

chuvosos, podem gerar déficits hídricos, com danos às plantas cultivadas. A temperatura média anual é de 19 °C (Moreno, 1961; Sartori, 1979).



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*.

Em linhas gerais, a Depressão Central apresenta dois tipos de vegetação: campestre e silvática.

Nos campos, encontram-se diversas espécies herbáceas, como *Paspalum notatum*, *P. plicatulum*, *P. dilatatum*, *Axonopus compressus*, *Andropogon lateralis*, *Desmodium incanum* e *Trifolium polymorphum* (Porto, 2002). Cabe agregar que, segundo Lindman (1906), os campos da Depressão Central nunca são totalmente destituídos de árvores. São também comuns os “capões de mato” e vassourais, com arbustos dos gêneros *Baccharis* e *Vernonia* (vassouras), que avançam lentamente sobre os campos.

A vegetação arbórea, classificada como Floresta Estacional Decidual, reúne árvores caducifólias, como *Apuleia leiocarpa* (grápia), *Parapiptadenia rigida* (angico-vermelho), *Enterolobium contortisiliquum* (timbaúva) e *Cordia trichotoma* (louro-pardo), além de espécies perenifólias, como *Nectandra* spp., *Ocotea* spp., *Cordia americana* (guajuvira),

*Actinostemon concolor* (laranjeira-do-mato) e *Sorocea bonplandii* (cincho), entre outras (Quadros e Pillar, 2002). Na mata-de-galeria, predominam: *Sebastiania schottiana*, *Sebastiania brasiliensis*, *Calliandra brevipes*, *Terminalia australis*, *Phyllanthus sellowianus*, *Pouteria salicifolia* e *Salix humboldtiana*, entre outras (Marchiori, 2004).

### 3.3 Anatomia da madeira

Além da descrição microscópica propriamente dita, o estudo anatômico das madeiras de *Phyllanthus sellowianus*, *Sebastiania schottiana*, *Salix humboldtiana* e *Salix x rubens*, tem o objetivo de reconhecer alguns aspectos da estrutura anatômica (e sua provável variação em caules com diferentes diâmetros) que podem influenciar na flexibilidade e resistência dos mesmos.

As ilustrações referentes à preparação do material, desde a coleta até a confecção de lâminas anatômicas de madeira, estão reunidas na Figura 8.

#### 3.3.1 Coleta de material e confecção dos corpos-de-prova

Para cada espécie, foram selecionados 2 indivíduos de diferentes dimensões (Figura 8A). Do caule de cada indivíduo, retirou-se um pequeno torete a 1,3 m do solo, com os seguintes diâmetros (Tabela 1).

Tabela 1 – Diâmetro do caule dos indivíduos, tomado a 1,3 m do solo.

Espécie	Diâmetro (cm)	
	Indivíduo 1	Indivíduo 2
<i>Phyllanthus sellowianus</i>	3,0	5,0
<i>Sebastiania schottiana</i>	3,0	7,0
<i>Salix humboldtiana</i>	3,0	7,0
<i>Salix x rubens</i>	3,0	6,8

De cada torete, foram confeccionados três corpos-de-prova de forma cúbica (cerca de 2 cm de lado), orientados para a obtenção de cortes histológicos nos planos anatômicos transversal – X, longitudinal radial – R e longitudinal tangencial – T (Figura 8B<sub>1</sub>). Outro pequeno bloco de madeira foi também retirado, com vistas à maceração (Figura 8B<sub>2</sub>).

Tanto os corpos-de-prova, como os blocos para maceração, foram obtidos da porção mais externa do lenho, próximo a região cambial.



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 laminas 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).

### 3.3.2 Lâminas histológicas

Para a observação da estrutura anatômica da madeira, foram confeccionadas 5 lâminas histológicas por indivíduo, contendo os três planos anatômicos.

A microtomia, realizada no Laboratório de Anatomia da Madeira da Universidade Federal do Paraná, seguiu a técnica padrão.

Os corpos-de-prova foram amolecidos por fervura em água durante 12 horas (Figura 8C) e, posteriormente, submetidos ao micrótomo de deslize, modelo Spencer, regulado para a obtenção de cortes anatômicos com espessura de 18  $\mu\text{m}$  (Figura 8D). Os cortes foram tingidos com acridina-vermelha, crisoidina e azul-de-astra (Figura 8E) e, em seguida, desidratados em série alcoólica ascendente (30%, 50%, 70%, 90%) e dois banhos em álcool absoluto (Figura 8F).

Usou-se xilol, para a diafanização dos cortes, e “Entellan” na montagem de lâminas permanentes (Figura 8G).

### 3.3.3 Lâminas de macerado

Para a mensuração do comprimento de fibras e de elementos vasculares, foram confeccionadas 3 lâminas de macerado por indivíduo.

A maceração, que consiste na individualização das células mediante a dissolução da lamela média, foi realizada pelo método de Jeffrey (Burger e Richter, 1991).

Os blocos destinados à maceração (Figura 8B<sub>2</sub>) foram previamente fervidos em água, com vistas à retirada completa do ar existente no interior da madeira. Em seguida, com o auxílio de um estilete, os blocos foram gradativamente reduzidos a pequenos “palitos”, com espessura em torno de 1 mm. Para a dissociação do tecido lenhoso, usou-se solução aquosa de ácido nítrico e ácido crômico, ambos a 10%, na proporção 1:1, em dois banhos sucessivos, com duração de 24 horas cada um.

Concluída a maceração, as células foram reunidas em papel de filtro, sobre um funil, onde foram tingidas com solução aquosa de safranina 1%.

As etapas de desidratação, diafanização e montagem de lâminas permanentes seguiram as mesmas orientações adotadas no preparo de lâminas histológicas, com a diferença de que as duas primeiras foram desenvolvidas sobre papel de filtro.

### 3.3.4 Fotomicrografias da madeira

O registro fotográfico da estrutura anatômica das madeiras foi feito em microscópio Olympus CX 40, com objetivas planas 10x / 0.25, 20x / 0.40 e 10x / 0.65, equipado com câmara digital Olympus Camedia C-3000 (Figura 8H).

### 3.3.5 Descrição e análise da estrutura anatômica da madeira

A descrição microscópica da madeira de *P. sellowianus*, *S. schottiana*, *S. humboldtiana* e *S. x rubens*, seguiu basicamente as recomendações do IAWA Committee (1989). Para tanto, examinou-se apenas a amostra de madeira do indivíduo de maior diâmetro, de cada uma destas espécies.

Na descrição, incluiu-se também a espessura da parede dos vasos, a altura e a largura de raios (expressos em micrômetros), bem como a percentagem dos tecidos constituintes da madeira.

Num primeiro momento, realizou-se uma análise da estrutura anatômica da madeira sob o enfoque taxonômico, onde foram confrontados elementos da descrição com referências da literatura. Posteriormente, para cada espécie (e com caules de diferentes dimensões), foi feita uma análise do ponto de vista tecnológico, na qual se comparou alguns caracteres anatômicos da madeira que, de acordo com a literatura, podem ter influência no seu comportamento físico-mecânico: fração dos tecidos constituintes da madeira (vasos, parênquima axial, raios e fibras); tipo, comprimento e espessura de parede das fibras; diâmetro, espessura de parede e comprimento de vasos; e dimensões de raios.

### 3.3.6 Medições e contagens microscópicas

Para a mensuração dos caracteres anatômicos da madeira, utilizou-se o programa Olympus MicroSuite (TM)-BASIC e um microscópio binocular Carl Zeiss.

O número de medições por característica anatômica seguiu as normas do IAWA Committee (1989), exceto para aquelas não contempladas na referida norma, tais como: a percentagem dos tecidos da madeira, a altura e largura dos raios e espessura da parede de vasos.

A determinação da percentagem dos tecidos constituintes da madeira seguiu a metodologia proposta por Marchiori (1980). A cada movimento aleatório do *charriot*, em

plano transversal, anotou-se o tipo de célula correspondente a um ponto predeterminado na escala graduada do microscópio. O número dessas coincidências, em cada 100 determinações, expressa diretamente a percentagem ocupada pelos distintos tipos celulares no tecido lenhoso. Para cada indivíduo, foram feitas 6 amostragens, cada uma com 100 determinações.

O número de medições de altura e largura de raios foi fixada em 25. Para a espessura de parede dos vasos, adotou-se o mesmo número de medições utilizado para a determinação do diâmetro do lume dos mesmos.

A frequência de vasos foi determinada com base em fotomicrografias impressas, num campo visual de 1 mm<sup>2</sup>. Todos os vasos inseridos completamente no referido campo foram contados como unidades; os que ultrapassaram a borda, foram considerados como meias unidades.

O comprimento de elementos vasculares, normalmente determinado em lâminas de macerado, foi medido em plano longitudinal tangencial.

### 3.3.7 Processamento e análise estatística dos dados

A análise estatística foi realizada com o uso do programa SPSS, versão 12.0. Para os caracteres quantitativos, utilizados na descrição microscópica das madeiras, determinou-se o valor mínimo e máximo, a média e o desvio padrão (IAWA Committee, 1989); foi também calculado o coeficiente de variação, expresso em percentagem.

Para a comparação de determinados caracteres quantitativos do lenho, confeccionou-se gráficos do tipo “boxplot”, conforme exemplificado na Figura 9.

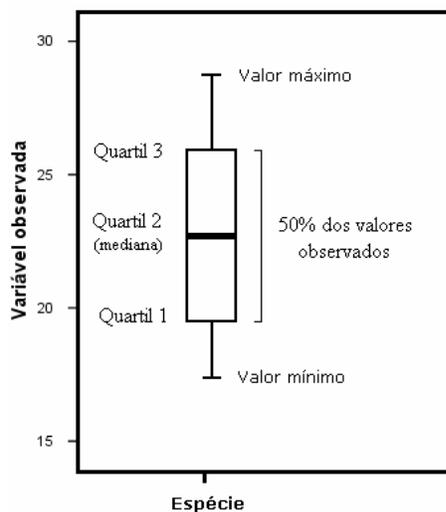


Figura 9 – Interpretação do gráfico “boxplot”.

### 3.4 Flexibilidade do caule

Para o estudo da flexibilidade dos caules de *Phyllanthus sellowianus*, *Sebastiania schottiana*, *Salix humboldtiana* e *Salix x rubens*, determinou-se, através de testes de flexão estática, os seguintes parâmetros: módulo de elasticidade (MOE), módulo de ruptura (MOR) e ângulo de flexibilidade.

As principais etapas desenvolvidas desde a coleta de material até a realização dos referidos testes, estão ilustradas na Figura 10 e serão descritas em seguida.



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).

#### 3.4.1. Coleta de material e confecção de corpos-de-prova

Os caules destinados aos testes de flexão estática foram obtidos de diversos exemplares, de cada uma das espécies em estudo.

Na coleta de material (Figura 10A), selecionou-se indivíduos saudáveis, com caules retíneos e de seção transversal circular, bem como livres de nós, bifurcações e apodrecimentos. A observação destas características buscou-se reduzir a heterogeneidade dos

caules (corpos-de-prova), tendo-se em vista que os mesmos serão submetidos aos testes de flexão estática ainda “verdes”, em sua forma cilíndrica e com casca (Figura 10B).

Foram obtidos, para cada espécie, 50 corpos-de-prova de diferentes dimensões (Figura 10B). O diâmetro máximo dos corpos-de-prova foi definido em função das características da máquina de ensaio utilizada nos testes de flexão estática, mas também pela disponibilidade do material em estudo.

Levando-se em conta que máquina de ensaios permite uma regulação máxima de 100 cm de distância entre os cabeçotes de apoio (Figura 10D), e, como a distância entre estes deve ser, no mínimo, 14 vezes maior do que o diâmetro do corpo-de-prova, tomado em sua porção mediana (Kollmann e Côté, 1968; COPANT, 1972), o diâmetro máximo passível de ser testado foi de 7 cm. Como diâmetro mínimo dos corpos-de-prova, adotou-se o valor de 1 cm.

Para *P. sellowianus* e *S. schottiana* (espécies arbustivas), não foram observados, na área de coleta, indivíduos com caules de diâmetro superior a 5 e 6 cm, respectivamente; para *S. humboldtiana* e *S. x rubens*, ao contrário, diâmetros maiores foram encontrados com relativa facilidade.

Para evitar perda de umidade, no período compreendido entre a coleta e os testes de flexão estática (cerca de 24 horas), os corpos-de-prova foram acondicionados em sacos plásticos (Figura 10C).

### 3.4.2 Testes de flexão estática

Os testes de flexão estática foram realizados no Laboratório de Tecnologia da Madeira da Universidade Federal de Santa Maria. Para tanto, utilizou-se uma Máquina Universal de Ensaio, hidráulica, com capacidade de 20 toneladas, provida de dois cabeçotes para o apoio de corpos-de-prova e apenas um cabeçote para aplicação de carga (Figura 10D). A metodologia utilizada baseou-se em norma da *American Society for Testing na Materials - ASTM D143* (ASTM, 2000).

Em testes preliminares, constatou-se que os corpos-de-prova (sobretudo os de casca mais espessa) tinham sua casca esmagada pelo cabeçote de aplicação de carga. Portanto, o deslocamento inicialmente gerado era, na verdade, o resultado da casca em processo de esmagamento. Para evitar este tipo de problema, cada corpo-de-prova teve sua casca previamente retirada, apenas na área de contato com o cabeçote de aplicação de carga. Em seguida, os mesmos foram assentados na máquina de ensaio e submetidos a carga (Figura 10D).

### 3.4.2.1 Determinação do módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade, gerado automaticamente pelo computador acoplado à máquina de ensaio, foi determinado através da porção retilínea da linha descrita pelas avaliações carga/deformação no limite elástico (Kollmann e Côté, 1968). Como os corpos-de-prova apresentam seção transversal cilíndrica, utilizou-se a seguinte fórmula:

$$MOE = \frac{4}{3\pi} \times \frac{\Delta P_{LP}}{\Delta D_{LP}} \times \frac{L^3}{d^4}$$

em que:

$MOE$  = módulo de elasticidade (kgf/cm<sup>2</sup>)

$P_{LP}$  = carga no limite proporcional (kgf)

$L$  = distância entre apoios (cm)

$D_{LP}$  = deslocamento ou flecha no limite proporcional (cm)

$d$  = diâmetro do corpo-de-prova (cm)

### 3.4.2.2 Determinação do módulo de ruptura

Em função das características da máquina de ensaio utilizada, o registro da carga máxima teve de ser obtida manualmente. Para o cálculo do módulo de ruptura, usou-se a seguinte fórmula:

$$MOR = \frac{8}{\pi} \times \frac{(P_{MAX} \times L)}{d^3}$$

em que:

$MOR$  = módulo de ruptura (kgf/cm<sup>2</sup>)

$P_{MAX}$  = carga máxima (kgf)

$L$  = distância entre apoios (cm)

$d$  = diâmetro do corpo-de-prova (cm)

### 3.4.2.3 Determinação do ângulo de flexibilidade

Cabe inicialmente comentar, que esta variável foi criada no presente trabalho com o objetivo de caracterizar, como o próprio nome sugere, a flexibilidade de caules e ramos.

Aplicado aos propósitos deste estudo, o ângulo de flexibilidade representa a capacidade máxima de dobramento ou curvamento de caules (*in natura*), quando submetidos, por exemplo, a força da água durante as cheias. A interpretação e a aplicação dessa nova variável, para fins práticos, será melhor esclarecida no item “Resultados e Discussão”.

Na Figura 11, podem ser visualizados os elementos necessários para a determinação do ângulo de flexibilidade.

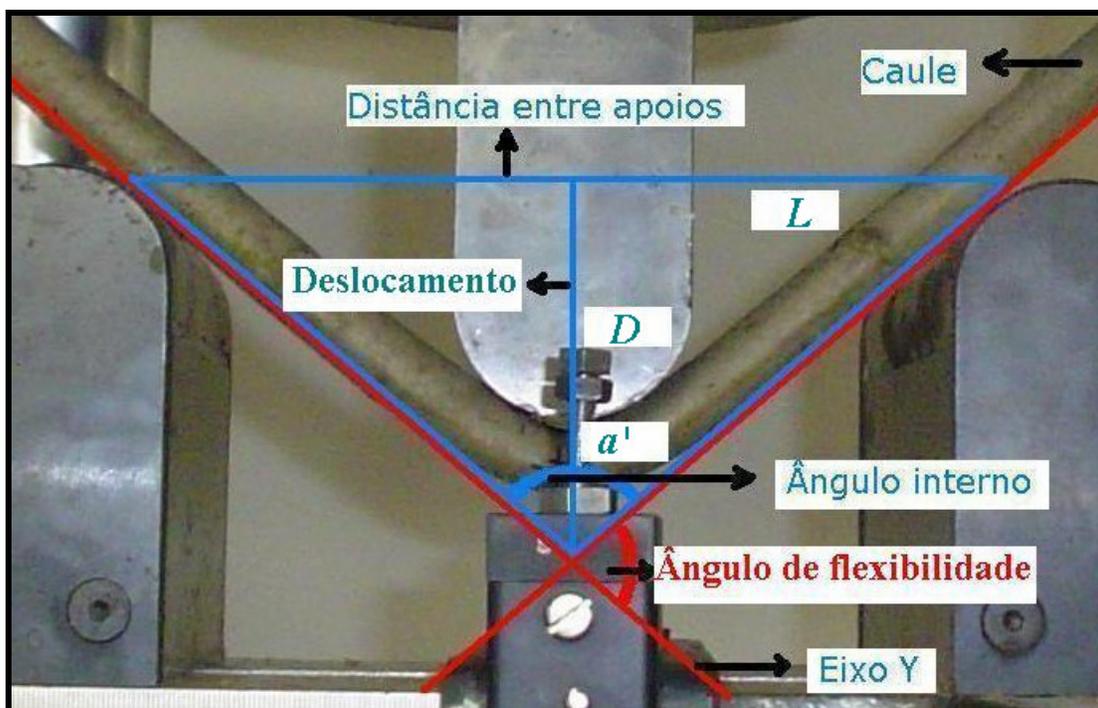


Figura 11 – Teste hipotético de flexão estática. Destaque para os elementos necessários para a determinação do ângulo de flexibilidade, em que:  $a'$  = ângulo interno/2;  $D$  = deslocamento ou flecha máxima;  $L$  = distância entre apoios/2 (Foto: Luciano Denardi).

Como pode ser observado na Figura 11, o ângulo de flexibilidade é formado pelo curvamento de meia haste do caule em relação ao “eixo Y” (que representa, hipoteticamente, o caule em posição vertical).

É importante comentar, que esta variável é obtida no momento da ruptura do corpo-de-prova, ou seja, quando o deslocamento for máximo.

O “ângulo interno”, por assim dizer, foi utilizado apenas como artifício de cálculo para a obtenção do ângulo de flexibilidade. Para tanto, fez-se as seguintes deduções matemáticas:

considerando-se que:

$$a' = \text{ângulo interno} / 2 \quad (^\circ)$$

$$L = \text{distância entre apoios} / 2 \quad (\text{cm})$$

$$D = \text{deslocamento ou flecha máximo} \quad (\text{cm})$$

tem-se:

$$\tan a' = \frac{\text{cat.oposto}(L)}{\text{cat.adjacente}(D)}, \text{ o que resulta em apenas metade do ângulo interno, logo:}$$

$$\text{ângulo interno} = \arctan a' \times 2$$

então:

$$\hat{\text{Ângulo de flexibilidade}} = 180^\circ - \text{ângulo interno}$$

### 3.4.3 Determinação de outras variáveis

A partir de cada caule utilizado nos testes de flexão estática, confeccionou-se um novo corpo-de-prova, para a determinação de algumas variáveis que, de acordo com a literatura, podem ter influência na flexibilidade dos mesmos: espessura e proporção de casca, peso específico, teor de umidade e idade da madeira.

As principais etapas desenvolvidas para a obtenção das referidas variáveis, são ilustradas na Figura 12.

Os corpos-de-prova, obtidos mediante seccionamento transversal, foram extraídos a 5 cm da porção mediana dos caules (Figura 12A,B).