. O uso da terra torna-se mais diversificado e intenso. Existem mais áreas agrícolas e de pecuária, muitas delas localizadas onde outras formas de uso do solo seriam mais apropriadas.

A vegetação marginal também não tem uma característica tão uniforme como nas duas seções anteriores. O que se pode observar nas margens é uma vegetação florestal, nem sempre característica da região (com espécies introduzidas e ruderais), muito variável em sua estrutura, tanto horizontal como vertical. A vegetação ocorre em pequenas manchas, por vezes densas, como a encontrada na seção II, por vezes composta por poucos indivíduos e com apenas alguns metros de extensão e largura. Muitos trechos das margens e da área da bacia não possuem cobertura vegetal alguma.

É na seção III que, à medida que se acompanha o leito do Guarda-Mor no sentido de sua foz, surgem os problemas de erosão, tanto no curso dos riachos maiores com margens íngremes e altas como nas pequenas ravinas intermitentes ou efêmeras contribuintes e ao longo das estradas e cabeceiras das pontes. Os problemas são mais frequentes e de maiores dimensões em áreas de cultivo agrícola e/ou atividade pecuária.

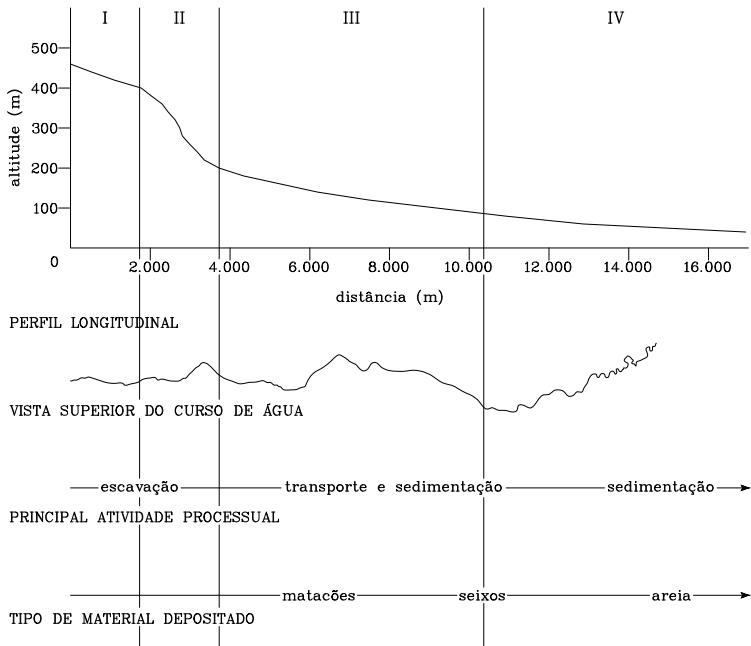
Os cursos de água que ganharam volume e força ao descer os contrafortes da Serra Geral encontram agora um leito formado por material mais facilmente erodível e transportável. A vegetação, quando existente, não possui a densidade, a distribuição ou suas plantas não apresentam as características

biotécnicas adequadas e suficientes para estabilizar o trajeto descrito pelos cursos de água.

O material erodido em diferentes pontos da bacia e nas próprias margens dos afluentes, cedo ou tarde, alcança o leito do Arroio Guarda-Mor. Os materiais mais finos, como argila e areia, dificilmente causam assoreamentos nessa seção, pois a velocidade da água, ainda muito alta e superior à velocidade limite de transporte para esses materiais, faz com que possam ser levados mais à frente. Entretanto, já é possível observar a deposição de entulhos sobrenadantes, como troncos e galhos, que se prendem à vegetação marginal ou às ilhotas, como também de grandes pedras e seixos que, por serem materiais mais pesados têm sua velocidade limite de transporte alcançada. Ao se depositar nas ravinas menores, o material impede, de forma bastante eficaz, a passagem da água e torna possível o acúmulo de mais detrito, até mesmo os de menor velocidade limite de transporte que, normalmente, não seriam depositados nesses pontos. No Guarda-Mor e nos seus contribuintes maiores, é frequente a formação de ilhas efêmeras. Quando isso acontece, as pequenas ravinas muitas vezes forciam passagem pelas laterais, aumentando a erosão marginal e carreando ainda mais material.

Muitas ilhas da seção III, por possuírem uma grande quantidade de material pesado, que não pode ser removido por um comportamento torrencial normal, possibilitam o desenvolvimento de vegetação, que as consolida. Verificou-se a ocorrência de um grande número de espécies de gramíneas que conseguem se desenvolver e, até mesmo, de espécies arbustivas e arbóreas, como os sarandis e amarilhos (*Phyllanthus sellowianus*, *Sebastiania schottiana* e *Terminalia australis*) e o salso (*Salyx humboldtiana*). O fato de essas espécies se desenvolverem em locais de condições extremas, como entre troncos e pedras, reforça a hipótese de que são plantas com características biotécnicas, próprias para os tratamentos vegetativos, necessários em alguns locais. Cabe destacar que, somente nessa seção, tais espécies passam a ocorrer com maior frequência. Além dessas espécies, *Calliandra brevipes* passa a ser mais frequente na transição entre a seção II e III, porém sua ocorrência diminui na direção de jusante.

Ao observar os locais e o tipo de material que se deposita ao longo do perfil longitudinal dos cursos de água, nota-se claramente que essa deposição se dá conforme a velocidade limite de transporte. Primeiro, depositam-se os materiais mais pesados, que formam as ilhas vegetadas características da seção III da bacia e, em seguida, os materiais menores, formando também ilhas instáveis de seixos. Somente na seção IV depositam-se os materiais mais leves, ainda mais instáveis, formando ilhas de areia e de outras partículas finas (Figura 8.9).



170

**Figura 8.9** – Processos fluviais ao longo do perfil longitudinal do Arroio Guarda-Mor

As ilhas da seção III, em especial quando consolidadas pelo desenvolvimento da vegetação, acabam por modificar o comportamento normal do leito, direcionando, muitas vezes, a força da água contra suas próprias margens. Mesmo que a vegetação nesses locais seja adequada do ponto de vista biotécnico, a força com que a água passa a atingir as margens torna a corrosão inevitável.

#### Seção IV

Nessa seção, os cursos de água da bacia do Guarda-Mor passam a descrever meandros por uma planície composta por material aluvial facilmente erodível. Na área dessa última seção, as declividades são mínimas, o que é muito próprio para a oricultura, intensamente praticada. Os cursos de água assumem um típico comportamento torrencial de planície.

Além da baixa declividade, o que distingue a seção IV da anterior é o curso meandríco que o Arroio Guarda-Mor passa a descrever. Esse comportamento torna possível a sedimentação de material de menor granulometria.

Na seção IV, quase não se encontram formações florestais densas. À margem dos cursos de água, onde as lavouras e os potreiros não chegam até os taludes, são encontradas apenas capoeiras, com grau de fechamento e estrutura variável, por vezes substituída pela presença de taquarais implantados (*Bam-*

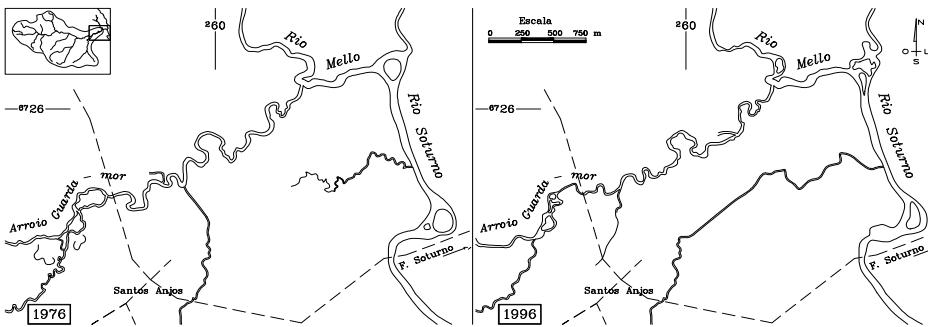
*busa tuldoides* Munro). A ocorrência de espécies réofílicas como *Phyllanthus sellowianus* e *Sebastiania schottiana* se torna mais marcante sobre os típicos e frequentes bancos de areia, ao passo que *Calliandra brevipes* está ausente.

Considerando que os materiais mais pesados, arrastados pela força das torrentes, encontraram sua velocidade limite de transporte na seção anterior, é nessa seção de baixa declividade que a areia e outras partículas finas em suspensão conseguem se depositar. Ao depositar o material que é carreado das outras seções da bacia, as águas do Guarda-Mor e de seus afluentes adquirem novamente capacidade de erosão e de transporte. Isso resulta na escavação de material do raio externo de suas curvas e na sua deposição no raio interno das curvas seguintes, obedecendo ao padrão de comportamento típico de uma torrente de planície.

As gramíneas e capoeiras, quando ocorrem, não garantem a proteção das margens, pois não possuem as características biotécnicas necessárias. Por esse motivo, a maioria dos problemas resultantes dos processos fluviais de escavação, transporte e sedimentação concentra-se nesse trecho sinuoso do Arroio Guarda-Mor. Tais processos, que já vinham ocorrendo na seção III, intensificam-se e passam a representar também problemas econômicos, conforme o relato dos proprietários de áreas marginais. A dinâmica de corrosão no raio externo e de deposição no raio interno das curvas causa perda de áreas agricultáveis tanto nos pontos de corrosão quanto onde o material é depositado. O intenso transporte de material redesenha constantemente o arroio, trazendo problemas de divisa em áreas que o têm como limite de propriedade. Também deste fato advém o interesse dos proprietários por uma solução para tais problemas.

A dinâmica fluvial é tão intensa, que causou mudanças importantes na rede de drenagem do Arroio Guarda-Mor. Ao comparar a rede de drenagem, em especial da região meandrífica, mostrada nas Cartas do Exército (BRASIL, 1976b), com uma representação produzida a partir de aerofotogramas (BRASIL, 1996), revelam-se grandes modificações relacionadas aos processos fluviais nos últimos vinte anos (Figura 8.10): algumas curvas foram intensificadas e outras suprimidas. As diferenças podem ter tanto causas naturais como antrópicas, em menor ou maior grau. A influência das atividades humanas praticadas na área pode ser indireta, ou totalmente proposital, como a recanalização de um pequeno curso de água que, em 1976, afluía a cerca de 1.200 m da foz do Arroio Guarda-Mor e que agora foi unido a um pequeno veio de água intermitente, passando a afluir diretamente ao Rio Soturno (Figura 8.10). O pequeno curso, antes sinuoso e contribuinte do Arroio Guarda-Mor, ganhou mais 1 km para alcançar diretamente o Rio Soturno, com traçado refeito de forma quase retilínea. Com isso, essa pequena torrente pode

adquirir maior velocidade de escoamento, não encontrando, no solo arenoso e na frágil proteção dada pelas taquaras (*Bambusa tuloides*), empecilho para cavar um profundo canal. Com uma profundidade acentuada, desproporcional à sua largura e volume de água, as margens tornaram-se ainda mais suscetíveis à corrosão e ao desbarrancamento.



172

**Figura 8.10** – Mudanças ocorridas no canal do Arroio Guarda-Mor entre 1976 e 1996

A revegetação das margens com taquaras de grande porte aéreo é comum nas tentativas de estabilização de canais, sendo usualmente empregada pelos agricultores da região. A utilização de taquaras de grande porte, porém, cumpre apenas em parte seu propósito, conferindo somente estabilidade momentânea às margens dos cursos de água. Com o passar do tempo, as touceiras desenvolvem uma característica estética não muito interessante, além de altura e volume aéreo exagerados em comparação ao seu sistema radical, pouco profundo e frágil. Com a ação do vento, as touceiras funcionam como verdadeiras alavancas, facilitando a erosão das margens e causando obstrução dos cursos de água, ao tombarem para seu interior. O entulho formado direciona a força da água contra as margens, o que normalmente resulta em novos pontos de desconfinamento e deslizamento.

Foram observados plantios com taquaras de menor porte (*Phyllostachys aurea* A. & C. Riv.), como alternativa de estabilização. Apesar de ser eficaz na contenção dos barrancos, não ser suscetível ao tombamento e se multiplicar facilmente por divisão de touceira, essa espécie apresenta algumas características indesejáveis: quando os rizomas ultrapassam os limites da área em que foi plantada, a espécie mostra-se inconveniente, invadindo áreas de agricultura, e seu controle torna-se difícil. O uso de dessecantes é pouco eficiente e o controle só é atingido com aração e recolhimento dos rizomas.

O uso de capim-elefante (*Pennisetum purpureum* Schum.) pelos moradores locais também não trouxe bons resultados, principalmente pela falta de manutenção (roçada de renovação) e ou replantio.

As ações praticadas na seção IV que, por vezes, objetivam a estabilização do curso e, em outros momentos, sua mudança completa, advêm de interesses como:

1. Controle sobre os processos fluviais, que tornam improdutivas tanto as áreas de erosão como as de deposição;
2. Consolidação de divisas de propriedades, que são marcadas pelos próprios cursos de água;
3. Manutenção das reservas de água, especialmente importantes para a oricultura irrigada, intensamente praticada na região;
4. Redistribution da água para o uso nas lavouras de arroz.

Os problemas vistos nos cursos de água da bacia do Guarda-Mor, principalmente nas seções III e IV, e as tentativas, por parte dos agricultores, de solucioná-los deixam clara a importância da busca de uma análise mais aprofundada de métodos para a estabilização dos taludes fluviais.

173

## 8.4 – Obras de Engenharia Natural no Arroio Guarda-Mor

Em um sentido prático e com base nos preceitos da Engenharia Natural e nas características do Arroio Guarda-Mor anteriormente descritas, foram testados, experimentalmente, dois métodos concretos e objetivos para a estabilização de taludes fluviais: a) parede vegetada de madeira (Parede Krainer) e b) esteira viva. Para tanto, foram selecionados trechos com problemas evidentes e característicos e onde as intervenções, além de se justificarem econômica e tecnicamente, pudessem ser executadas (construídas) com material local e anuência dos proprietários (Figura 8.11).

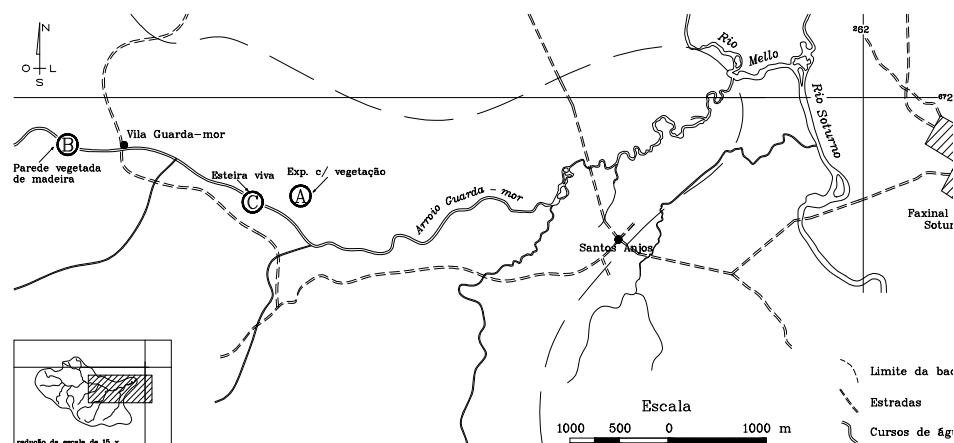


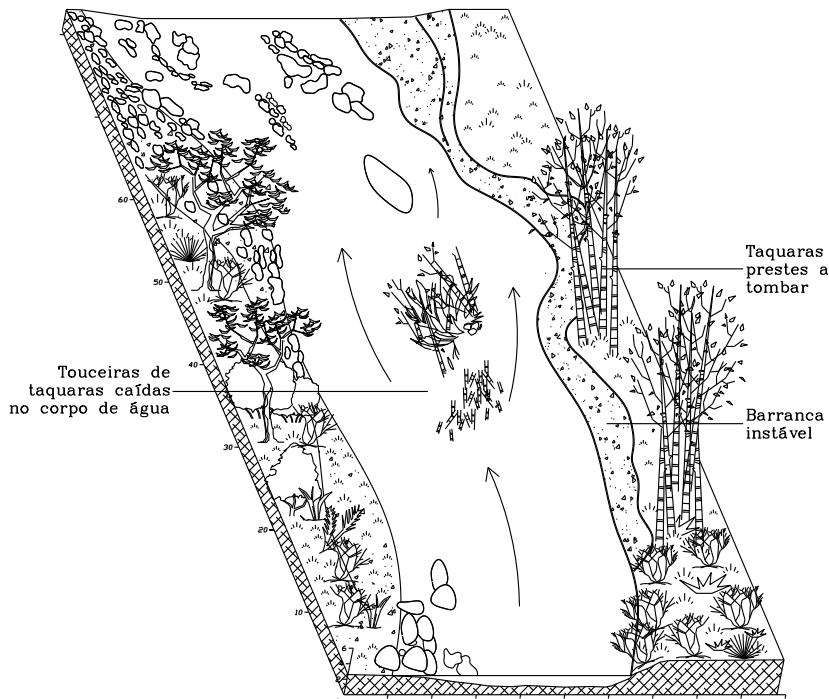
Figura 8.11 – Localização dos experimentos (A, B, C) no Arroio Guarda-Mor

Essas obras possuem caráter experimental e demonstrativo e consistem em uma ação localizada que tem em vista apenas recuperar pequenos trechos, sem a pretensão de ser solução definitiva, nesse caso, para os problemas do Arroio Guarda-Mor. Por isso, o objetivo desse trabalho foi implantar e verificar a exequibilidade de duas técnicas já descritas na literatura, porém aproveitando-se o material vegetal e construtivo do local. Objetivou-se também estimar os custos de implementação e verificar a eficiência de cada uma na solução dos problemas.

#### 8.4.1 – Parede vegetada de madeira (Parede Krainer)

##### 8.4.1.1 – Apresentação do problema

O ponto escolhido para a construção da parede vegetada de madeira compreende um trecho suavemente curvo, com seu raio externo formado por um talude instável (Figura 8.12). O solo, de origem flúvica, forma um talude estratificado, mas predominantemente franco-arenoso, com 4 m de altura, em média, estendendo-se por 40 m ao longo da margem direita do Arroio Guarda-Mor.



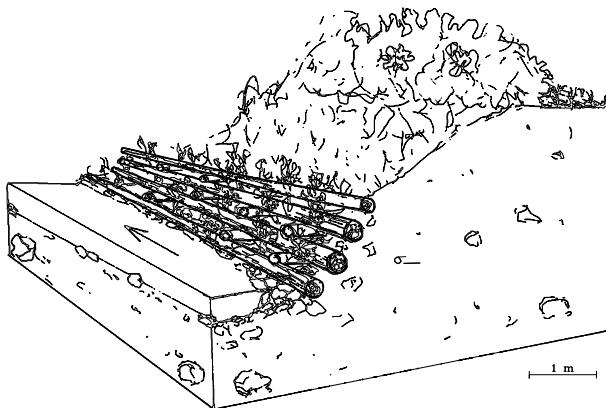
**Figura 8.12** – Aspecto do trecho em estudo, antes do tratamento da margem direita

A instabilidade desse trecho resulta da ação da água e, provavelmente, das touceiras de taquaras (*Bambusa tuldaoides*) plantadas sobre o talude. Seu peso causou uma sobrecarga no talude, e o grande volume da parte aérea propiciou que a força do vento fosse transmitida à barranca, alavancando-a e enfraquecendo-a. Essa força não conseguiu ser contraposta pelo sistema radicial das plantas, relativamente raso. O talude é claramente mais alto do que a profundidade média das raízes, e a linha de ruptura se formou distante da ação das raízes. Nessa situação, as taquaras só contribuíram para a perda de equilíbrio do talude.

Além disso, as touceiras de taquara, após o deslizamento, acabaram por obstruir parcialmente o curso de água, diminuindo sua velocidade e forçando o depósito de materiais, de modo a alterar a geometria do canal e do leito. Por esse efeito e pelo próprio anteparo físico criado pelas touceiras de taquara, a força da água foi direcionada contra a margem externa, criando um processo contínuo de corrosão, deslizamento/desmoronamento. Assim, o barranco, em sua extensão total, tornou-se completamente instável (Figura 8.12).

#### 8.4.1.2 – Proposta geral

O trabalho proposto compreende a construção da Parede-Krainer e dois tipos de ações, complementares e indissociáveis – uma intervenção física e um tratamento vegetativo –, a fim de produzir na margem direita um efeito similar ao da figura 8.13.



**Figura 8.13** – Efeito esperado após remodelagem, construção da Parede-Krainer e revegetação da margem

1 – A intervenção física visa produzir as modificações mínimas necessárias no leito do curso de água, remodelando sua caixa, margem e barranca, com

o objetivo de proporcionar condições mais estáveis e modificar a distribuição da velocidade da água, seguindo as propostas de Animoto (1978), FISRWG (1998) e Sutili, Durlo e Bressan (2004). A operação consiste na retirada do material sedimentar e das touceiras de taquara que obstruem o centro do canal, bem como na confecção de um gradiente adequado para a margem erodida. Com a retirada do material sedimentado e a reconstrução do talude, a vazão é facilitada e redirecionada, a fim de que seja menos agressiva às margens. Essa remodelagem é apoiada pela construção de um anteparo de pedras e madeira junto ao nível normal da água, com vistas a ancorar o pé do talude, proporcionando maior estabilidade e proteção, de modo que a margem possa receber o tratamento vegetativo.

2 – O tratamento vegetativo, na construção da Parede Krainer, de acordo com os preceitos da Engenharia Natural, foi feito concomitantemente com os ajustes físicos. Assim, o desenvolvimento da vegetação é apoiado, inicialmente, pela proteção física, até o momento em que sua ação protetiva se consolide e seja suficiente para manter a estabilidade do talude, dispensando a função da primeira ação.

#### 8.4.1.3 – Detalhamento do trabalho

##### A – Obtenção dos materiais

Para a construção da Parede-Krainer, deu-se prioridade ao uso de troncos de eucaliptos, devido à sua abundância na região. Foram usados troncos com o maior comprimento possível e com diâmetro de 15 cm na ponta fina.

Após ser erguida, a estrutura de madeira foi preenchida com material retirado dos depósitos do raio interno da curva e do centro do canal, ajudando a direcionar melhor o fluxo da água.

Para a revegetação, priorizou-se o uso de estacas de *Calliandra brevipes*, muito comum nas proximidades, e de mudas de *Calliandra tweediei*, providenciadas pela Secretaria da Agricultura do município de Faxinal do Soturno. Utilizaram-se também mudas de *Cynodon plectostachyus* (K. Schum.) Pilg. – conhecido na região como capim-encrenca-de-vizinho ou capim-são-paulo. Foram confeccionadas estacas de *Terminalia australis*, *Phyllanthus sellowianus*, *Pouteria salicifolia* e *Sebastiania schottiana*. O salseiro (*Salix humboldtiana*), embora muito abundante na região e presumivelmente eficiente, não foi utilizado. Seu porte arbóreo com parte aérea bastante desenvolvida pode, caso não sejam efetuados podas periódicas, afetar negativamente a estabilidade do talude, que mede de 3 a 4 m e não pode ter sua inclinação reduzida a menos de 45°, devido à proximidade com as quadras de arroz.

## B – Execução do trabalho

O trabalho, realizado por apenas duas pessoas, teve início na segunda metade do mês de janeiro de 2003, período em que as águas do arroio se encontram, normalmente, mais baixas.

O primeiro passo foi o piloteamento vertical, para dar suporte à base da parede de troncos, seguindo-se a posição presumível em que a margem se encontrava originalmente, antes da corrosão desse trecho. Para isso, foram usados pilotos de madeira de 8 x 8 cm e com 1,5 m de comprimento (Figura 8.14). O leito formado por seixos e cascalho dificultou muito o piloteamento. A fim de facilitar o trabalho, tentou-se formar um caminho inicial com o uso de uma alavanca de ferro de 15 kg, 2 m de comprimento e 1" de diâmetro, a qual não produziu o efeito esperado. O piloteamento foi finalmente conseguido com o uso de uma marreta de ferro com 4 kg.

Após o piloteamento, iniciou-se a colocação da primeira linha de troncos (Figura 8.14).

177

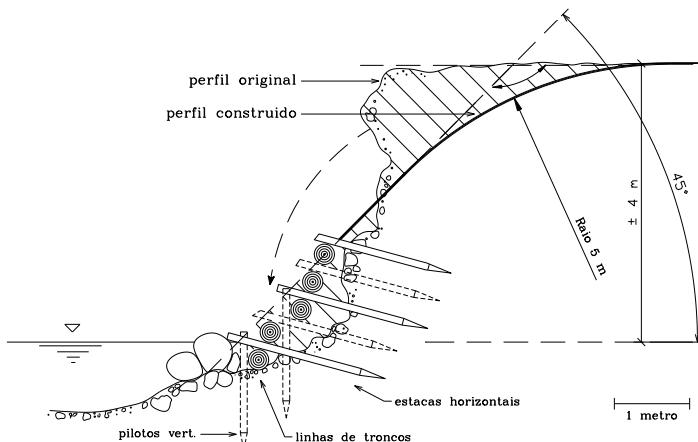


Figura 8.14 – Vista da margem em corte transversal

Os troncos usados para formar a primeira linha ao longo da margem possuíam diâmetro médio de 20 cm e um comprimento variando de 5 a 11 m e foram trazidos até próximo à margem, por meio de uma carreta agrícola e de um trator. Cada tronco foi trazido manualmente até a margem e baixado até sua posição com a ajuda de uma corda.

O uso de madeira seca facilitou o transporte e o manuseio dos troncos, embora o uso de madeira verde para a confecção da primeira linha, que fica permanentemente submersa, seja mais conveniente por aumentar a durabilidade da obra. Como previsto, a implantação da primeira linha mostrou-se a mais

difícil, devido à falta de experiência e à particularidade de que, para a sua acomodação, a madeira seca deve ser submersa e amarrada aos pilotos embaixo da água. Esse passo poderia ter sido facilitado com o uso de madeira verde. À medida que os troncos foram acomodados, houve a necessidade de ajustá-los às irregularidades do fundo do leito, o que foi conseguido pelo uso de grandes pedras, colocadas abaixo e à frente dos troncos.

As estacas horizontais (Figura 8.14) foram fixadas na margem com o auxílio de marretas de 4 e 6 kg. O uso de um bate-estaca de madeira poderia ter sido mais conveniente, pelo fato de evitar danos à “cabeça” das estacas e dos pilotos.

Para firmar as peças entre si e para que a estrutura trabalhasse em conjunto, foram feitos pequenos encaixes nas peças, que foram posteriormente amarradas com arame de aço galvanizado de 6 mm de diâmetro. O uso de alicates ou torques comuns não foi eficiente. Utilizando-se um alicate de alambrador, conseguiu-se produzir amarras seguras e com maior facilidade.

As linhas seguintes foram sendo dispostas até uma altura de aproximadamente 1 m, com uma pequena inclinação de 1:5 (H:V), para proporcionar maior estabilidade à construção. Após a colocação da segunda linha, foi realizado um novo piloteamento vertical, criando, assim, um pequeno degrau. Seguiu-se com mais duas linhas completas e uma quinta linha, que só alcançou a metade da extensão da margem tratada.

No momento da construção, as pedras de maiores dimensões foram colocadas rente à estrutura de madeira, para lhe dar mais estabilidade. Isso foi conseguido pelo uso de uma retroescavadeira e pelo arraste e acomodação manual das pedras mais próximas. Também com o auxílio da máquina, foram retirados os materiais sedimentados da margem oposta, que foram utilizados para o preenchimento da estrutura de madeira.

A porção da margem que ficou acima da parede de troncos foi remodelada (chanfrada) até o estabelecimento de uma inclinação variando de 50 a 55° (Figura 8.14, ângulo  $\beta$ ).

Para o coroamento, que corresponde a um arredondamento da parte superior da nova margem, foi adotado um raio superior a 4 m. Da mesma forma que o chanframento, o coroamento pretende minimizar o potencial físico de erosão, típico desse local, pela atenuação do ângulo vivo formado entre a linha do chanframento e o nível do terreno (Figura 8.14, ângulo  $\alpha$ ).

À medida que a estrutura de madeira foi erguida, foram dispostas estacas de *Calliandra brevipes* nos vãos das linhas de troncos, presas com arame. A revegetação entre os espaços da estrutura de madeira teve que ser repetida posteriormente, com estacas e feixes vivos de *Phyllanthus sellowianus*, *Pouteria salicifolia* e *Sebastiania schottiana*.

Na parte superior do talude, imediatamente após o chanframento, procurou-se cobrir a área com o plantio de mudas de *Cynodon plectostachyus* e *Calliandra tweediei*. O uso de uma gramínea – *Cynodon plectostachyus* – teve o objetivo de conferir uma relativa proteção à área no tempo de implantação e até o desenvolvimento de *C. tweediei*, que é mais lento.

Foi também importante deixar crescer toda e qualquer vegetação que surgia naturalmente. Entretanto, para que as espécies plantadas não venham a morrer devido à concorrência com a eventual vegetação emergente e menos adequada, e para que seu volume aéreo não se torne prejudicial às condições do local, poderá ser necessária a realização de tratos culturais que garantam essas características.

#### 8.4.1.4 – Resultados

A estrutura de madeira foi construída no final do mês de janeiro de 2003, num total de seis dias de trabalho. Foram gastos inicialmente dois dias no transporte de materiais e ferramentas ao local. A limpeza do leito e a remodelagem do talude exigiram duas horas de trabalho de uma retroescavadeira. A nova margem foi revegetada em apenas um dia.

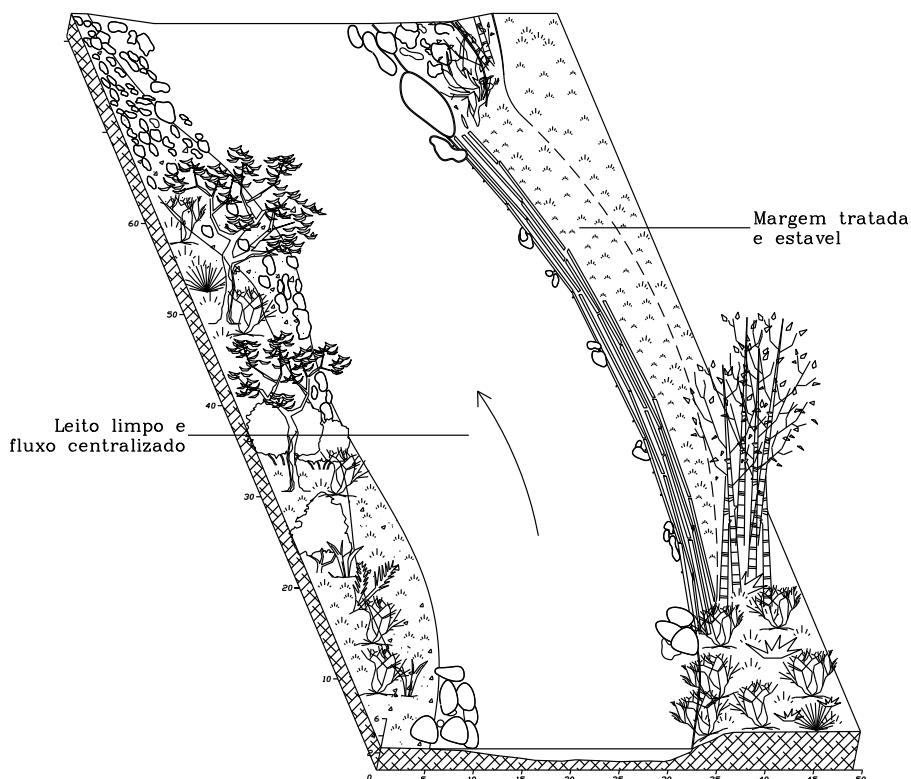
Na primeira tentativa de revegetação da margem, realizada no momento da remodelagem do talude, utilizaram-se estacas de *Calliandra brevipes* entre a estrutura de madeira e acima desta (parte superior do talude), mudas de *Calliandra tweediei* e *Cynodon plectostachyus*. Essa última intervenção foi bem-sucedida, ao passo que a primeira foi completamente frustrada. Os ramos e estacas de *Calliandra brevipes* não se adaptaram a essa porção próxima ao nível da água e apodreceram antes de brotar. Assim, entre a estrutura de madeira, foram tentados novos plantios, utilizando-se, agora, estacas e feixes vivos de *Phyllanthus sellowianus*, *Pouteria salicifolia* e *Sebastiania schottiana*. A dúvida quanto à melhor época para a revegetação levou à realização de três plantios: um em março, outro em maio e o último em setembro, os quais produziram bons resultados quanto à brotação e ao enraizamento.

Para maior garantia de sucesso, é importante que, entre os vãos da estrutura de madeira, a revegetação com feixes vivos seja feita no momento da construção, visto que estes impedem a retirada de solo dos espaços entre a estrutura de madeira. A tentativa posterior de plantar e reimplantar os feixes tende a reduzir sua possibilidade de brotação. O plantio inicial, feito com estacas e ramos, mostrou-se pouco interessante devido à mortalidade e à facilidade com que elas puderam ser levadas pela força da água.

O desenvolvimento da vegetação foi modesto nos meses seguintes à sua implantação (período que coincidiu principalmente com o inverno).

No entanto, notou-se um crescimento vigoroso no mês de outubro, como resultado do início do novo período vegetativo. As estacas mostraram-se com brotações e enraizadas, permitindo inferir que o seu desenvolvimento foi suficiente, pelo menos para garantir que não fossem arrancadas pela força da água. Passado apenas o primeiro período vegetativo, as plantas foram capazes não só de manter-se no local, como também de proporcionar algum efeito de proteção ao talude. Na figura 8.15, pode-se observar o aspecto do trecho após a intervenção.

180

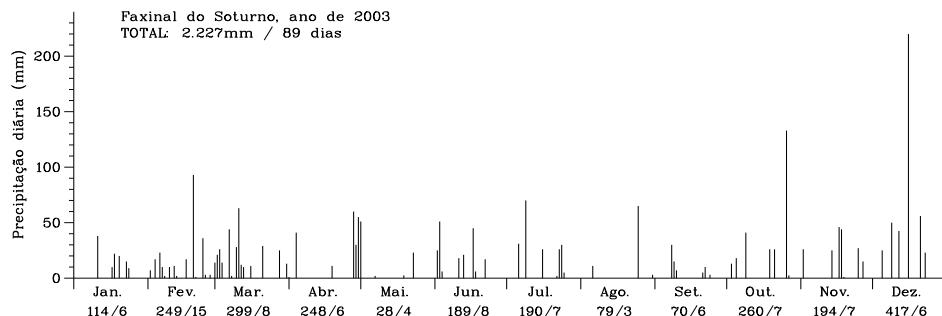


**Figura 8.15** – Aspecto atual do trecho tratado do Arroio Guarda-Mor

A estrutura de madeira resistiu às chuvas e ao comportamento torrencial do Arroio Guarda-Mor.

Desde sua implantada a obra passou por vários eventos de chuvas intensas. Precipitações de mais de 100 mm em menos de 48 horas foram comuns. Chamam a atenção as precipitações que ocorreram entre os dias 27 e 30 de abril, que somaram mais de 200 mm e a ocorrida em 25 de outubro com 133 mm. Outro evento foi a precipitação de 220 mm em menos de 12 horas no dia 15 de dezembro (Figura 8.16). Todos esses eventos tiveram efei-

to no Arroio Guarda-Mor e no local tratado, mas foi somente com o pico de precipitação em dezembro, já antecedido por um período chuvoso, que ocorreram pequenos danos à obra.



**Figura 8.16** – Precipitação diária no município de Faxinal do Soturno, abaixo de cada mês está a precipitação mensal e os respectivos dias de chuva

181

**Fonte:** dados da Secretaria Municipal da Agricultura (DOTTO, 2003).

Esse último evento foi considerado catastrófico para a região. Tal fato levou alguns municípios a decretarem estado de emergência devido aos estragos causados pelas chuvas. O mês de dezembro somou 417 mm em apenas seis dias de chuva. Segundo dados da Secretaria Municipal da Agricultura de Faxinal do Soturno, nos últimos vinte anos, já haviam sido registradas precipitações mensais superiores a 450 mm. Tais eventos são, contudo, extraordinários, normalmente decorrentes dos anos de El Niño, como os de 1997 e 2002.

Mesmo assim, os danos sobre a obra não se mostraram graves. Dos 40 m de margem tratada, somente em um trecho de 4 m, o solo de trás da estrutura de madeira foi removido. Nesse trecho, também as estacas menos enraizadas foram levadas pela força da água. Esses danos poderiam ter sido evitados se fossem implantados feixes-vivos no momento da construção da estrutura de madeira e colocadas mais duas linhas de troncos, o que protegeria a margem, mesmo por ocasião das maiores precipitações.

A observação do comportamento da estrutura física e da estabilidade do talude, mesmo com tão pouco tempo de implantação, constitui um importante aprendizado, que certamente servirá de base para futuras obras dessa natureza.

### Custos da obra

A tabela 8.3 detalha os custos com os materiais construtivos e vegetativos e os serviços utilizados no trabalho.

**Tabela 8.2** – Custos da obra (Parede Krainer)

<b>Descrição</b>	<b>Unidade</b>	<b>Quant.</b>	<b>Preço (R\$)</b>	<b>Total (R\$)</b>
<b>Material Construtivo</b>				
Pilotos de eucalipto (8 x 8 x 150 cm)	peça	27	3,90	105,30
Estacas roliças (8 cm x 2 m)	peça	60	2,40	144,00
Troncos de eucalipto, c/ transporte	metro lin.	170	1,20	204,00
Arame de 6 mm	kg	10	4,50	45,00
Arame de 3 mm	kg	1	5,00	5,00
Grampos de cerca	kg	0,5	1,70	0,85
			<b>Total</b>	<b>504,15</b>
<b>Material de Consumo</b>				
Combustível (p/ motosserra)	litro	2	2,32	4,64
Óleo 2 t	litro	0,2	6,00	1,20
Óleo lubrificante p/ correia	litro	0,4	5,00	2,00
			<b>Total</b>	<b>7,84</b>
<b>Material Vegetal</b>				
Mudas de espécies nativas	unidade	400	0,50	200,00
Estacas e feixes vivos (serviço de coleta)	pessoa/dia	1	15,00	15,00
			<b>Total</b>	<b>215,00</b>
<b>Serviços</b>				
Dias de serviço	pessoa/dia	12	15,00	180,00
Retroescavadeira	hora	3	55,00	165,00
			<b>Total</b>	<b>345,00</b>
<b>TOTAL GERAL</b> → <b>1.071,99</b>				

\* Referências: U\$ 1,00 = R\$ 2,90; salário-mínimo R\$ 260,00.

Muitos desses materiais podem ser adquiridos diretamente na região, com baixo custo ou mesmo sem custo. Os troncos de eucalipto são facilmente obtidos nas propriedades rurais, e as mudas podem ser conseguidas nas prefeituras ou através dos inúmeros programas de distribuição. Os serviços de máquina (retroescavadeira) são gratuitos até certo limite de horas para cada agricultor. No entanto, na tabela 8.2, todos os materiais tiveram seu possível custo considerado. Com relação ao material de propagação vegetativa, foram considerados os custos de serviço para a sua coleta e preparo, pois não são comercializados.

Considerando todos os gastos com materiais e serviços o custo por metro tratado foi de R\$ 26,80. No entanto, considerando-se que as mudas podem

ser adquiridas de forma gratuita, que as horas/máquina podem não representar custos para o agricultor, que a madeira seja proveniente de sua propriedade e que a mão de obra empregada seja familiar, o desembolso se torna bem menor, podendo ficar em torno de R\$ 10,00 por metro de margem tratada.

#### 8.4.1.5 – Conclusões

Mesmo que ainda não seja possível apresentar conclusões quanto ao sucesso definitivo dessa intervenção, devido ao pouco tempo de observação, a biotécnica aqui apresentada mostrou-se exequível com o material construtivo e a vegetação local e trouxe, inicialmente, os efeitos esperados. As eventuais falhas cometidas no trabalho proporcionaram aprendizado e, até o momento, não inviabilizaram o sucesso da intervenção. Com isso, erros futuros serão evitados e obras poderão ser executadas de forma mais rápida, mais segura e a um custo menor.

A parede vegetada de madeira mostra-se, até o momento, capaz de resolver problemas com grau de dificuldade razoável, mantendo o talude estável em um ângulo bastante alto e suportando eventos torrenciais de proporções catastróficas.

Com um custo de R\$ 26,80 por metro de margem tratada, a obra justifica-se somente em situações nas quais o investimento possa significar um retorno compatível. No entanto, o desembolso efetivo de um agricultor (proprietário) pode ser bem menor, na medida em que os materiais construtivos sejam encontrados em sua propriedade e o trabalho seja feito pelo próprio interessado.

O uso de estacas e ramos de *Calliandra brevipes* entre a estrutura de madeira e próximo ao nível da água não foi eficiente. No entanto, as mudas de *Calliandra tweediei*, utilizadas para revegetar a parte superior do talude, continuam se desenvolvendo. As mudas de *Cynodon plectostachyus* também produziram o efeito esperado, recobrindo total e rapidamente (três meses) os 160 m<sup>2</sup> de área da parte superior do talude. O desenvolvimento das estacas e feixes de *Pouteria salicifolia*, *Sebastiania schottiana* e, principalmente, *Phyllanthus sellowianus* parece bastante promissor. As estacas de *Terminalia australis* não demonstram o mesmo desenvolvimento, embora não seja possível concluir quanto à sua eficiência, dada a pequena utilização de material dessa espécie.

Com o passar do tempo, tem-se a perspectiva de que a vegetação se desenvolva vigorosamente e, com o passar de um ou dois períodos vegetativos, seja capaz de conferir maior proteção e estabilização à nova margem.

## 8.4.2 – Esteira viva

### 8.4.2.1 – Apresentação do problema

Na região dessa intervenção, é bastante comum a concretagem do leito dos cursos de água para a passagem de veículos, em substituição às pontes tradicionais. Essas obras, conhecidas como “barragens”, têm como objetivo criar um pequeno barramento, a fim de que, com nível normal da água, pessoas e carros consigam passar com uma pequena lâmina de água.

Dando acesso a uma propriedade rural, existe uma obra com essas características. Devido à instabilidade das margens, ela já foi destruída, diversas vezes, pela força torrencial do Arroio Guarda-Mor. Mesmo quando a “barragem” não é levada pela força da água, é necessário que as margens e o leito sejam readequados, para evitar danos no futuro.

184

Toda a área em torno da referida barragem é instável, sendo que, nos 20 a 30 m que a antecedem, na sua margem direita, encontra-se o ponto mais suscetível. Nesse local, forma-se um pequeno remanso, onde o arroio normalmente não desenvolve nenhum tipo de erosão e, até mesmo, deposita material no local. No entanto, com um evento torrencial, a força da água atua diretamente contra a margem, abrindo sulcos em sua direção.

Mais grave ainda é a existência de uma valeta que contribui ao arroio com as águas captadas da estrada e da lavoura de arroz. Quando o Guarda-Mor supera o nível de base da valeta, inverte-se o fluxo. Estando a valeta contra o sentido das águas do arroio, os estragos são inevitáveis, comprometendo o encaixe da barragem e criando a oportunidade para que a força da água cave e desenterre a barragem.

Tais observações são suficientes para justificar uma intervenção, com vistas a estabilizar o local. Como dito, esse trecho foi alterado e reconstruído por diversas vezes e o canal foi desobstruído para centralizar o fluxo, porém nenhuma ação foi destinada a proteger fisicamente a margem, muito menos com o uso de vegetação.

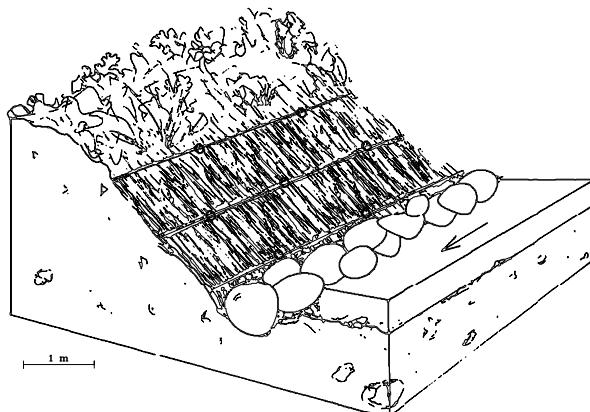
### 8.4.2.2 – Proposta geral

De maneira semelhante à obra anterior, serão combinadas medidas vegetativas com algumas intervenções puramente mecânicas. No local, podem ser realizadas várias intervenções para garantir a estabilidade geral do trecho. Sugere-se que, se a “barragem” tiver de ser reconstruída, os seus encaixes (principalmente o da margem direita) devem ser reforçados com a construção de paredes duplas de madeira, fortemente revegetadas com feixes vivos e estacas.

Além disso, precisa-se modificar a valeta, fazendo com que ela contribua no mesmo sentido do curso de água. Assim, quando as águas do Guarda-Mor ultrapassarem o nível de base da valeta, não serão capazes de causar danos graves, criando apenas um refluxo.

Nesse caso, é importante uma intervenção para consolidar a margem direita, em uma extensão de 20 m, antecedendo a barragem. O talude pode ter uma inclinação menor (2:1), o que justifica a escolha da implantação de uma esteira viva.

Sugere-se que o talude seja remodelado e que a esteira de ramos seja disposta contra a nova margem e presa com pedras na base e arame em seu terço inferior e superior para, só então, receber uma pequena camada de solo, produzindo um efeito semelhante ao mostrado na figura 8.17.



185

Figura 8.17 – Efeito esperado na margem após a implantação da esteira viva

O uso de grande quantidade de material vegetal e sua disposição especial sobre o terreno proporcionam um efeito mecânico de proteção, imediatamente após sua implantação, que vai paulatinamente sendo reforçado pelo crescimento da vegetação. Essa biotécnica pode ser considerada como uma das mais promissoras em situações semelhantes.

#### 8.4.2.3 – Detalhamento do trabalho

##### A – Obtenção dos materiais

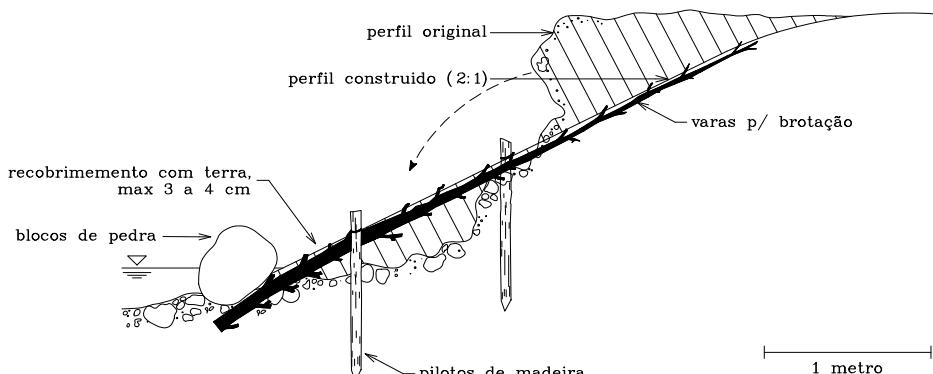
As pedras necessárias para proteger o pé do talude foram conseguidas no próprio leito. Os pilotos (4 x 4 cm de seção transversal e 130 cm de comprimento) usados para fixar a vegetação foram preparados com madeira de eucalipto.

A literatura recomenda que esses tratamentos sejam realizados utilizando-se somente uma espécie ou uma combinação conveniente e já conhecida

de algumas espécies. Nesse experimento, foram usadas várias espécies que estavam disponíveis, com o objetivo de observar seus respectivos comportamentos. Utilizaram-se ramos de *Pouteria salicifolia*, *Sebastiania schottiana*, *Salix humboldtiana*, *Salix viminalis* e *Terminalia australis*. Como já estavam disponíveis os primeiros resultados do experimento com a vegetação e devido às experiências da construção da primeira obra, não se fez uso da *Calliandra brevipes* e/ou *Calliandra tweediei*. Deu-se prioridade para o uso de *Terminalia australis*, que não foi ainda experimentada, mas que, com base na literatura, parece ser bastante promissora.

## B – Execução do trabalho

De maneira similar à obra anterior, o primeiro passo foi a remodelagem do talude, chanfrando e coroando a margem. Nesse caso, a proteção ao nível da água já é conferida pela própria forma especial de revegetação, que é apoiada por pedras em sua base. Aqui foi possível usar uma inclinação menor (2:1) e um raio de 5 m para o coroamento, conforme mostrado na figura 8.18.



**Figura 8.18** – Estrutura da esteira viva – corte transversal

O passo seguinte foi a coleta do material vegetal. Como esse material deve ser usado em grande quantidade, optou-se por coletá-lo no Rio Soturno, onde é muito abundante, a 8 km do local da obra, o que tornou necessário o transporte com um caminhão. Três pessoas, em um só dia, foram capazes de coletar, transportar e fixar o material na margem já remodelada.

Para fixar os ramos, os pilotos de madeira foram cravados a cada 2 m, formando fileiras intercaladas.

No dia seguinte, as pedras foram colocadas manualmente sobre a base dos ramos e, com uma retroescavadeira, a esteira viva foi recoberta com uma fina camada de solo.

#### 8.4.2.4 – Resultados

Apenas quinze dias após a execução da obra, observou-se uma vigorosa brotação dos ramos de *Salix humboldtiana* e *Salix viminalis*, seguidos da brotação de *Sebastiania schottiana*. *Pouteria salicifolia* deu início à brotação um mês depois, mas também de maneira vigorosa.

Surpreendente foi a pequena e tardia brotação de *Terminalia australis*. Essa espécie não havia sido testada nos experimentos anteriores, mas é comum no Arroio Guarda-Mor e muito recomendada pela literatura. Esse fato evidencia a necessidade de testá-la no futuro, a fim de verificar se os resultados realmente a desqualificam como espécie importante para a Engenharia Natural.

O efeito visual dessa intervenção, após um mês, teria sido completo se não fosse pela camada de solo que, em alguns pontos, foi colocada de forma excessiva sobre os ramos. A falha em cobrir os ramos com uma camada muito espessa é grave e, por vezes, pode comprometer o trabalho. No presente caso, o excesso de solo não prejudicou o efeito de estabilização, porém retardou o desenvolvimento inicial da vegetação.

Nesse tipo de obra, há a necessidade de utilização de grande volume de material vegetal. No entanto, com a brotação vigorosa que a vegetação vem apresentando, o proprietário terá ao seu dispor quantidade suficiente de material para prosseguir estabilizando outras áreas. As brotações resultantes da esteira viva geralmente são homogêneas e retas, proporcionando material ainda mais adequado para a construção de novas obras.

O talude, totalmente remodelado (aterrado), mostrou-se bastante friável, e um primeiro piloteamento com estacas de 3 x 2 x 80 cm não foi capaz de prender os ramos com a segurança desejada. Assim, esse trabalho foi totalmente refeito, utilizando-se estacas maiores (4 x 4 x 130 cm).

Com as fortes chuvas do dia 15 de dezembro de 2003 (Figura 8.16), a água do arroio superou o nível de base da valeta contribuinte, anteriormente descrita. A vegetação, com quase três meses de desenvolvimento, aparentemente bem enraizada no talude (como foi observado após o efeito da água), contudo, foi insuficiente para evitar que o primeiro quarto da margem tratada, que adentraava a valeta, fosse danificado pela força da água. Esse fato confirmou a previsão inicial de que esse ponto deveria ser alterado, fazendo com que a valeta contribuisse a favor do sentido do curso de água e que o encaixe direito da “barragem” fosse protegido com a construção de uma parede vegetada de madeira (dupla).

#### Custos da obra

De maneira semelhante à obra anterior, os custos dos materiais e serviços utilizados na obra foram coletados (Tabela 8.3).

**Tabela 8.3** – Custos da esteira viva

Descrição	Unidade	Quant.	Preço (R\$)	Total (R\$)
<b>Material Construtivo</b>				
Estacas (4 x 4 x 120 cm)	peça	30	2,00	60,00
Arame de 4 mm	kg	1	5,00	5,00
Grampos de cerca	kg	0,3	1,70	0,51
			Total	65,51
<b>Material Vegetal</b>				
Coleta do material (serviço)	pessoa/dia	1	15,00	15,00
			Total	15,00
<b>Serviços</b>				
Transporte	frete	1	20,00	20,00
Dias de serviço	pessoa/dia	6	15,00	90,00
Retroescavadeira	hora	2	55,00	110,00
			Total	220,00
<b>TOTAL GERAL</b>				300,51

\* Referências: U\$ 1,00 = R\$ 2,90; salário-mínimo R\$ 260,00.

Como foram tratados 20 m de margem, o custo por metro resultou em R\$ 15,03. No entanto, se forem subtraídos os gastos com retroescavadeira e se o proprietário realizar o trabalho e também o transporte do material, os custos se reduzem a menos de R\$ 7,00 por metro de margem tratada.

#### 8.4.2.5 – Conclusões

Apesar do pouco tempo de observação após a implantação da obra, tem-se a expectativa de sucesso. A continuidade das observações e a obtenção de dados (qualitativos e quantitativos) tornam-se fundamentais para melhor avaliar o comportamento da esteira viva. Os baixos custos de implantação fazem dessa biotécnica uma alternativa interessante, recomendando-se a repetição de novos experimentos práticos.

Todas as espécies, com exceção da *Terminalia australis*, enraizaram-se e recobriram totalmente o local em dois meses. *Salix viminalis* e *Salix humboldtiana* mostraram um vigor surpreendente.

Mesmo comprometida pela falta de brotação da *Terminalia australis* e pelos danos causados pelo evento torrencial de 15 de dezembro de 2003, a obra mostrou efeitos de proteção à margem.

Ficou evidente que a instabilidade da área não é consequência exclusiva do comportamento torrencial do Arroio Guarda-Mor, mas também decorre das fortes alterações antrópicas realizadas no local, que acabam agravando os problemas desse trecho.

## 8.5 – Considerações finais

O Arroio Guarda-Mor e sua área de drenagem podem ser segregados em quatro seções: seção I, II, III e IV, distinguíveis por suas características topográficas, vegetacionais e hidrográficas, bem como pela utilização atual do solo e demais ações antrópicas atuais e pregressas. Cada uma dessas seções apresenta processos fluviais peculiares e relacionados às suas características.

Os cursos de água que formam a bacia do Guarda-Mor nascem, quase que exclusivamente, na seção I, caracterizada pela maior altitude, declividade moderada e cobertura vegetal bastante diversificada. Esses cursos de água, ainda pequenos, tomam força e ganham velocidade ao descerem as altas pendentes da seção II. Esta zona caracteriza-se por ser tanto de escavação como de transporte. No entanto, ainda não são observados problemas expressivos. Esse fato deve-se, principalmente, à densa cobertura vegetal (florestal) e ao substrato basáltico (resistente), pelo qual os pequenos e velozes cursos de água descrevem o seu trajeto. A velocidade adquirida na primeira e segunda seções revela seu efeito ao atingir a seção III, que possui declividade bem menor, mas uma cobertura vegetal menos adequada e substrato frágil. Os materiais de maiores dimensões alcançam sua velocidade limite de transporte e depositam-se, gradativamente, ao longo desse trecho. Os processos de corrosão, transporte e, especialmente, sedimentação, iniciados na seção III, agravam-se e intensificam-se em direção à seção IV. Nesta última parte, o Guarda-Mor, outrora com comportamento torrencial de montanha com escavação e transporte, passa a ter um típico comportamento de planície, ocasionando inconvenientes que despertam a preocupação dos proprietários ribeirinhos e das autoridades municipais de Faxinal do Soturno.

Os principais problemas identificados nas seções III e IV referem-se à falta de estabilidade dos taludes fluviais.

Os dois modelos de estabilização experimentados – parede vegetada de madeira e esteira viva – vêm produzindo os efeitos esperados e mostram-se exequíveis com o material disponível na região. Pela busca de materiais construtivos adequados, abundantes e baratos, os custos revelaram-se compatíveis com a realidade local, sendo justificáveis na dependência da gravidade do problema e dos benefícios gerados.

Obras ou intervenções simples de Engenharia Natural são capazes de controlar os processos de erosão e de sedimentação de cursos de água. Tem-se a necessidade de novas pesquisas sobre a disponibilidade e a aplicabilidade de materiais construtivos da região e, especialmente, sobre o potencial biotécnico de outras espécies vegetais de ocorrência local.

Existem outros métodos e outros materiais que podem e devem ser experimentados. Restos culturais como, por exemplo, os providenciados pela orizicultura, abundantes na região, podem significar excelente material para alguns métodos de engenharia biotécnica.

## Bibliografia

190

- ANIMOTO, P. Y. *Erosion and sediment control handbook*. Sacramento, California: Department of Conservation, 1978.
- BRASIL. *Aerofotograma pancromático*. R-012, Fx-059A, 2564 60, 88.05mm, vôo de 17/05/1996.
- \_\_\_\_\_. Ministério do Exército, Diretoria de Serviço Geográfico. *Carta Camobi*. Região Sul do Brasil – 1:50000, Folha SH.22-V-C-IV-2, MI – 2965/2. Brasil, 1976a.
- \_\_\_\_\_. *Carta Faxinal do Soturno*. Região Sul do Brasil – 1:50000, Folha SH.22-V-C-IV-2, MI – 2966/1. Brasil, 1976b.
- CHRISTOFOLLETTI, A. *Geomorfologia fluvial*: o canal fluvial. São Paulo: Edgard Blücher, 1981.
- CUNHA, S. B. Geomorfologia fluvial. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. (Org.). *Geomorfologia*: uma atualização de bases e conceitos. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2001. p. 211-252.
- DOTTO, S. J. Índices pluviométricos no município de Faxinal do Soturno – RS: período – 1982 a 2003. Faxinal do Soturno: Prefeitura Municipal/Secretaria da Agricultura e Meio Ambiente, 2003.
- FISRWG. *Stream Corridor Restoration: principles, processes, and practices*. By the Federal Interagency Stream Restoration Working Group (FISRWG). 15º Federal agencies of the US govt, 1998.
- LEITE, P. F. *As diferentes unidades fitoecológicas da Região Sul do Brasil*: proposta de classificação. 1994. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1994.

\_\_\_\_\_. Contribuição ao conhecimento fitoecológico do sul do Brasil. *Ciência & Ambiente*, Santa Maria, n. 24, p. 51-73, jan./jun. 2002.

MARCHIORI, J. N. C. *Fitogeografia do Rio Grande do Sul: enfoque histórico e sistemas de classificação*. Porto Alegre: EST, 2002.

MORENO, J. A. *Clima do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre: Secretaria da Agricultura, 1961.

PASTORE, U.; RANGEL FILHO, A. L. R. Vegetação. As regiões fitoecológicas, sua natureza, seus recursos econômicos. Estudo fitogeográfico. In: IBGE. *Levantamento de Recursos Naturais, v. 33 - Folha Uruguaiana*. Rio de Janeiro: IBGE, 1986.

PONTELLI, M. E. *O Rebordo do Planalto na Região de Santa Maria: um estudo geomorfológico*. 1994. Monografia (Especialização em Geociências) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 1994.

191

PRODESUS. *Inventário Florestal da Região da Quarta Colônia de Imigração Italiana do Rio Grande do Sul*. Santa Maria, 1998.

SCHUMM, S. A. *River morphology*. Pennsylvania: DH&R, 1972.

SOUZA, E. B. *Fotointerpretação da rede de drenagem na diferenciação de unidades de mapeamento de solos ocorrentes na Depressão Central do Rio Grande do Sul*. 1977. Dissertação (Mestrado em Engenharia Rural) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 1977.

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

TEIXEIRA, M. B.; COURA NETO, A. B. Vegetação. As regiões fitoecológicas, sua natureza, seus recursos econômicos. Estudo fitogeográfico. In: IBGE. *Levantamento de Recursos Naturais, v. 33 - Folha Porto Alegre e Lagoa Mirim*. Rio de Janeiro: IBGE, 1986.

Fontes: Adobe Garamond Pro 12pt e Futura Md BT 15pt  
Papel Capa: SUPREMO (LD) 250g/m<sup>2</sup>  
Papel Miolo: Offset 90g/m<sup>2</sup>  
Formato: 160 x 230 mm  
Tiragem: 1.000  
Gráfica: Pallotti  
2014

**O livro, ricamente ilustrado e em linguagem acessível, esclarece os princípios, descreve técnicas e demonstra o campo de aplicação e alcance da Bioengenharia, doravante denominada Engenharia Natural.**

**São sugeridos experimentos práticos para pesquisar as características biotécnicas de plantas reófilas, visando aumentar a relação de espécies aptas para o manejo de cursos de água. A partir de um estudo de caso, são apresentados detalhes da construção de duas obras de estabilização de taludes fluviais, empregadas com frequência por este ramo da Engenharia.**

ISBN: 978-85-913475-1-3



9 788591 347513

