

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

**ANATOMIA E FLEXIBILIDADE DO CAULE DE
QUATRO ESPÉCIES LENHOSAS PARA O MANEJO
BIOTÉCNICO DE CURSOS DE ÁGUA**

TESE DE DOUTORADO

Luciano Denardi

Santa Maria, RS, Brasil

2007

**ANATOMIA E FLEXIBILIDADE DO CAULE DE QUATRO
ESPÉCIES LENHOSAS PARA O MANEJO BIOTÉCNICO DE
CURSOS DE ÁGUA**

por

Luciano Denardi

Tese apresentada ao Curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Área de Concentração Manejo Florestal, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do grau de
Doutor em Engenharia Florestal

Orientador: Prof. Dr. José Newton Cardoso Marchiori

Santa Maria, RS, Brasil

2007

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

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Tese de Doutorado

**ANATOMIA E FLEXIBILIDADE DO CAULE DE QUATRO ESPÉCIES
LENHOSAS PARA O MANEJO BIOTÉCNICO DE CURSOS DE ÁGUA**

elaborada por
Luciano Denardi

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

COMISSÃO EXAMINADORA:

José Newton Cardoso Marchiori, Dr.
(Presidente/Orientador)

Elio José Santini, Dr. (UFSM)

Solon Jonas Longhi, Dr. (UFSM)

Graciela Ines Bolzón de Muñiz, Dr^a. (UFPR)

Darci Alberto Gatto, Dr. (UFPEL)

Santa Maria, 17 de julho de 2007.

*Este trabalho é dedicado à minha esposa –
Valdirene Ladvig.*

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho só foi possível graças à colaboração direta ou indireta de muitas pessoas. Manifesto minha gratidão a todas elas e de forma particular:

- ao Prof. José Newton Cardoso Marchiori, meu orientador e amigo, que, mais uma vez, acreditou na minha capacidade e que sempre será referência em minha futura vida profissional;

- ao Prof. Miguel Antão Durlo (co-orientador), que sempre participou ativamente de todas as etapas de minha formação acadêmica e por quem eu tenho profunda admiração;

- ao Prof. Clovis Roberto Haselein (co-orientador), pelas valiosas sugestões e conselhos para o aprimoramento deste trabalho;

- aos demais Professores da UFSM, em especial: Elio José Santini, Delmar Bressan, Solon Jonas Longhi, Pedro Madruga, Paulo Renato Schneider, César Finger e Thais do Canto-Dorow de quem levo as melhores lembranças;

- à Prof^ª. Graciela Ines Bolzón de Muniz, da Universidade Federal do Paraná, pelas contribuições para este trabalho;

- à Prof^ª. Graciele Barbiere (UNOESC), pela amizade, confiança e oportunidades oferecidas;

- ao Prof. Darci Alberto Gatto (UFPEL), amigo de todas as horas;

- ao colega e amigo Fabrício Jaques Sutili (BOKU), pelas contribuições na elaboração deste trabalho;

- aos demais colegas, em especial: Romulo Trevisan, Edson Perrando, Fabiano Fortes, Leonardo Oliveira, Edson Cantareli, Dalva Pauleski, Elizete Fontana, Silviana Rosso, Diego Stangarlin, Leonardo Deble, Anabela Oliveira, Sidinei dos Santos e Izaner Durlo;

- aos funcionários e amigos da UFSM, em especial: Fabiana, Tita, Gerson, Roberto, Naira e Toco;

- à Anita Donadel e família, pela generosidade e pelo clima familiar com que fui acolhido em minhas passagens por Curitiba;

- à Teresinha Durlo Denardi, Leandro Antonio Denardi e Florinda Damian, minha família, pelo constante incentivo;

- à Universidade Federal de Santa Maria, por todas as oportunidades oferecidas e ao CNPq, pela bolsa de estudos, sem a qual seria inviável a elaboração do presente trabalho.

*“Eu trabalhei tanto e tão bem quanto pude,
e ninguém pode fazer mais do que isso.”*

Charles Darwin

RESUMO

Tese de Doutorado
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal
Universidade Federal de Santa Maria

ANATOMIA E FLEXIBILIDADE DO CAULE DE QUATRO ESPÉCIES LENHOSAS PARA O MANEJO BIOTÉCNICO DE CURSOS DE ÁGUA.

AUTOR: Luciano Denardi
ORIENTADOR: José Newton Cardoso Marchiori
Data e Local da Defesa: Santa Maria, 17 de julho de 2007.

O uso de vegetação é uma das principais ferramentas da Bioengenharia; no caso de taludes fluviais, as plantas devem possuir caules flexíveis, entre outras características. O presente trabalho teve por objetivo investigar a anatomia e a flexibilidade do caule de *Phyllanthus sellowianus* Müll. Arg. (Phyllanthaceae), *Sebastiania schottiana* (Müll. Arg.) Müll. Arg. (Euphorbiaceae), *Salix humboldtiana* Willd. (Salicaceae) e *Salix x rubens* Schrank (Salicaceae). A coleta de material foi realizada no município de Santa Maria, Rio Grande do Sul – Brasil. As amostras de madeira, para os estudos anatômicos, foram extraídas do caule de dois indivíduos, para cada espécie, e a descrição microscópica seguiu as recomendações do IAWA Committee. Para o estudo da flexibilidade utilizou-se cinquenta amostras do caule, com diferentes diâmetros, para cada espécie. Os resultados indicaram que o módulo de elasticidade não constitui parâmetro adequado para julgar a flexibilidade de caules; para tanto, criou-se um novo parâmetro: o “ângulo de flexibilidade”. *Phyllanthus sellowianus* destacou-se como a espécie mais flexível e, portanto, a mais apta para a proteção de taludes fluviais, seguida por *Sebastiania schottiana*, *Salix humboldtiana* e *Salix x rubens*. A poda, ou mesmo o corte de indivíduos adultos dessas espécies, proporciona maior proteção aos taludes fluviais pela produção de caules jovens e mais flexíveis. A descrição anatômica da madeira de *Sebastiania schottiana* e *Phyllanthus sellowianus*, até então inédita, suporta o recente desmembramento dessa última espécie das Euphorbiaceae. A grande semelhança verificada no lenho destas quatro espécies configura uma “síndrome anatômica de reofilia”: abundante fibras gelatinosas, vasos pequenos, raios estreitos e parênquima axial escasso ou ausente; destas características, a presença de fibras gelatinosas é a mais importante para a flexibilidade do caule.

Palavras-chave: Bioengenharia; espécies lenhosas; anatomia da madeira; flexibilidade do caule.

ABSTRACT

Master's Thesis
Master's Degree Program in Forest Engineering
Federal University of Santa Maria

STEM ANATOMY AND FLEXIBILITY OF FOUR WOOD SPECIES TO WATER COURSES BIOTECHNICAL MANAGEMENT

AUTHOR: Luciano Denardi
ADVISOR: José Newton Cardoso Marchiori
Place and Date of Defense: July, 17th, 2007 – Santa Maria.

The use of vegetation is a common tool in Soil Bioengineering; the plants, in this case, must have flexible stems, among other characteristics. The present work aims to investigate the wood anatomy and the stem flexibility of four species: *Phyllanthus sellowianus* Müll. Arg. (Phyllanthaceae), *Sebastiania schottiana* (Müll. Arg.) Müll. Arg., *Salix humboldtiana* Willd. (Salicaceae) and *Salix x rubens* Schrank (Salicaceae). The material was collected in the municipality of Santa Maria, Rio Grande do Sul – Brazil. The anatomical studies used samples from two individuals by species and the microscopic descriptions followed the IAWA Committee. The flexibility studies used fifty stem samples, with different diameters, for each species. The results showed that the modulus of elasticity is not a good parameter to evaluate stem flexibility; in substitution, it was created a new parameter: the “angle of flexibility”. *Phyllanthus sellowianus* showed to be the most indicated species to bioengineering works, followed by *Sebastiania schottiana*, *Salix humboldtiana* and *Salix x rubens*. The prune or even the cut of adult trunks of these species give much protection to slope stability due to the production of younger and more flexible stems. The wood anatomy of *Sebastiania schottiana* and *Phyllanthus sellowianus*, here described by the first time, also supports the recent segregation of the last species from the Euphorbiaceae. The great similarity within all studied species configures a “reophyllous anatomical syndrome”: abundant gelatinous fibres, small vessels, thin rays and absent or rare axial parenchyma; from these features, the presence of gelatinous fibres may be considered as the most important to stem flexibility.

Key words: Soil Bioengineering; woody species; wood anatomy; stem flexibility.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1 – Perfil transversal e mata ciliar de um curso de água (Schiechtl, 1980 *apud* DURLO e SUTILI, 2005)..... 17
- Figura 2 – Problemas comuns em cursos de água: A – corrosão das margens; B – touceiras de taquara caídas sobre o leito; C – depósito de seixos e pedras de grandes dimensões; D – árvores de grande porte sobre o talude (Fotos: Fabrício Jaques Sutili). 19
- Figura 3 – Tipos de obras de Bioengenharia: A, B – parede Krainer; C, D – esteira viva; E – trança viva; F – soleira (Fotos: Fabrício Jaques Sutili)..... 22
- Figura 4 – Efeitos da presença de uma árvore sobre um talude fluvial (Durlo e Sutili, 2005. p. 74). 23
- Figura 5 – Tipos de vegetação em cursos de água, segundo Florineth (2004): A, B – vegetação flexível densa; C – vegetação não-flexível densa; D – vegetação não-flexível de plantas singulares (Fotos: Florin Florineth e Fabrício Jaques Sutili). 27
- Figura 6 – Aspecto geral e detalhe do ramo das espécies estudadas: A, B – *Phyllanthus sellowianus*; C, D – *Sebastiania schottiana*; E, F – *Salix humboldtiana*; G, H – *Salix x rubens* (Fotos: Luciano Denardi). 31
- Figura 7 – Mapa do Sul do Brasil. Destaque para o município de Santa Maria - RS, local onde foi desenvolvido o estudo. No detalhe (seta), observa-se o ponto exato do rio Vacacaí onde foram coletadas as amostras de madeira de *Phyllanthus sellowianus*, *Sebastiania schottiana* e *Salix humboldtiana*. 45
- Figura 8 – Metodologia utilizada no preparo de lâminas anatômicas de madeira: A – seleção dos indivíduos (setas); B – confecção de corpos-de-prova (B_1 = destinados às lâminas histológicas; B_2 = destinados às lâminas de macerado); C – fervura em água dos corpos-de-prova; D – seccionamento dos corpos-de-prova em micrótomo de deslize; E e F – coloração e desidratação dos cortes, respectivamente; G – diafanização e montagem de lâminas permanentes; H – equipamento usado para a obtenção de fotomicrografias e medições de elementos anatômicos da madeira (Fotos: Luciano Denardi). 47
- Figura 9 – Interpretação do gráfico “boxplot”. 50
- Figura 10 – Procedimentos efetuados desde a coleta dos caules até a realização dos testes mecânicos: A – seleção de exemplares de cada espécie; B – confecção de corpos-de-prova com diferentes dimensões; C – acondicionamento para evitar perda de umidade; D – máquina de ensaios utilizada para os testes de flexão estática, em que L = distância máxima entre apoios, ou seja, 100 cm (Fotos: Luciano Denardi). 51
- Figura 11 – Teste hipotético de flexão estática. Destaque para os elementos necessários para a determinação do ângulo de flexibilidade, em que: a' = ângulo interno/2; D = deslocamento ou flecha máxima; L = distância entre apoios/2 (Foto: Luciano Denardi). 54
- Figura 12 – Procedimentos realizados para a determinação da espessura e proporção de casca, teor de umidade e peso específico da madeira. A, B – localização (seta) e obtenção de novos corpos-de-prova a partir dos caules recém submetidos aos testes mecânicos; C, D – medição do diâmetro com e sem casca, respectivamente; E – pesagem do corpo-de-prova úmido; F –

determinação do volume da madeira pelo método do empuxo; G – secagem em estufa; H – pesagem do corpo-de-prova seco (Fotos: Luciano Denardi)..... 56

Figura 13 – Procedimento utilizado para a visualização dos anéis de crescimento de *Salix humboldtiana* e *Salix x rubens*: A – corte da madeira com estilete; B – montagem de lâmina provisória (Fotos: Luciano Denardi)..... 59

Figura 14 – Procedimento utilizado para a visualização dos anéis de crescimento de *Phyllanthus sellowianus* e *Sebastiania schottiana*: A, B – confecção de corpos-de-prova e seccionamento em micrótomo, respectivamente; C – coloração dos cortes; D – montagem de lâmina provisória (Fotos: Luciano Denardi). 60

Figura 15 – Detalhes anatômicos da madeira de *Phyllanthus sellowianus* Müll. Arg. A – limite de anel de crescimento, porosidade semi-difusa e vasos em múltiplos radiais, em plano transversal; B – mesmos aspectos, em maior aumento (destaque para as fibras com parede estreita até espessa); C – fibras gelatinosas, em plano transversal; D – raios heterogêneos, em plano radial; E – célula perfurada de raio, em plano radial; F – placa de perfuração simples e fibras septadas, em plano radial; G – raios com 1-3 células de largura, em plano tangencial; H – mesmos aspectos, com maior aumento (Fotos: Luciano Denardi). 64

Figura 16 – Detalhes anatômicos da madeira de *Sebastiania schottiana* (Müll. Arg.) Müll. Arg. A – limite de anel de crescimento, porosidade difusa e vasos em múltiplos radiais, em plano transversal; B – mesmos aspectos, em maior aumento, com destaque para o parênquima apotraqueal difuso e fibras de parede muito estreita; C – fibras gelatinosas, em plano transversal; D – raios heterogêneos, em plano radial; E – células perfuradas de raio, em plano radial; F – placa de perfuração simples, em plano radial; G – raios com 1 à 2 células de largura, em plano tangencial; H – mesmos aspectos, em maior aumento (Fotos: Luciano Denardi)..... 66

Figura 17 – Detalhes anatômicos da madeira de *Salix humboldtiana* Willd. A – limite de anel de crescimento, porosidade semi-difusa, vasos em múltiplos radiais e abundante presença de fibras gelatinosas, em plano transversal; B – mesmos aspectos, em maior aumento, com destaque para o parênquima marginal e fibras de parede muito estreita; C – fibras gelatinosas, em plano transversal; D – pontoações raio-vasculares nas extremidades dos raios, em plano radial; E – raio heterogêneo, em plano radial; F – placa de perfuração simples, em plano radial; G – raios exclusivamente unisseriados, em plano tangencial; H – mesmos aspectos, em maior aumento (Fotos: Luciano Denardi). 68

Figura 18 – Detalhes anatômicos da madeira de *Salix x rubens* Shrank. A – limite de anel de crescimento, porosidade semi-difusa, vasos em múltiplos radiais e abundante presença de fibras gelatinosas, em plano transversal; B – mesmos aspectos, em maior aumento, com destaque para as fibras de parede muito estreita e as raras células de parênquima axial no término do anel de crescimento; C – fibras gelatinosas, em plano transversal; D – aspecto geral dos raios, em plano radial; E – raios heterogêneos e pontoações raio-vasculares nas extremidades, em plano radial; F – placa de perfuração simples, em plano radial; G – raios exclusivamente unisseriados, em plano tangencial; H – mesmos aspectos, em maior aumento (Fotos: Luciano Denardi). 70

Figura 19 – Composição do tecido lenhoso de *Phyllanthus sellowianus*, *Sebastiania schottiana*, *Salix humboldtiana* e *Salix x rubens*, para diferentes diâmetros do caule (indicado entre parênteses). 73

Figura 20 – Diâmetro do lume dos vasos (A) e espessura da parede dos vasos (B) de <i>Phyllanthus sellowianus</i> , <i>Sebastiania schottiana</i> , <i>Salix humboldtiana</i> e <i>Salix x rubens</i> , para diferentes diâmetros do caule (indicado entre parênteses).....	74
Figura 21 – Comprimento dos vasos de <i>Phyllanthus sellowianus</i> , <i>Sebastiania schottiana</i> , <i>Salix humboldtiana</i> e <i>Salix x rubens</i> , para diferentes diâmetros do caule (indicado entre parênteses).....	75
Figura 22 – Altura (A) e largura (B) dos raios unisseriados de <i>Phyllanthus sellowianus</i> , <i>Sebastiania schottiana</i> , <i>Salix humboldtiana</i> e <i>Salix x rubens</i> , para diferentes diâmetros do caule (indicado entre parênteses).....	76
Figura 23 – Altura (A) e largura (B) dos raios multisseriados de <i>Phyllanthus sellowianus</i> e <i>Sebastiania schottiana</i> , para diferentes diâmetros do caule (indicado entre parênteses).	77
Figura 24 – Comparação visual do diâmetro e da espessura da parede vasos e fibras, entre caules de diferentes dimensões, para cada uma das espécies em estudo. A, B – <i>Phyllanthus sellowianus</i> com caule de 3,0 e 5,0 cm de diâmetro, respectivamente; C,B – <i>Sebastiania schottiana</i> com caule de 3,0 e 7,0 cm de diâmetro, respectivamente; E,F – <i>Salix humboldtiana</i> com caule de 3,0 e 7,0 cm de diâmetro, respectivamente; G,H – <i>Salix x rubens</i> com caule de 3,0 e 6,8 cm de diâmetro, respectivamente (Fotos: Luciano Denardi).	78
Figura 25 – Comprimento de fibras, incluindo as normais e gelatinosas (A) e fração de fibras gelatinosas (B) de <i>Phyllanthus sellowianus</i> , <i>Sebastiania schottiana</i> , <i>Salix humboldtiana</i> e <i>Salix x rubens</i> , para diferentes diâmetros do caule (indicado entre parênteses).	79
Figura 26 – Estimativa da idade em função do diâmetro dos caules para as quatro espécies em estudo.	89
Figura 27 – Peso específico aparente básico da madeira em função do diâmetro dos caules para as quatro espécies em estudo.	90
Figura 28 – Teor de umidade da madeira em função do diâmetro dos caules para as quatro espécies em estudo.....	91
Figura 29 – Espessura de casca em função do diâmetro dos caules para as quatro espécies em estudo.	92
Figura 30 – Módulo de ruptura em função do diâmetro dos caules para cada uma das espécies em estudo.....	93
Figura 31 – Ângulo de flexibilidade em função do diâmetro dos caules para cada uma das espécies em estudo.....	94
Figura 32 – Comportamento hipotético de uma planta, em função de diferentes diâmetros de caule, quando submetida à força da água durante uma enchente, em que: α = ângulo de flexibilidade; P = profundidade; V = velocidade da água; a,b,c = representam plantas com caules de diâmetro pequeno, médio e grande, respectivamente (Ilustração: Luciano Denardi).	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Diâmetro do caule dos indivíduos, tomado a 1,3 m do solo.	46
Tabela 2 – Dados quantitativos do lenho de <i>Phyllanthus sellowianus</i> Müll. Arg.....	61
Tabela 3 – Dados quantitativos do lenho de <i>Sebastiania schottiana</i> (Müll. Arg.) Müll. Arg.	61
Tabela 4 – Dados quantitativos do lenho de <i>Salix humboldtiana</i> Willd.....	62
Tabela 5 – Dados quantitativos do lenho de <i>Salix x rubens</i> Shrank.....	62
Tabela 6 – Resultados relativos aos testes de flexão estática e de outras variáveis para <i>Phyllanthus sellowianus</i> Müll. Arg.	80
Tabela 7 – Resultados relativos aos testes de flexão estática e de outras variáveis para <i>Sebastiania schottiana</i> (Müll. Arg.) Müll. Arg.	80
Tabela 8 – Resultados relativos aos testes de flexão estática e de outras variáveis para <i>Salix humboldtiana</i> Willd.	81
Tabela 9 – Resultados relativos aos testes de flexão estática e de outras variáveis para <i>Salix x rubens</i> Shrank.	81
Tabela 10 – Valores médios de algumas variáveis para as quatro espécies em estudo.	82
Tabela 11 – Matriz de correlação de Pearson entre variáveis do caule de <i>Phyllanthus sellowianus</i> Müll.(Arg.).	85
Tabela 12 – Matriz de correlação de Pearson entre variáveis do caule de <i>Sebastiania schottiana</i> (Müll. Arg.) Müll. Arg.	86
Tabela 13 – Matriz de correlação de Pearson entre variáveis do caule de <i>Salix humboldtiana</i> Willd.....	87
Tabela 14 – Matriz de correlação de Pearson entre variáveis do caule de <i>Salix x rubens</i> Schrank.....	88
Tabela 15 – Classificação das plantas em função da flexibilidade dos caules (Denardi, 2007).	100

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Objetivos	15
1.1.1 Objetivo geral	15
1.1.2 Objetivos específicos.....	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1 O ambiente fluvial	16
2.1.1 Considerações gerais.....	16
2.1.2 Problematização	18
2.2 Bioengenharia – manejo biotécnico de cursos de água	20
2.2.1 Conceitos, disposições legais e aplicação	20
2.2.2 Tipos de obras.....	21
2.3 Propriedades técnicas da vegetação	23
2.3.1 Efeitos da vegetação sobre taludes fluviais	23
2.3.2 Critérios para seleção de espécies.....	24
2.3.3 Flexibilidade das plantas	26
2.4 As espécies estudadas	27
2.4.1 Considerações gerais.....	27
2.4.2 Caracterização das espécies.....	30
2.4.2.1 <i>Phyllanthus sellowianus</i> Müll. Arg.....	30
2.4.2.2 <i>Sebastiania schottiana</i> (Müll. Arg.) Müll. Arg.....	32
2.4.2.3 <i>Salix humboldtiana</i> Willd.....	33
2.4.2.4 <i>Salix x rubens</i> Shrank.....	35
2.5 Aspectos gerais sobre a madeira	37
2.5.1 Anatomia da madeira	37
2.5.2 Propriedades físicas e mecânicas da madeira	41
3 MATERIAIS E MÉTODOS	44
3.1 Considerações gerais	44
3.2 Caracterização da região do estudo	44
3.3 Anatomia da madeira	46
3.3.1 Coleta de material e confecção dos corpos-de-prova.....	46
3.3.2 Lâminas histológicas.....	48
3.3.3 Lâminas de macerado.....	48

3.3.4 Fotomicrografias da madeira	49
3.3.5 Descrição e análise da estrutura anatômica da madeira	49
3.3.6 Medições e contagens microscópicas.....	49
3.3.7 Processamento e análise estatística dos dados.....	50
3.4 Flexibilidade do caule.....	51
3.4.1. Coleta de material e confecção de corpos-de-prova	51
3.4.2 Testes de flexão estática	52
3.4.2.1 Determinação do módulo de elasticidade.....	53
3.4.2.2 Determinação do módulo de ruptura.....	53
3.4.2.3 Determinação do ângulo de flexibilidade.....	54
3.4.3 Determinação de outras variáveis	55
3.4.3.1 Espessura e porcentagem de casca	57
3.4.3.2 Peso específico aparente básico da madeira	57
3.4.3.3 Teor de umidade da madeira.....	58
3.4.3.4 Idade da madeira	58
3.4.3 Análise estatística dos dados	60
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	61
4.1 Anatomia da madeira.....	61
4.1.1 Descrição microscópica.....	61
4.1.1.1 <i>Phyllanthus sellowianus</i> Müll. Arg.....	63
4.1.1.2 <i>Sebastiania schottiana</i> (Müll. Arg.) Müll. Arg.....	65
4.1.1.3 <i>Salix humboldtiana</i> Willd.	67
4.1.1.4 <i>Salix x rubens</i> Schrank	69
4.1.2 Análise da estrutura anatômica sob o enfoque taxonômico	71
4.1.3 Análise da estrutura anatômica sob o enfoque tecnológico.....	73
4.2 Flexibilidade do caule.....	80
4.2.1 Estatística descritiva e considerações preliminares	80
4.2.2 Estatística inferencial	84
4.2.3 Considerações sobre o comportamento mecânico dos caules	95
4.3 Classificação das plantas quanto a flexibilidade dos caules.....	98
4.4 Utilização e manejo das plantas.....	100
5 CONCLUSÕES.....	104
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	106

1 INTRODUÇÃO

No Rio Grande do Sul, como também em outros Estados brasileiros, os cursos de água freqüentemente apresentam problemas, tais como corrosão nas margens, desmoronamentos, assoreamentos, queda de árvores para o leito, entre outros. Tais eventos estão relacionados com a geologia, relevo, tipo de solo, clima, vegetação local e ações antrópicas.

As florestas de galeria ou matas ciliares são formações silváticas que, associadas às margens de cursos de água, cumprem importante papel na proteção de nascentes e taludes, servindo ainda como abrigo para a fauna silvestre e como fonte de alimento para a ictiofauna. Em contraponto, as árvores de grande porte, pela ação do vento sobre sua copa, funcionam como “alavancas”, causando instabilidade dos taludes fluviais. Outro exemplo são as “touceiras de taquara”, bastante comuns na mata ciliar, que freqüentemente tombam para dentro do leito dos rios, em função de seu denso, mas pouco profundo sistema radicial.

Como se pode ver, nem sempre os efeitos da vegetação associada aos taludes fluviais são benéficos. Dessa forma, torna-se importante o conhecimento da aptidão das plantas a esses ambientes, bem como das técnicas para seu correto emprego e manejo.

A Bioengenharia, ciência bastante difundida e aceita em países da Europa, preconiza o uso de vegetação, isoladamente ou combinada com estruturas de materiais inertes, com vistas à estabilização e proteção de taludes.

No Rio Grande do Sul, alguns pesquisadores já comprovaram experimentalmente a viabilidade prática do uso da Bioengenharia para solucionar, ou pelo menos minimizar, determinados problemas em cursos de água.

A vegetação empregada em Bioengenharia, que pode ser nativa ou exótica, deve apresentar uma série de características para atender a finalidade proposta.

A flexibilidade dos caules, embora ainda não investigada para nossas espécies, é, sem dúvida, uma das principais características a serem observadas, quando se deseja a proteção de taludes fluviais.

Nesse sentido, a análise da estrutura anatômica da madeira, juntamente com ensaios de flexão estática, possibilitam a compreensão do comportamento das plantas quando submetidas à força das águas, por ocasião das cheias.

O presente trabalho visa a contribuir para o conhecimento da aptidão biotécnica de quatro espécies promissoras na recuperação de cursos de água: *Phyllanthus sellowianus* Müll.

Arg. (Phyllanthaceae), *Sebastiania schottiana* (Müll. Arg.) Müll. Arg. (Euphorbiaceae), *Salix humboldtiana* Willd. e *Salix x rubens* Schrank (Salicaceae).

Neste estudo, parte-se da premissa de que plantas mais jovens tenham caules com maior flexibilidade, característica altamente desejável para a proteção de taludes fluviais. Isto posto, têm-se as seguintes hipóteses:

H₀: Independentemente da idade (ou dimensões), as plantas apresentam caules com igual flexibilidade; neste caso, não será investigado aspectos anatômicos da madeira.

H₁: Plantas mais jovens apresentam caules mais flexíveis; neste caso, torna-se importante verificar possíveis correlações com aspectos anatômicos e demais características dos caules.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

- Investigar a anatomia e a flexibilidade do caule de *Phyllanthus sellowianus* Müll. Arg., *Sebastiania schottiana* (Müll. Arg.) Müll. Arg., *Salix humboldtiana* Willd. e *Salix x rubens* Schrank, com vistas à proteção de taludes fluviais.

1.1.2 Objetivos específicos

- Descrever e analisar a estrutura anatômica da madeira, para as quatro espécies em estudo;
- Submeter os caules, de cada uma das espécies e com diferentes dimensões, a testes de flexão estática, com vistas à determinação de sua flexibilidade e resistência à ruptura;
- Determinar a idade, o teor de umidade e o peso específico da madeira, como também a espessura e a percentagem de casca, para cada um dos caules submetidos aos testes de flexão estática;
- Caso a hipótese H₁ seja confirmada, propor uma classificação para as plantas, baseada na flexibilidade dos caules, bem como estratégias para o manejo biotécnico dos cursos de água.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O ambiente fluvial

2.1.1 Considerações gerais

Dada a vasta terminologia empregada na literatura para caracterizar o ambiente fluvial, cabe, inicialmente, definir ou esclarecer alguns termos técnicos.

A definição do que é um rio tem sido motivo de discussões e controvérsias na literatura (Margalef, 1974; Rozska, 1978; Calow e Petts, 1994). Há definições simples, como a proposta por Schäfer (1985): “hidrologicamente, o rio é um sistema aberto, com um fluxo contínuo da nascente à foz”, ou complexas, como a sugerida por Schwarzbald (2000), que engloba uma série de elementos bióticos e abióticos a ele associado.

Sem entrar no mérito da questão, preferiu-se, no presente trabalho, usar o termo “cursos de água”, para designar rios, arroios, córregos e sangas, entre outros.

A água é um dos mais importantes agentes exógenos na construção e composição da paisagem terrestre (Durlo e Sutili, 2005). Do seu escoamento nos cursos de água resultam processos fluviais de erosão, transporte e deposição, que participam da constante modelagem das formas do relevo e correlacionam-se, de forma dinâmica, a toda sorte de aspectos ecológicos, econômicos e sociais. Para a compreensão desses processos, torna-se importante o conhecimento de alguns elementos da fisiografia fluvial: rede de drenagem, canal e leito.

A rede de drenagem fluvial pode ser definida como o conjunto de canais que se interligam, escoando em determinada direção e cuja área drenada denomina-se bacia hidrográfica. Os padrões de drenagem dessa rede são classificados com base na forma de escoamento, na gênese ou na geometria dos canais (Cunha, 2001).

De acordo com Christofletti (1974, 1981), a fisionomia exibida por um curso de água ao longo de seu desenvolvimento longitudinal, sob a perspectiva de vista superior, é descrita como canal retilíneo, canal anastomosado ou canal meandrante. Com relação ao regime de escoamento, os canais são classificados em perenes, intermitentes ou efêmeros (Durlo e Sutili, 2005).

O leito fluvial pode ser definido como o espaço ocupado pelo escoamento das águas. Isto posto, cabe comentar-se, ainda, sobre o perfil longitudinal e o perfil transversal.

O perfil longitudinal de um curso de água mostra a variação da declividade ao longo de seu desenvolvimento, para diversos pontos situados entre a nascente e a foz (Christofolletti, 1981). Segundo Leinz e Amaral (1978 *apud* DURLO e SUTILI, 2005), a configuração longitudinal de um rio e a velocidade de suas águas, dependem de fatores como o regime fluvial da área de drenagem, a constituição litológica do substrato e a topografia. O conhecimento desse perfil é de suma importância para a compreensão e controle dos processos fluviais.

O reconhecimento do perfil transversal, com seus diferentes leitos e seu regime de ocupação pelas águas, constitui, segundo Durlo e Sutili (2005), um pré-requisito para o emprego da Bioengenharia no manejo biotécnico de cursos de água, tendo-se em vista que a vegetação é uma de suas principais ferramentas (Figura 1).

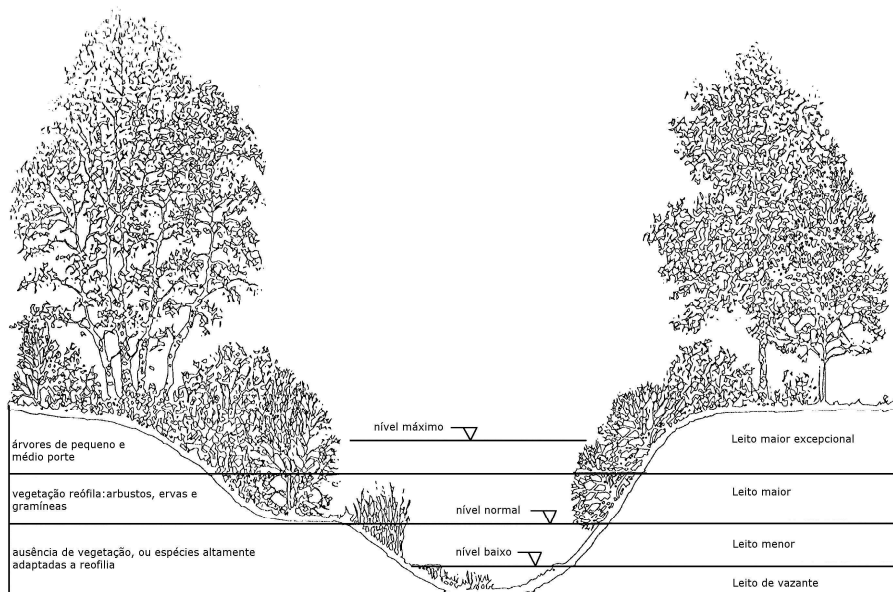


Figura 1 – Perfil transversal e mata ciliar de um curso de água (Schiechtel, 1980 *apud* DURLO e SUTILI, 2005).

Segundo Cunha (2001), 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 marcado pela linha de máxima profundidade ao longo do canal: o talvegue. O leito maior é de ocupação sazonal (por ocasião das cheias), ao passo que o maior excepcional é inundado somente durante as grandes enchentes.

Associada às margens dos cursos de água, encontram-se, usualmente, as florestas de galeria, por vezes ditas ripárias, ciliares, ribeirinhas ou ripícolas (Martins, 2001; Marchiori, 2004). De acordo com o último destes autores, tratam-se de formações silváticas que,

limitadas a um estreito cordão ou compondo faixas de largura variável segundo as características do relevo, compreende, ao longo de um transecto, uma ou mais comunidades, distintas entre si pela composição florística associada aos respectivos habitats (Figura 1).

De inclinação normalmente variável, os taludes fluviais, taludes marginais ou simplesmente “barrancas”, compõe as margens de um curso de água. Muito susceptíveis a perturbações, essas áreas constituem, na maioria das vezes, o principal foco de problemas, pois são freqüentemente alteradas de forma negativa pela força da água, pela vegetação e pela ação antrópica, entre outros fatores.

2.1.2 Problematização

Desmoronamentos, assoreamentos, corrosão nas margens e queda de árvores, são problemas comuns, porém não desejáveis em cursos d'água.

De acordo com Wolle (1980 *apud* PINHEIRO, 2000), a água e o vento, sob a condicionante básica da gravidade, são agentes capazes de causar processos fluviais de erosão, transporte e deposição de sedimentos, numa permanente tendência à peneplanização.

Vale frisar que a água, um dos mais importantes agentes modeladores exógenos do relevo, está ligada aos processos de erosão, tendo decisiva influência sobre a estabilidade de encostas e taludes fluviais.

O armazenamento de água no solo e seu escoamento através de ravinas, córregos e rios pode, por vezes, representar um grave problema para a sociedade. Em regiões de baixa pluviosidade, o armazenamento hídrico constitui um fator limitante à ocupação humana.

Segundo Durlo (2000), regiões com alta pluviosidade, mesmo que restrita a determinadas estações do ano, experimentam problemas decorrentes do escoamento das águas: erosões laminar ou em sulcos, deslizamentos, corrosões de barrancas, deposições de materiais indesejados, entre outros. Tais fenômenos, de origem natural, são induzidos ou favorecidos pelas ações ou omissões do Homem, e podem causar, com freqüência, a destruição de bens e propriedades.

A velocidade da água, segundo Aulitzky *et al.* (1990), é fator de grande influência na estabilidade das margens dos cursos de água. A velocidade do fluxo depende basicamente da inclinação do leito. Assim, à medida que aumenta a inclinação, maior é a velocidade da água, bem como sua capacidade de erosão e transporte de materiais (Durlo e Sutili, 2004).

Sutilli (2004), por exemplo, cita que a presença de touceiras de taquara, de pedras de grandes dimensões ou de depósitos de seixos no leito dos cursos de água pode, de diversas maneiras, desviar a força da água para as margens, dando início à corrosão e instabilidade dos taludes, que constituem os problemas mais frequentes. Esse fato é principalmente evidenciado nos raios externos dos trechos curvos, que oferecem maior resistência ao movimento da água. Nos raios externos das curvas de um rio, corrosões e deslizamentos produzem sedimentos que se depositam no raio interno das curvas seguintes. A formação de taludes instáveis, entretanto, é característica não exclusiva dos trechos curvos.

A presença de árvores de grande porte sobre os taludes também pode contribuir ou dar início à instabilidade, pois além do efeito “alavanca”, adicionam peso à encosta.

Na Figura 2, são exibidos alguns dos problemas mais frequentes, observados em cursos de água do Rio Grande do Sul.



Figura 2 – Problemas comuns em cursos de água: A, B – corrosão das margens; C – touceiras de taquara caídas sobre o leito; ; D – árvores de grande porte sobre o talude (Fotos: Fabrício Jaques Sutilli).

De acordo com Durlo (2000) e Martins (2001), mesmo com planejamento e trabalho cuidadoso no cultivo da natureza, é praticamente impossível evitar que algumas áreas sejam

modificadas negativamente ao longo do tempo, que partes de encostas percam estabilidade e ocorram erosões, desmoronamentos e queda de árvores, entre outros problemas.

Quando isto ocorre, torna-se necessária a recomposição e a estabilização das áreas atingidas, com vistas a minimizar a degradação ambiental. Para tanto, pode-se lançar mão do uso de técnicas de Bioengenharia.

2.2 Bioengenharia – manejo biotécnico de cursos de água

2.2.1 Conceitos, disposições legais e aplicação

A Bioengenharia engloba um conjunto de técnicas construtivas e serve-se de conhecimentos biológicos para a estabilização de encostas de montanha, taludes de estradas e margens de cursos de água (Durlo e Sutili, 2005). Uma das características destas técnicas é o uso de plantas, ou partes destas, como material vivo de construção. Sozinhas ou em combinação com material inerte (madeira, pedra, alvenaria, restos culturais, etc.), as plantas devem proporcionar estabilidade às áreas em tratamento, ao longo de sua vida (Schiechtl e Stern, 1994).

De acordo com Durlo e Sutili (2005), métodos de Bioengenharia são utilizados na Europa há pelo menos 150 anos; nos Estados Unidos, os primeiros registros datam de 1920. No Brasil, a Bioengenharia é ainda pouco conhecida e praticada.

Segundo Durlo (2000), além da solução técnica, a Bioengenharia apresenta vantagens ecológicas, econômicas e estéticas, se comparada a construções tradicionais. A canalização de um curso de água, por exemplo, além de onerosa, não produz os efeitos ecológicos e estéticos desejados.

O comportamento de um curso de água depende de fatores físicos (tamanho, forma, declividade e cobertura vegetal da bacia de captação, margens e leito), meteorológicos (quantidade, intensidade e duração das precipitações) e edáficos (tipo, profundidade e teor de umidade do solo). Somando-se a esses fatores, deve-se também considerar as ações antrópicas. Dado esse grande número de variáveis e interações, os trabalhos para correção de cursos de água resultam normalmente complexos. A solução de um problema comum, como a erosão marginal em pequeno trecho de um curso de água, além de medidas corretivas locais, requer, muitas vezes, intervenções em outros pontos do leito ou, até mesmo, na bacia de recepção (Durlo, 2000).

O clima e a geologia não podem ser modificados facilmente e a curto prazo; de modo pontual, todavia, e dentro de certos limites, a vegetação pode ser utilizada sozinha ou combinada com estruturas inertes, a fim de que certas características sejam influenciadas ou controladas (Durlo e Sutili, 2004).

Alterações na declividade do leito de um curso de água, bem como na inclinação de seus taludes marginais, são intervenções que, se necessárias, devem preceder a revegetação ou obras de Bioengenharia (Durlo e Sutili, 2005).

No Brasil, um dos entraves para o manejo biotécnico de cursos de água é a legislação. O Código Florestal (Lei n. 4.771, de 15 de setembro de 1965) reconhece a mata ciliar como área de preservação permanente, não passível de qualquer alteração. Mais recentemente, a Lei de Política Agrícola (n. 8.171, de 17 de janeiro de 1991) abriu caminho para a recuperação gradual das áreas de preservação permanente, o que implica, obviamente, em alterações (Rodrigues e Leitão Filho, 2000). Nesse sentido, a revegetação das margens de cursos de água, bem como algumas obras de Bioengenharia, de caráter experimental, já foram efetivadas – e com sucesso –, no Rio Grande do Sul; o corte ou até mesmo a poda de indivíduos, no entanto, são práticas proibidas pela legislação, diferentemente do que acontece, por exemplo, em países europeus, onde tais intervenções são usuais e reconhecidas como necessárias.

2.2.2 Tipos de obras

Segundo a posição que ocupam em relação ao eixo de um curso de água, as obras de Bioengenharia dividem-se em transversais e longitudinais (Florineth, 2004; Durlo e Sutili, 2005).

As obras transversais visam a reduzir a velocidade da água através do desenvolvimento de um perfil de compensação, que modifica a inclinação original do leito do rio e, conseqüentemente, força o depósito de sedimentos, consolida o leito e estabiliza as margens. Produzidas normalmente com materiais inertes, por vezes complementadas por medidas vegetativas, as barragens de consolidação, soleiras ou cintos basais, são exemplos desse tipo de obra.

As obras longitudinais não alteram a declividade do leito e objetivam, principalmente, reconstruir e estabilizar e/ou proteger os taludes, o que pode ser conseguido tanto com o revestimento vegetal ou físico dos taludes, como pela construção de râmprolas (Durlo e Sutili, 2005). Os revestimentos, que 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, proporcionam maior resistência à força das águas. São exemplos de revestimentos a parede Krainer, a esteira viva e a trança viva, entre outros.

Muitas vezes, em um mesmo curso de água, é necessário que as obras transversais e longitudinais sejam construídas em conjunto, de modo que uma complemente a ação da outra (Durlo e Sutili, 2005).

Na Figura 3 são exibidos alguns tipos de obras de Bioengenharia, implantadas experimentalmente na região central do Rio Grande do Sul.



Figura 3 – Tipos de obras de Bioengenharia: A, B – parede Krainer; C, D – esteira viva; E – trança viva; F – soleira (Fotos: Fabrício Jaques Sutili).

De acordo com Durlo e Sutili (2005), além das obras de Bioengenharia propriamente ditas (transversais e longitudinais), são reconhecidas outras formas bastante simples de tratamento de cursos de água, porém de caráter temporário e emergencial. Constituem bons exemplos, a remodelagem (chanframento) de taludes abruptos e a fixação de materiais, como galhos, troncos, árvores inteiras ou pedras nas margens a serem protegidas.

Cabe destacar, todavia, que o conhecimento das propriedades técnicas da vegetação é fundamental e deve preceder às tentativas de estabilização de taludes, mediante obras de Bioengenharia (Durlo e Sutili, 2004).

2.3 Propriedades técnicas da vegetação

2.3.1 Efeitos da vegetação sobre taludes fluviais

Entre os técnicos que trabalham com ambientes naturais, é consenso o fato de que as plantas desempenham um importante papel na proteção do solo e na prevenção de seus movimentos coletivos. Os efeitos da vegetação sobre taludes fluviais (e outros), todavia, nem sempre são benéficos.

De acordo com Durlo e Sutili (2005), as plantas podem produzir os seguintes efeitos sobre taludes fluviais: interceptam a água das chuvas, aumentam a evapotranspiração, adicionam peso, ancoram o talude, produzem efeito de alavanca sobre o mesmo e recobrem o solo pelo acúmulo de serapilheira (Figura 4).

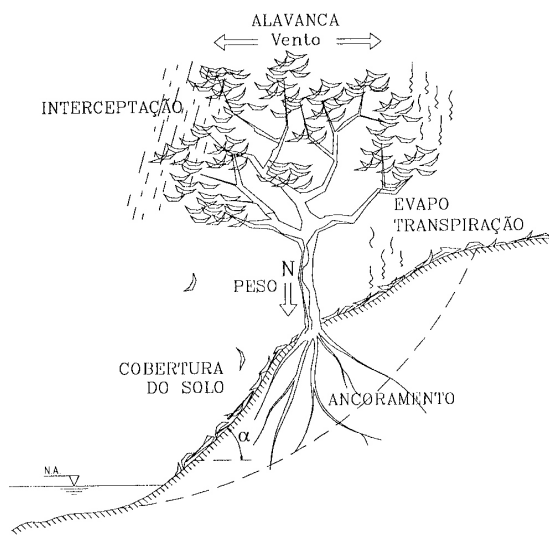


Figura 4 – Efeitos da presença de uma árvore sobre um talude fluvial (Durlo e Sutili, 2005. p. 74).

Com o intuito de proteger os cursos d'água, é bastante comum, principalmente no meio rural, o plantio de espécies do gênero *Eucalyptus* ao longo de suas margens. Como dito anteriormente, além da sobrecarga vertical sobre o talude, pela adição de peso, árvores de grande porte transmitem-lhes fortes tensões pela ação do vento sobre as copas (efeito alavanca), o que resulta em instabilidade.

As taquaras (*Bambusa trinii*, *Bambusa tuldoides*, entre outras) são também muito utilizadas com vistas à proteção das margens dos cursos d'água. Cabe comentar, no entanto, que além da parte aérea avantajada, tais plantas possuem um sistema radicial pouco profundo, o que justifica sua ineficiência no ancoramento e proteção de taludes.

A retirada (corte) de plantas de grandes dimensões, por vezes torna-se necessária para a manutenção da estabilidade dos taludes fluviais. A realização de podas pode também ser benéfica, pois estimula o enraizamento e permite a renovação da vegetação, caso as plantas tenham capacidade de rebrota, além de aumentar o perfil transversal de escoamento (Durlo e Sutili, 2003).

Wolle (1986) também reconhece efeitos favoráveis e desfavoráveis da vegetação na estabilidade dos taludes. Logo após a retirada das árvores, obtém-se ganho na estabilidade do talude, devido à eliminação dos efeitos negativos de sobrecarga e alavanca. Caso não haja rebrotação, todavia, 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.

Segundo Durlo e Sutili (2005), a proteção de taludes dá-se principalmente pelo efeito do sistema radicial, que providencia um reforço mecânico, aumentando substancialmente a resistência da massa terrosa ao cisalhamento.

Em suma, na dependência de fatores físicos, edáficos e climáticos, a cobertura vegetal das margens dos cursos de água não traz, necessariamente, apenas benefícios. A vegetação, todavia, sempre será uma poderosa ferramenta com vistas à estabilização e proteção de taludes fluviais, desde que devidamente empregada. Para tanto, a Bioengenharia baseia-se em critérios de seleção, bem como no conhecimento da aptidão biotécnica das plantas.

2.3.2 Critérios para seleção de espécies

Diversas espécies vegetais possuem características que podem ser utilizadas no controle técnico de processos fluviais, como erosões do fundo e margens de cursos d'água, incluindo desmoronamentos e transporte de sedimentos (Gray e Leiser, 1982; Begemann e

Schiechtl, 1994; Morgan e Rickson, 1995; Florineth e Gerstgraser, 2000; Durlo e Sutili, 2005).

Para o sucesso na seleção das espécies, devem ser considerados critérios ecológicos, sociológicos e reprodutivos (Durlo e Sutili, 2005).

Conforme estes autores, o que se pretende, com a seleção da vegetação, é acelerar as sucessões naturais em locais erodidos ou propensos ao desmoronamento, com vistas à alcançar, o mais rápido possível, seus efeitos de proteção.

De acordo com Florineth e Gerstgraser (2000), deve-se dar prioridade a espécies nativas, por estarem mais bem adaptadas às condições edáficas e climáticas locais. Além disso, elas devem ser de fácil reprodução e baixo custo; espécies com boa capacidade de reprodução vegetativa são, normalmente, as ideais.

Passando pelos critérios anteriores de seleção, resta conhecer, ainda, a aptidão biotécnica das plantas, pois, além de sobreviver no local, elas precisam ter a capacidade de solucionar o problema técnico existente. Na dependência de cada situação, a escolha pode recair, segundo Durlo e Sutili (2005), sobre plantas que:

- resistam à exposição parcial de suas raízes, em locais com erosão;
- tenham sistema radicial que permita a fixação do solo (talude), quer pelo comprimento, volume, distribuição e resistência das raízes, quer pela interação destas características;
- resistam ao aterramento parcial, em locais onde se prevê formas deposicionais;
- resistam ao apedrejamento (oriundo de barrancas altas e declivosas);
- tenham capacidade de brotar após ruptura ou corte intencional da parte aérea;
- possuam, preferencialmente, a capacidade de se reproduzir por meios vegetativos, tendo rápido crescimento.

Cabe destacar, que os primeiros estudos sobre a aptidão biotécnica de plantas do Rio Grande do Sul, devem-se a Sutili (2004), Sutili *et al.* (2004), Durlo e Sutili (2005) e Vargas (2007).

Sutili (2004) testou a aptidão biotécnica de sete espécies nativas, com vistas à estabilização de um talude fluvial no arroio Guarda-mor, município de Faxinal do Soturno: *Calliandra brevipes* Benth., *Calliandra tweediei* Benth. *Phyllanthus sellowianus* Müll. Arg.,

Pouteria salicifolia (Spreng.) Radlk., *Salix humboldtiana* Willd., *Sebastiania schottiana* (Müll. Arg.) Müll. Arg. e *Terminalia australis* Camb.

Conhecidas pelos nomes de sarandi ou amarelo, essas espécies, segundo Marchiori (2004), compõem uma comunidade singular de arbustos e árvores pequenas (arvoretas) que vivem junto aos cursos de água, com exceção de *Salix humboldtiana* (árvore de porte médio a grande), sendo particularmente adaptadas para suportar a força da correnteza e eventual submersão por ocasião das enchentes.

Plantas herbáceas, como as gramíneas, também apresentam características que podem ser aproveitadas pela Bioengenharia (Sutili, 2004).

Resta comentar, ainda, que embora não tenha sido referida por Durlo e Sutili (2005), a flexibilidade de caules e ramos constitui, segundo Vollsinger *et al.* (2000) e Florineth (2004), uma das características mais importantes para a proteção de taludes fluviais.

2.3.3 Flexibilidade das plantas

Como se sabe, o efeito protetivo das plantas sobre os taludes fluviais se dá principalmente pelo sistema radicial. Nos casos em que a vegetação é submetida á força da correnteza, todavia, a proteção também poderá ser exercida por sua parte aérea (caules e ramos), que devem ser flexíveis.

De acordo com Vollsinger *et al.* (2000), que conduziram estudos com várias espécies para o uso em Bioengenharia (Áustria), nos locais em que a velocidade da água é alta, a flexibilidade torna-se fundamental, pois as plantas devem ter a capacidade de se inclinar para recobrir os taludes marginais, protegendo-os, dessa maneira, contra o poder erosivo da água.

A região central do Rio Grande do Sul se enquadra, muito bem, no referido caso, pois a água adquire velocidade ao escoar pelos íngremes taludes da Serra Geral, dando origem a processos fluviais de erosão, transporte e deposição de sedimentos nos trechos subseqüentes.

Florineth (2004) divide a vegetação da margem de cursos de água em três tipos: “vegetação flexível densa”, que durante as enchentes protege fisicamente os taludes ao se curvar sobre os mesmos; “vegetação não-flexível densa”, que por sua abundância e dimensões, consegue reduzir a velocidade da água, diminuindo seu poder erosivo; e “vegetação não-flexível de plantas singulares”, composta por árvores isoladas que causam o turbilhonamento da água, sem reduzir sua velocidade, o que provoca, à jusante, focos de erosão. A vegetação flexível densa, de maior interesse no presente estudo, bem como os outros dois tipos, estão ilustrados na Figura 5.



Figura 5 – Tipos de vegetação em cursos de água, segundo Florineth (2004): A, B – vegetação flexível densa (setas); C – vegetação não-flexível densa; D – vegetação não-flexível de plantas singulares (Fotos: Florineth e Fabrício Jaques Sutili).

2.4 As espécies estudadas

2.4.1 Considerações gerais

Como já mencionado, a escolha de *Phyllanthus sellowianus* Müll. Arg., *Sebastiania schottiana* (Müll. Arg.) Müll. Arg. e *Salix humboldtiana* Willd. deve-se, no presente estudo, ao fato de serem espécies nativas e adaptadas ao ambiente reófilo, com algumas aptidões biotécnicas comprovadas pelos estudos realizados por Sutili (2004), Sutili *et al.* (2004), Durlo e Sutili (2005) e Vargas (2007). Com relação a *Salix x rubens* Shrank, exótica à flora brasileira, cabe destacar que essa espécie, bem como outras do mesmo gênero, são tradicionalmente utilizadas em obras de bioengenharia nos países europeus (Hörandl *et al.* 2002); bem adaptadas ao clima do Rio Grande do Sul, elas são frequentemente cultivadas, sobretudo por descendentes de imigrantes italianos, no Estado.

A respeito de *Pouteria salicifolia* e *Terminalia australis*, cabe comentar que, apesar de selecionadas inicialmente para o presente trabalho, elas foram substituídas, em virtude de

resultados desfavoráveis (sobretudo com relação ao enraizamento e brotação de estacas), por *Salix humboldtiana* e *Salix x rubens*, que mostram resultados mais promissores, segundo Sutili (2004).

A família Euphorbiaceae, representada no presente trabalho por *Sebastiania schottiana* (Müll. Arg.) Müll. Arg., é uma das maiores das Angiospermas Dicotiledôneas. Trata-se de ervas, arbustos, árvores ou lianas, por vezes áfilas, semelhantes a cactáceas, geralmente com látex, às vezes espinescentes.

As Euforbiáceas incluem diversas espécies de interesse econômico: é o caso da seringueira (*Hevea brasiliensis*), nativa da Amazônia Brasileira, responsável por um dos ciclos econômicos do Brasil; da mandioca (*Manihot esculenta*); e da mamona (*Ricinus communis*), esta de origem africana e invasora de culturas no Brasil, com sementes ricas em óleo de ampla aplicação na indústria e para fins medicinais. Diversas espécies são utilizadas como ornamentais (*Euphorbia pulcherrima*, *E. milli*, *Codiaeum variegatum*, *Pedilanthus tithymaloides*), enquanto outras, como *Aleurites moluccana* e *Joannesia princeps*, produzem sementes tóxicas ao homem. O látex das Euforbiáceas, de ação cáustica, pode levar a acidentes quando em contato com as mucosas, principalmente dos olhos (Souza e Lorenzi, 2005).

Distribuídas em todas as partes do mundo – mas sobretudo em regiões tropicais –, os maiores centros de dispersão das Euforbiáceas situam-se nas Américas e na África (Record e Hess, 1942; Smith *et al.*, 1988; Marchiori, 2000; Souza e Lorenzi, 2005). No Brasil, são cerca de 70 gêneros e 1.000 espécies, representando uma das principais famílias da flora brasileira e uma das mais complexas do ponto de vista taxonômico (Souza e Lorenzi, 2005).

Recentes estudos de filogenia apontaram a necessidade de reestruturação da família Euphorbiaceae. Em vista desses resultados, a Angiosperm Phylogeny Group II (APG II), de 2003, segregou a referida família em: Euphorbiaceae, Picrodendraceae, Putranjivaceae e Phyllanthaceae (Souza e Lorenzi, 2005; Sobral *et al.*, 2006).

A família Phyllanthaceae, representada neste trabalho por *Phyllanthus sellowianus* (antes Euphorbiaceae), inclui ervas, arbustos ou árvores não-latescentes. De distribuição predominantemente pantropical, as Phyllanthaceae incluem cerca de 60 gêneros e 1.800 espécies; no Brasil, ocorrem 13 gêneros e cerca de 100 espécies (Souza e Lorenzi, 2005).

As Filantáceas, segundo Souza e Lorenzi (2005), podem ser diferenciadas das Euforbiáceas pela ausência de látex e nectários extraflorais nas folhas, pelos lóculos do ovário biovulados e pelas sementes sem carúncula, características raras ou ausentes no conjunto das Euphorbiaceae.

Com relação a anatomia da madeira, não se tem referência na literatura sobre o novo padrão anatômico das Euphorbiaceae e da recente família Phyllanthaceae. Tendo-se em vista que *Phyllanthus sellowianus* e *Sebastiania schottiana* até bem pouco tempo pertenciam a uma mesma família (Euphorbiaceae), as considerações anatômicas a seguir, serão feitas para as Euphorbiaceae *sensu lato*.

De acordo com Metcalfe e Chalk (1972), a anatomia da madeira é muito variável nas Euforbiáceas, devido à diversidade de hábitos e ambientes ocupados por suas numerosas espécies. Em sua estrutura, observam-se vasos pequenos até grandes, dispostos em múltiplos radiais, racemiformes ou então solitários, com placas de perfuração escalariforme ou simples e pontoações intervasculares diminutas até grandes; parênquima axial abundante até ausente, dos tipos apotraqueal ou paratraqueal; raios marcadamente heterogêneos (por vezes com tubos laticíferos); fibras septadas ou não, providas de pontoações simples ou com pequenas bordas; fibras gelatinosas, de paredes muito espessas, podem estar presentes (Record e Hess, 1942; Metcalfe e Chalk, 1972, Marchiori, 2000).

A família Salicaceae, aqui representada por *Salix humboldtiana* Willd. e *Salix x rubens* Shrank, inclui árvores ou arbustos, raramente lianas, algumas vezes com espinho. De distribuição cosmopolita, inclui cerca de 50 gêneros e 1000 espécies. No Brasil, ocorrem 10 gêneros e cerca de 80 espécies (Souza e Lorenzi, 2005).

Essa família, assim como Euphorbiaceae e Rosaceae, por exemplo, também sofreu modificações em função de estudos filogenéticos. Composta até recentemente apenas pelos gêneros *Salix* e *Populus*, as Salicaceae incorporaram diversos gêneros antes pertencentes as Flacourtiaceae, tais como: *Azara*, *Banara*, *Casearia* e *Xylosma*, entre outros (Souza e Lorenzi, 2005).

As espécies do gênero *Salix* e *Populus* apresentam rápido crescimento e são particularmente indicadas para sítios úmidos ou solos pantanosos. Trata-se de plantas dióicas, em que a propagação se realiza essencialmente por meios vegetativos; a hibridização, todavia, ocorre facilmente entre árvores de diferentes tipos e sexos complementares (Record e Hess, 1942; FAO, 1980; Marchiori, 2000). De acordo com o último destes autores, numerosas espécies exóticas de *Salix* são cultivadas no Brasil, seja para fins ornamentais ou para a obtenção de ramos flexíveis, utilizados em trabalhos de cestaria ou mobiliário (vimes).

Cabe comentar que ainda não foi estabelecido um novo padrão anatômico da madeira para as Salicáceas, após as recentes modificações. A antiga caracterização anatômica da madeira das Salicáceas, que em última análise refere-se apenas às espécies pertencentes aos gêneros *Salix* e *Populus*, não perde, portanto, a validade no presente trabalho.

Em linhas gerais, a anatomia da madeira das espécies de *Salix* e *Populus* revela vasos moderadamente pequenos, com pontoações intervasculares alternas, grandes e pontoações raio-vasculares simples, dispostas nas margens dos raios; elementos vasculares de comprimento médio, com placa de perfuração simples; parênquima axial terminal, formando faixas de 1 – 3 células de largura; raios exclusivamente unisseriados, homogêneos ou heterogêneos; e fibras de comprimento médio, com pontoações simples (Record e Hess, 1942; Metcalfe e Chalk, 1972). De acordo com a FAO (1980), o tecido lenhoso é constituído principalmente por fibras (56 – 79%), vasos (20 – 33%), raios e parênquima axial que, em conjunto, somam entre 3 e 10%. Segundo Rupert Wiemmer, professor da Universität für Bodenkultur (Viena, Áustria), é praticamente impossível distinguir as espécies de *Salix* e *Populus*, com base na estrutura anatômica da madeira.

2.4.2 Caracterização das espécies

Com base na literatura disponível, cada espécie foi caracterizada sob dois enfoques: descrição botânica e aspectos da madeira. As ilustrações, referentes a cada uma das espécies, estão reunidas na Figura 6.

Cabe destacar que o termo “flexível”, por vezes empregado nas descrições botânicas, deve ser entendido como característica subjetiva, atribuída a caules e ramos.

2.4.2.1 *Phyllanthus sellowianus* Müll. Arg.

Descrição botânica:

Arbusto de 2 – 3 m de altura, glabro, com ramos delgados, compridos, sinuosos e muito divididos (Figura 6A).

As folhas, estreito-elípticas e mucronuladas, medem 3 – 4 (7) cm de comprimento, com pecíolos de 1,5 – 2 mm (Figura 6B); são delgadas, pálidas na face interior e providas de nervuras laterais evidentes, planas (Smith *et al.*, 1988).

As flores, dióicas, reúnem-se em fascículos, na axila das folhas. As sementes, medindo pouco mais de 1 mm, estão encerradas em uma cápsula deprimido-globosa, de 2,5 cm de diâmetro.

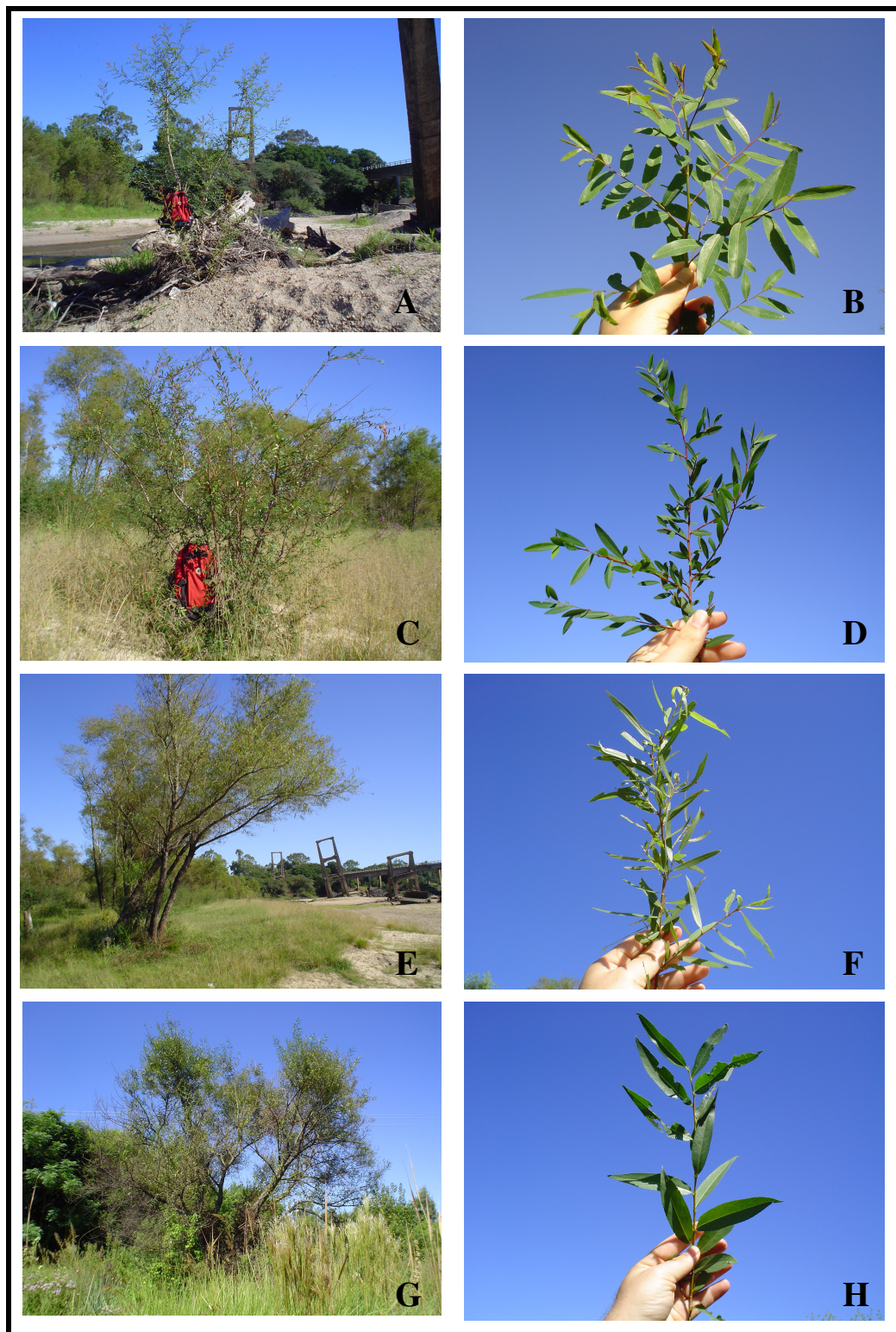


Figura 6 – Aspecto geral e detalhe do ramo das espécies estudadas: A, B – *Phyllanthus sellowianus*; C, D – *Sebastiania schottiana*; E, F – *Salix humboldtiana*; G, H – *Salix x rubens* (Fotos: Luciano Denardi).

De acordo com Cabrera *et al.* (1965), a espécie é originária do Sul do Brasil, Uruguai e nordeste da Argentina. Apesar da ampla distribuição, sua ocorrência é descontínua e irregular ao longo das margens de rios ou ilhas rochosas, em praticamente todo o Sul do Brasil (Smith *et al.*, 1988).

Conhecida vulgarmente por sarandi, sarandi-branco, sarandi-vermelho e filanto, *Phyllanthus sellowianus* pertence ao grupo das reófilas, ou seja, de plantas com caules rijos e flexíveis, capazes de resistir à correnteza da água durante as cheias. Juntamente com *Sebastiania schottiana*, *Terminalia australis* e *Calliandra brevipes*, entre outros arbustos menos frequentes, é espécie dominante na margem de rios (Smith *et al.*, 1988). Segundo o mesmo autor, trata-se de espécie heliófila e seletiva higrófila até xerófila, adaptada às variações extremas de umidade ou seca.

Madeira:

Devido às pequenas dimensões do caule, presume-se que a madeira seja de uso limitado. Com relação à descrição anatômica da madeira, não foram encontrados registros na literatura especializada.

Para o gênero *Phyllanthus*, todavia, Metcalfe e Chalk (1972) referem: pontoações intervasculares alternas; raios de até 3 células de largura, com frequência de 5 – 17/mm, e com numerosos cristais de sílica. Além desses aspectos, Record e Hess (1942) mencionam a presença de parênquima paratraqueal escasso.

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

Descrição botânica:

De acordo com Smith *et al.* (1988) e Marchiori (2000), trata-se de arbusto glabro, de 3 a 3,5 m de altura, com longos ramos escuros, pouco ramificados, espinescentes e flexíveis (Figura 6C).

As folhas, simples, alternas, de pecíolo curto (2 a 4 mm), membranáceas e lanceoladas, variam de 1 a 5 cm de comprimento por 4 a 15 mm de largura (Figura 6D), apresentando ápice obtuso ou brevemente agudo-mucronado, base estreita e margem inteira, com uma ou duas glândulas engrossadas na parte inferior. Discolores e esbranquiçadas na

face inferior, apresentam 7 – 10 nervuras secundárias evidentes em cada lado da principal (Marchiori, 2000).

Cabrera *et al.* (1965) comentam que as flores, pequenas e amarelas, são unissexuais, sendo as femininas produzidas na base das espigas, e as masculinas, com 3 estames quase livres, no ápice. O fruto, uma cápsula globosa, mede aproximadamente 5 mm de diâmetro.

De acordo com Marchiori (2000), a espécie 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. Segundo Smith *et al.* (1988), apresenta distribuição descontínua e irregular, ao longo da margem de rios e ilhas rochosas.

Conhecida no Rio Grande do Sul pelos nomes de amarelo, sarandi ou sarandi-de-espinho, é espécie heliófila e seletiva higrófila até xerófila, altamente adaptada à reofilia, por seu denso sistema radicial e caules rijos, embora “flexíveis”, capazes de suportar a força das águas nas enchentes (Smith *et al.*, 1988; Marchiori, 2000).

Por seu caráter reófilo, a espécie assume grande importância ecológica, auxiliando na fixação de barrancos e perenização de cursos d’água (Marchiori, 2000).

Madeira:

Devido ao pequeno diâmetro dos caules, a madeira carece de maior importância (Marchiori, 2000). Sobre a mesma, cabe destacar que não foram encontrados registros sobre sua estrutura na literatura anatômica.

Para o gênero *Sebastiania*, Record e Hess (1942) informam que algumas espécies apresentam pequenos tubos laticíferos, além de vasos de pequeno diâmetro ($< 50 \mu\text{m}$), pontoações raio-vasculares e parênquima-vasculares arredondadas, semelhantes às intervasculares, bem como raios unisseriados, com raros bisseriados.

2.4.2.3 *Salix humboldtiana* Willd.

Descrição botânica:

Árvore de porte médio (14 – 20 m), com tronco reto, inclinado ou tortuoso, de até 90 cm de diâmetro e copa ampla, com ramificação ascendente (Figura 6E); quando jovem, a copa assume forma piramidal, tendo ramos eretos e abundantes. A casca, espessa (2 – 3 cm) e com

fissuras longitudinais profundas, é dura e castanho-acinzentada (Leonardis, 1948; Reitz *et al.*, 1988; Marchiori, 2000).

As folhas, alternas, simples, linear-lanceoladas ou falcadas, e discolors, medem de 8 – 15 cm de comprimento por 1,5 cm de largura (Figura 6F); são caducas, glabras, curtamente pecioladas (4 – 6 mm), de ápice acuminado, base aguda e margem serrada, com nervura central proeminente (Tortorelli, 1956; Marchiori, 2000; Lorenzi, 2002).

As flores, unissexuais e aperiantadas, reúnem-se em amentilhos pendentes na extremidade dos ramos novos. Conforme Marchiori (2000), as sementes, muito pequenas, apresentam um tufo de pêlos sedosos-esbranquiçados, responsáveis pela dispersão anemocórica.

A área de ocorrência desta espécie estende-se do México até a Argentina e Chile (FAO, 1980; Marchiori, 2000; Moura, 2002). Habita, usualmente, a margem de cursos de água, sendo espécie freqüente nas bacias do Paraná e Uruguai, inclusive no delta da Prata (Reitz *et al.*, 1988). O salseiro – como é popularmente conhecido –, é uma das árvores mais características e a de maior porte na mata ciliar, ocorrendo na maior parte do Rio Grande do Sul (Marchiori, 2000).

Por sua ampla distribuição geográfica, a espécie recebe inúmeros nomes populares no Brasil, destacam-se: salso, salgueiro, salgueiro-do-rio, salseiro, chorão e eirana (Reitz *et al.*, 1988; Marchiori, 2000; Lorenzi, 2002). Nos países vizinhos, é conhecida pelos nomes de “ibirá-pacú” (significa árvore alta), sauce, sauce criollo, sauce colorado, sarandi e sauce chileno (Leonardis, 1948; Tortorelli, 1956; Carvalho, 2003).

Como planta pioneira, heliófila e seletiva higrófila, o salseiro habita solos úmidos de beira de rios e reproduz-se facilmente por estaquia, sendo os meses de julho e agosto os mais indicados para enraizamento (Tortorelli, 1956; Lorenzi, 2002).

Por seus benefícios no controle da erosão e assoreamento, a espécie é indicada para reflorestamentos na margem de rios, barragens e açudes (Reitz *et al.*, 1988; Marchiori, 2000).

Madeira:

A estrutura anatômica da madeira de *Salix humboldtiana*, descrita por Wiedenbrug (1948) e Tortorelli (1956), reúne, entre outros aspectos: madeira de porosidade difusa, com vasos solitários ou em múltiplos de 2 – 3, pequenos (35 – 50 – 110 μm) e numerosos (35 á 50 por mm^2); elementos vasculares de 80 – 430 μm de comprimento, com placas de perfuração simples, oblíqua e, ocasionalmente, apêndices; pontoações intervasculares alternas e

hexagonais, com abertura lenticular inclusa; parênquima apotraqueal marginal (terminal), em faixas de 1 – 3 células de espessura, pouco visíveis, mesmo ao microscópio; raios com frequência de 7 – 10/mm, heterogêneos e principalmente unisseriados (raros bisseriados), com altura máxima de 500 µm e cerca de 18 µm de largura; fibras de seção poligonal, por vezes septadas, de 1.000 até 1.300 µm de comprimento e com paredes muito delgadas, providas de pontoações simples. A esses aspectos, Marchiori (2004) agrega a presença de fibras gelatinosas.

Macia e pouco elástica, a madeira é leve, não ultrapassando 0,5 g/cm³ (Tortorelli, 1956; Reitz *et al.*, 1988; Marchiori, 2000). De cerne e alburno indistintos, a madeira tem baixa durabilidade natural, o que restringe sua utilização para caixotaria, obras internas e pasta celulósica (Marchiori, 2000; Lorenzi, 2002).

Em testes de flexão estática, foi encontrado módulo de elasticidade (MOE) de 61.863 kg/cm² e módulo de ruptura (MOR) de 378 kg/cm² (Tortorelli, 1956). Leonardis (1948) refere MOR de 411 kg/cm².

2.4.2.4 *Salix x rubens* Shrank

Descrição botânica:

Salix x rubens é um híbrido resultante do cruzamento de duas espécies européias: *Salix alba* e *Salix fragilis* (Hörandl, 1992; Salzmänn, 1998; Tagliari, 1998; Moura, 2002).

O vimeiro ou vime, como é popularmente conhecido, é planta lenhosa de tronco geralmente único e muito ramificado (Figura 6G), que foi introduzida no Brasil na primeira metade do século XX por imigrantes italianos, com a finalidade de amarrar parreirais e para a confecção de cestas (Gobbato, 1954; Salzmänn, 1998; Silva, 1999).

De crescimento rápido no Sul do Brasil, a espécie pode atingir 16 m de altura. Segundo Lupion (2004), apresenta folhas estreitas, de margens finamente serradas e coloração verde-acinzentada até dourada (Figura 6H).

As gemas, de 3 – 7 cm de comprimento, surgem praticamente ao mesmo tempo que as folhas. Conforme Salzmänn (1998), os frutos, cápsulas bivalvas, liberam sementes pilosas, facilmente dispersadas pelo vento.

Algumas informações sobre *Salix alba* e *Salix fragilis*, referidas por Hörandl *et al.* (2002), merecem destaque: a primeira dessas espécies, embora utilizada em obras de Bioengenharia na Áustria, não é plantada próximo à linha da água devido ao porte avantajado

que pode atingir. Em regiões de produção de vinho, o tronco é mantido com cerca de 1 – 1,5 m de altura para produção de ramos finos e flexíveis, utilizados como amarras em parreirais. Como o próprio nome sugere, *Salix fragilis* possui ramos mais frágeis (quebradiços), o que limita seu uso em margens de cursos de água; sua utilização, todavia, é recomendada para a contenção de encostas úmidas, onde os ramos não são submetidos à força das águas.

Como resultado da hibridização entre *Salix alba* e *Salix fragilis*, *Salix x rubens* herdou características vantajosas sobre o ponto de vista da Bioengenharia. Adaptado para suportar a força das correntezas durante as cheias, o híbrido é cultivado em margens de cursos d'água, nos países europeus (Salzmann, 1998; Hörandl *et al.*, 2002).

No Brasil, *Salix x rubens* ocorre espontaneamente em margens de cursos d'água, sendo também cultivado em várzeas, especialmente nos municípios da região de Lages, Santa Catarina (Moura 2002). A semelhança de outras espécies do gênero *Salix*, este híbrido reproduz-se facilmente por estaquia, característica de grande valor para o uso em Bioengenharia.

Madeira:

Com relação a estrutura anatômica da madeira de *Salix x rubens*, a única referência, ao que tudo indica, deve-se a Wagner (2005).

Em sua monografia, Wagner (2005) descreve a estrutura anatômica da madeira de *Salix x rubens*, tendo utilizado, para tanto, amostras de ramos com idade inferior a 1 ano. Os resultados obtidos serão parcialmente reproduzidos a seguir: ausência de anéis de crescimento; vasos solitários ou em múltiplos radiais de 2 – 3, com frequência em torno de 120/mm²; elementos vasculares com cerca de 450 µm de comprimento por 55 µm de diâmetro, com placas de perfuração simples; pontoações intervasculares alternas e poligonais; pontoações raio-vasculares com bordas diminutas; parênquima axial ausente; raios exclusivamente unisseriados, compostos por células procumbentes, quadradas e eretas; fibras com cerca de 700 µm de comprimento, não septadas e providas de pontoações simples na parede.

De acordo com Rech *et al.* (2006), a madeira de *Salix x rubens* é utilizada tanto no artesanato como na indústria moveleira.

Segundo Garay (2002), o peso específico de *Salix x rubens* oscila entre 0,38 – 0,45 g/cm³.

2.5 Aspectos gerais sobre a madeira

A estrutura anatômica da madeira é sumamente complexa e variável, o que por si só torna difícil apontar os verdadeiros elementos responsáveis por determinada propriedade deste material. Prova disso, é que a literatura anatômica mostra-se extremamente cautelosa no que diz respeito a correlações entre estrutura anatômica e propriedades da madeira (Eames e MacDaniels, 1953; Esau, 1959; Kollmann e Côté, 1968; Burger e Richter, 1991).

As dificuldades no estudo da madeira tendem a aumentar quando se levam em conta aspectos como idade, nós, tortuosidades, grãos irregulares, lenho de reação, composição química, teor de umidade, peso específico, entre outros. Se considerarmos que todas as injúrias que uma planta pode sofrer ao longo de sua vida (ataque de pragas, ventos, neve, geadas e outros fatores climáticos desfavoráveis, concorrência por luz e déficits de nutrientes) influem na atividade cambial e, conseqüentemente, na constituição do lenho, ter-se-ão indicado algumas razões da heterogeneidade da madeira.

Ao se estudar o comportamento da madeira, portanto, surge a necessidade de se analisar uma série de fatores, tendo em vista que, se os externos podem ser mensuráveis, os intrínsecos oferecem enormes dificuldades. Então, para se obter a resultante geral responsável por determinado comportamento, torna-se necessário, segundo Amaral (1970), um conhecimento íntimo desse material, bem como uma percepção dos fenômenos envolvidos e suas interdependências.

Com base na literatura disponível, extraíram-se algumas informações relativas à anatomia e às propriedades da madeira, com vistas ao suporte para a metodologia empregada, bem como para fundamentar os resultados obtidos no presente trabalho.

2.5.1 Anatomia da madeira

➤ Composição do tecido lenhoso

Uma das grandes limitações práticas da madeira é a sua heterogeneidade, anisotropia e variabilidade. Nem mesmo dois pedaços de madeira de uma mesma espécie e indivíduo são absolutamente iguais. Essas diferenças, por sua vez, podem ser atribuídas às condições ecológicas do local de crescimento, à localização da amostra no tronco (altura, distância da medula, posição do anel de crescimento) e a defeitos da madeira, entre outros aspectos (Burger e Richter, 1991).

Segundo Marchiori (1988), caule e ramo, sob o ponto de vista ontogenético, constituem uma mesma estrutura, distinguindo-se apenas por aspectos morfológico-anatômicos de importância menor, decorrentes das diferentes intensidades de crescimento e de sua posição na árvore.

A composição do lenho, bem como a estrutura e organização de seus elementos constituintes, são fatores determinantes para as propriedades da madeira e sua aptidão a determinados usos (Eames e Macdaniels, 1953; Esau, 1959). Esses autores destacam, como principais aspectos, a porosidade e o diâmetro de vasos, o comprimento e o diâmetro de fibras, a abundância e a largura de raios.

De acordo com Burger e Richter (1991), as fibras são os elementos mais importantes no que diz respeito à resistência mecânica no lenho das Dicotiledôneas. Com relação aos vasos, devido ao grande diâmetro e paredes delgadas, eles são estruturas fracas, de modo que sua abundância, dimensão e distribuição também influem na resistência mecânica da madeira. O mesmo pode ser dito com relação ao parênquima axial, que, em faixas contínuas, pode reduzir consideravelmente a resistência mecânica da madeira. A relação entre raios e resistência mecânica resulta mais complexa; pode-se dizer, entretanto, que se duas madeiras apresentam igual peso específico, a que tiver maior proporção de tecido radial será a mais fraca.

➤ Defeitos da madeira

As anomalias e também as estruturas normais que possam desvalorizar, prejudicar, limitar ou impedir o aproveitamento da madeira são considerados defeitos. Defeitos na forma do tronco (tortuosidades e conicidade) e na estrutura anatômica (nós, grãos irregulares, lenho de reação e lenho juvenil) geralmente repercutem de forma negativa nas propriedades da madeira (Bodig e Jayne, 1982; Kollmann e Côté, 1968; Burger e Richter, 1991).

Gatto (2006) salienta que a conicidade, a excentricidade, a presença de nós e o índice de circularidade, por causarem desvios na grã, são os defeitos que mais afetam o vergamento da madeira.

A grã da madeira, bem como a própria estrutura submicroscópica da parede celular, refletem-se na resistência mecânica: quanto mais vertical a orientação das microfibrilas de celulose na lamela S_2 da parede secundária, maior a resistência à tração; quanto mais horizontal seu grau de inclinação, maior será a resistência a esforços de compressão (Burger e Richter, 1991).

De acordo com Panshin e Zeeuw (1970), verificam-se diferenças nas características da célula, bem como nas propriedades da madeira, quando se comparam lenho juvenil (localizado próximo à medula) com lenho adulto. Anatomicamente, o lenho juvenil caracteriza-se pelo progressivo aumento nas dimensões celulares e forma diferenciada das células, pela estrutura e disposição em sucessivas camadas de crescimento, bem como pela densidade baixa e menor resistência mecânica (Ramsay e Briggs, 1986).

O lenho de galhos e troncos inclinados, como observado em plantas de encostas montanhosas, em terrenos instáveis ou em situações sujeitas a grandes esforços para sustentação, como é o caso de copas frondosas ou com pesada carga de frutos, resulta anatomicamente distinto do normal, sendo genericamente designado como “lenho de reação” (Morey, 1980; Burger e Richter, 1991; Appezzato-da-Glória e Carmello-Guerreiro, 2003).

Nas Gimnospermas, o lenho de reação surge sempre na porção sujeita à compressão, ou seja, no lado inferior do tronco ou ramo (lenho de compressão); nas Angiospermas Dicotiledôneas, ao contrário, ele se localiza na zona tracionada ou superior, sendo, por isso, chamado de lenho de tração (Kollmann e Côté, 1968; Sjöström, 1981).

O lenho de tração encontra-se na parte correspondente ao maior raio de troncos e ramos excêntricos, apesar da excentricidade não ser condição necessária ou suficiente para sua existência; presente usualmente no lenho inicial, ele pode, no entanto, estar distribuído em todo o anel de crescimento, como em certas espécies de *Eucalyptus* (Bodig e Jayne, 1982; Amaral, 1970).

Ao microscópio, o lenho de tração é usualmente reconhecido pela presença de fibras “gelatinosas”. Estas, distinguem-se das fibras normais pelos seguintes aspectos: a) presença da camada “G”, que é parte integrante da parede secundária e cuja espessura pode ser igual ou maior do que a camada S₂; b) pelas fibrilas de celulose da camada G, que são orientadas paralelamente ao eixo da fibra; c) pelo elevado conteúdo de celulose e lignina praticamente ausente na camada G, responsável pela cor azul-esverdeada em lâminas tingidas com azul-de-azra e safranina (Kollmann e Côté, 1968; Burger e Richter, 1991).

Segundo a *International Association of Wood Anatomists* (IAWA, 1964), o lenho de tração é caracterizado anatomicamente pela ausência de lignificação na parede celular das fibras e, por vezes, pela presença da camada G. Este critério é considerado mais preciso do que a simples observação de fibras gelatinosas, pois certas madeiras, embora delas destituídas, exibem propriedades de lenho de tração.

De acordo com Eames e MacDaniels (1953), variações na composição química da parede celular (celuloses, hemiceluloses e lignina), bem como deposições de outras substâncias, podem ter grande influência em certas características da madeira. Amaral (1970) corrobora estes autores, ao considerar que diferenças na constituição físico-química das paredes celulares têm, por vezes, conseqüências tecnológicas infinitamente maiores do que a diferença na disposição dos tecidos lenhosos.

Um baixo teor de lignina, verificado também nas demais camadas da parede secundária de fibras gelatinosas, é característica constante em todas as Angiospermas (Bodig e Jayne, 1982; Amaral, 1970; Kollmann e Côté, 1968; Sjöström, 1981; Burger e Richter, 1991). A lignina, que é depositada sobre a parede celular de fibras e traqueídeos, tem a função de torná-la rígida (Morey, 1980).

Kollmann e Côté (1968), Cutter (1971) e Morey (1980) referem a presença de vasos pouco numerosos e de pequeno diâmetro no lenho de reação. Dadswell e Wardrop (1949) encontraram menores comprimentos dos elementos celulares neste tipo de lenho, em diversas espécies.

De acordo com Morey (1980), a influência da gravidade é fato experimentalmente comprovado na formação do lenho de reação. Em caules mantidos na posição ereta, ele normalmente está ausente, mas forma-se prontamente se o eixo for desviado em apenas 1 ou 2 graus da posição vertical. O importante papel exercido pelas auxinas na formação deste tipo especial de lenho, é também reconhecido por diversos autores.

Em conseqüência do lenho de tração, Burger e Richter (1991) referem os seguintes efeitos na madeira: difícil trabalhabilidade, grande instabilidade dimensional, elevada resistência a esforços de tração e baixa resistência à compressão e flexão. A presença da camada G nas fibras pode aumentar a densidade do lenho de tração em até 30% (Amaral, 1970; Bodig e Jayne, 1982). Para Marchiori (2004), a abundante presença de fibras gelatinosas no lenho de *Salix humboldtiana* constitui o principal fator responsável pela flexibilidade de seus caules.

Bodig e Jayne (1982) comentam que diferenças nas propriedades mecânicas entre lenho normal e lenho de reação devem ser atribuídas à variação no conteúdo de celulose. Abaixo do ponto de saturação das fibras, o lenho de reação apresenta menor resistência à compressão (paralela e perpendicular as fibras), além de um menor módulo de elasticidade e módulo de ruptura. Em madeira completamente saturada, o lenho de reação também se mostra menos resistente, comparado ao lenho normal.

2.5.2 Propriedades físicas e mecânicas da madeira

➤ Peso específico

Há uma tendência, recente, em substituir o termo peso específico por massa específica. Sem entrar no mérito dessa questão, optou-se, no presente estudo, por manter o primeiro dos referidos termos.

O peso específico, que em última análise reflete a composição química e o volume de matéria lenhosa por peso – é, talvez, a característica tecnológica mais importante da madeira, pois se correlaciona com outras propriedades físicas e mecânicas desse material (Amaral, 1970; Burger e Richter, 1991; Durlo, 1991).

A variação do peso específico entre espécies, entre indivíduos de uma mesma espécie ou, até mesmo, dentro de um mesmo indivíduo, deve-se a diferenças na composição do lenho, na espessura de paredes celulares e no teor de extrativos, bem como da posição em que a amostra de madeira foi extraída (sentido medula – casca, base – topo) e de condições de crescimento (Ferreira e Kageyama, 1978; Tomazello Filho, 1985; Burger e Richter, 1991).

Segundo Eames e MacDaniels (1953) e Burger e Richter (1991), o grau de resistência mecânica, estreitamente correlacionado ao peso específico, é altamente modificado pela estrutura histológica. As fibras libriformes e fibrotraqueídeos são os elementos mais importantes no que diz respeito à resistência mecânica no lenho das Dicotiledôneas. A estreita correlação entre volume de fibras, massa específica e resistência mecânica, é fato experimentalmente comprovado.

Trabalhando com *Salix viminalis* (Salicaceae) e algumas espécies do gênero *Calamus* (Arecaceae), Garay (2002) verificou que o caule de *S. viminalis*, por ter maior peso específico, resulta menos flexível em comparação com as demais espécies estudadas, pois é menor a flecha máxima, determinada nos testes de flexão estática.

A variação do peso específico no sentido medula-casca pode ocorrer da seguinte forma: a) cresce linearmente; b) decresce linearmente; c) decresce nos primeiros anos e cresce nos anos subsequentes; d) cresce no início, próximo à medula, permanece a seguir mais ou menos constante, podendo decrescer nas porções próximas à casca (Panshin e Zeeuw, 1970; Bodig e Jayne, 1982).

➤ Teor de umidade da madeira

É consenso entre os pesquisadores que o teor de umidade influi nas propriedades físicas e mecânicas da madeira. Segundo Garay (2002), sua resistência é menor em peças verdes, porém sua flexibilidade aumenta.

Em árvores recém-abatidas, a água pode atingir teores muito elevados na madeira. Nas resinosas, são comuns teores de umidade em torno de 100% (máximo de 300%), ao passo que nas folhosas, em condições idênticas, os valores são mais baixos (Amaral, 1970).

Para espécies de *Salix* e *Populus*, são referidos teores de umidade entre 85 – 105% (FAO, 1980).

➤ Flexibilidade do caule

Eames e MacDaniels (1953) afirmam que madeiras relativamente homogêneas, com raios lineares e fibras longas, retilíneas, fortemente justapostas, são as mais flexíveis.

Putz e Holbrook (1991 *apud* ARAÚJO, 2005) conduziram experimentos biomecânicos com caules de plantas lianescentes e arborescentes, chegando a seguinte conclusão: o caule das lianas apresenta maior flexibilidade e capacidade de torção. Os autores explicam que a ocorrência de xilema compartimentalizado, permeado por tecidos macios, resulta numa “estrutura em cabo”, que permite aliar resistência e flexibilidade.

Segundo Appezzato-da-Glória e Carmello-Guerreiro (2003), alguns caules, como os escandentes (liana ou cipós), apresentam crescimento distinto do normal, grande produção de parênquima, o que garante a flexibilidade necessária ao enrolamento, em busca de luminosidade adequada.

Um corpo sólido, quando submetido a determinada carga, sofre uma certa deformação. Quando esta carga é removida, o corpo tende a retornar à forma e a posição originais, o que se denomina elasticidade. Isto ocorre, no entanto, somente quando o esforço não excede o limite elástico (Parker, 1979).

Em testes de flexão estática, a determinação do módulo de elasticidade (MOE) pode ser feita com a parte reta da linha descrita pelas avaliações carga/deformação no limite de proporcionalidade ou limite elástico (Kollmann e Côté, 1968).

De acordo com estes mesmos autores, a propriedade elástica é característica dos corpos sólidos abaixo de um certo limite de esforço; acima deste, todavia, ocorrerão deformações plásticas até a ruptura. Nesse sentido, um corpo sólido é dito elástico quando a

deformação produzida devido à aplicação de uma carga abaixo do limite proporcional é completamente anulada após o relaxamento desta carga. Além do limite proporcional, as deformações sofridas pelo material são irreversíveis, plásticas.

A resistência de uma viga de madeira à ruptura é medida em termos de carga por unidade de área e expressa pelo módulo de ruptura (MOR). Este valor, quando calculado através de testes de flexão estática, exprime o esforço máximo nas fibras superiores e inferiores da seção transversal da viga ou do corpo-de-prova Wangaard (1950).

Weitzer *et al.* (1998) determinaram, em testes de flexão estática, o MOE e o MOR do caule de algumas espécies lenhosas, com vistas ao seu uso em Bioengenharia: *Alnus incana*, *Salix purpurea*, *Salix x rubens*, *Acer pseudoplatanus*, *Fraxinus excelsior*, entre outras. Independente da espécie considerada, os resultados mostraram que quanto maior o diâmetro dos caules, menores os valores do MOE e do MOR.

Em testes de flexão estática realizados com madeiras secas e sem defeitos, foram encontrados, pelo *United States Departmente of Agriculture* (USDA, 1999), coeficientes de variação entorno de 22% para o MOE e 16% para o MOR.

Para a realização de testes de flexão estática, com vistas ao estudo do caule de plantas para uso em Bioengenharia, Vollsinger *et al.* (2000) basearam-se na norma DIN 52186, que se utiliza de dois pontos de apoio e dois pontos de aplicação de carga, permitindo a redução da influência dos defeitos da madeira nos resultados.

Na Europa, para a determinação dos módulos de elasticidade e ruptura de algumas espécies utilizadas para fins biotécnicos, Weitzer *et al.* (1998) utilizaram cerca de 35 amostras de caules, com diferentes diâmetros para cada espécie.

Em estudo realizado com espécies do gênero *Salix*, Garay (2002) utilizou 10 corpos-de-prova por exemplar para a determinação de propriedades físico-mecânicas da madeira.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Considerações gerais

Para o estudo de *Phyllanthus sellowianus* Müll. Arg., *Sebastiania schottiana* (Müll. Arg.) Müll. Arg., *Salix humboldtiana* Willd. e *Salix x rubens* Schrank, coletou-se material no município de Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil.

A identificação botânica das espécies foi realizada a campo e, posteriormente, confirmada, com auxílio da literatura especializada. A coleta de material (caules e ramos) foi desenvolvida nos meses de verão, entre dezembro de 2005 e fevereiro de 2006.

As exsicatas, confeccionadas a partir do material coletado, foram incorporadas ao Herbário do Departamento de Ciências Florestais da Universidade Federal de Santa Maria (HDCF), com os seguintes registros: HDCF 5587 e 5588 (*Phyllanthus sellowianus*), HDCF 5591 e 5592 (*Sebastiania schottiana*), HDCF 5589 e 5590 (*Salix humboldtiana*), HDCF 5593 e 5594 (*Salix x rubens*). As amostras do caule, destinadas à descrição anatômica da madeira, foram anexadas à Xiloteca do Departamento de Ciências Florestais, com os mesmos números de registro.

3.2 Caracterização da região do estudo

O trabalho foi desenvolvido em Santa Maria (29^o 47' S e 53^o 34' O), município localizado na região fisiográfica da Depressão Central, no centro do Rio Grande do Sul, Brasil (Figura 7).

Os exemplares de *S. x rubens* foram coletados em diferentes pontos da cidade de Santa Maria; para as demais espécies (*P. sellowianus*, *S. schottiana* e *S. humboldtiana*), escolheu-se, como ponto de coleta, a localidade de Passo do Verde, às margens do rio Vacacaí, a 25 km ao sul da referida cidade (Figura 7).

A Depressão Central é uma região fisiográfica com predominância de sedimentos arenosos e argilosos do Permiano e Triássico (Lemos *et al.*, 1973), com relevo levemente ondulado, entre 10 e 100 metros de altitude, exceto nos tabuleiros de arenito, que chegam a 300 metros (Rambo, 2005). O clima da região, segundo a classificação climática de Köppen, enquadra-se no tipo “Cfa” (subtropical úmido).

No município de Santa Maria, o índice de precipitação oscila de 1.500 a 1.700 mm, distribuídos regularmente ao longo do ano; os meses de novembro, dezembro e março, menos