**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA**
**CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS**
**DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS FLORESTAIS**
**CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL**

# SOBREVIVÊNCIA E RESISTÊNCIA AO ARRANQUIO DE ESTACAS VIVAS DE CINCO ESPÉCIES REÓFITAS NATIVAS DO BIOMA MATA ATLÂNTICA

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**Junior Joel Dewes**

**Santa Maria, RS, Brasil**
**2016**

# SOBREVIVÊNCIA E RESISTÊNCIA AO ARRANQUIO DE ESTACAS VIVAS DE CINCO ESPÉCIES REÓFITAS NATIVAS DO BIOMA MATA ATLÂNTICA

**por**

**Junior Joel Dewes**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Florestal, Área de Concentração em Manejo de Bacias Hidrográficas, da Universidade Federal de Santa Maria, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Florestal.

**Orientador: Fabrício Jaques Sutili**

**Santa Maria, RS, Brasil**
**2016**

**Universidade Federal de Santa Maria**
**Centro de Ciências Rurais**
**Departamento de Ciências Florestais**
**Curso de Graduação em Engenharia Florestal**

A Comissão examinadora, abaixo assinada, aprova o Trabalho de Conclusão de Curso como requisito parcial para obtenção do grau de **Engenheiro Florestal.**

**SOBREVIVÊNCIA E RESISTÊNCIA AO ARRANQUIO DE ESTACAS VIVAS DE CINCO ESPÉCIES REÓFITAS NATIVAS DO BIOMA MATA ATLÂNTICA**

Elaborado por

**Junior Joel Dewes**

**Aprovado em 28 de novembro de 2016**

_____
**Fabrício Jaques Sutili, Dr. (UFSM)**
(Presidente/Orientador)

_____
**Luciano Denardi, Dr. (UFSM)**

_____
**Charles Rodrigo Belmonte Maffra, Msc. (UFSM)**

**Santa Maria, RS, Brasil**
**2016**

## DEDICATÓRIA

*À minha família, à minha mãe Márcia Inês, ao meu pai Renato Luís, à minha irmã Daila Carine e ao meu irmão Juliano Joel*

**AGRADECIMENTOS**

*A viabilização e concretização deste trabalho de conclusão de curso só foi possível graças ao trabalho e esforço conjunto de várias pessoas. Deste modo, em especial, agradeço:*

*- ao meu orientador Prof. Dr. Fabrício Jaques Sutili pela oportunidade concedida na área de Engenharia Natural, pela amizade, confiança e por todo aprendizado proporcionado. Meu muito obrigado!;*

*- ao Prof. Dr. Luciano Denardi por aceitar participar da banca examinadora e pela leitura minuciosa do trabalho elaborado;*

*- Ao Charles, pela orientação e pela aceitação em fazer parte da banca examinadora;*

*- à Rita, pela disponibilidade em ler e contribuir com sugestões valiosíssimas para o enriquecimento da parte escrita deste documento;*

*- ao Vinícius, ao Dione, à Tássia e à Paula pela ajuda no levantamento dos dados, tanto a campo quanto em laboratório;*

*- a minha família, que sempre me apoiou em todas as minhas escolhas e por ser minha fonte de inspiração e dedicação;*

*- a todas as demais pessoas, que de forma direta ou indireta, tornaram esse trabalho possível, contribuindo, desta forma, para minha formação profissional.*

*A profissão de Engenheiro Florestal é metade conhecimento, metade arte, somente a prática fará o mestre.*

*(Johann Heinrich Cotta)*

## RESUMO

### SOBREVIVÊNCIA E RESISTÊNCIA AO ARRANQUIO DE ESTACAS VIVAS DE CINCO ESPÉCIES REÓFITAS NATIVAS DO BIOMA MATA ATLÂNTICA

AUTOR: Junior Joel Dewes
ORIENTADOR: Fabrício Jaques Sutili

A Engenharia Natural é uma disciplina que pode combinar materiais construtivos vivos com materiais inertes, para proteção e estabilização de áreas instáveis. A utilização de plantas é essencial para o sucesso da Engenharia Natural. As características biotécnicas das plantas, especialmente os sistemas radiciais responsáveis pela estabilização geotécnica, devem ser pesquisados de modo aprofundado. Neste sentido, o objetivo deste trabalho foi investigar a sobrevivência e a resistência ao arranquio de estacas vivas de espécies reófitas nativas do Bioma Mata Atlântica, especificamente, *Phyllanthus sellowianus*, *Salix humboldtiana*, *Gymnanthes schottiana*, *Cephallanthus glabratus* e *Ludwigia elegans*. A área experimental está localizada na Universidade Federal de Santa Maria. O experimento foi instalado em outubro de 2015, em blocos ao acaso com 15 tratamentos (5 espécies e 3 densidades de plantio [1, 2 e 3 estacas por cova]) e 3 repetições. Os resultados apresentados referem-se a 8 meses de desenvolvimento das plantas. Foram observadas taxas de sobrevivência de 100% (*P. sellowianus* e *S. humboldtiana*), 83% (*G. schottiana*), 67% (*C. glabratus*) e 50% (*L. elegans*). O plantio de uma estaca por cova demonstrou, proporcionalmente aos plantios de duas e três estacas, valores mais altos de resistência ao arranquio. Para essa densidade, a resistência ao arranquio (N) de cada espécie estudada foi a seguinte: *S. humboldtiana* (709,0±264,2), *P. sellowianus* (454,0±154,8), *G. schottiana* (387,7±224,4), *C. glabratus* (273,3±174,2) e *L. elegans* (210,7±41,0). Os valores de resistência ao arranquio apresentaram correlação com a parte aérea, possibilitando o ajuste de equações relacionando estas duas variáveis. De acordo com os resultados preliminares obtidos é possível indicar o plantio de apenas uma estaca por cova, no entanto, mais estudos devem ser feitos.



**Palavras-chave:** Bioengenharia de Solos. Sistema radicial. Estabilização geotécnica.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Relação entre taxa de perda de solo e percentagem de área ocupada por raízes finas para diferentes tipos de sistemas radiciais (DISSMEYER & FOSTER, 1985 apud MORGAN & RICKSON, 1995).....16
Figura 2 - Variação no aumento da resistência ao cisalhamento do solo proporcionado pela presença de raízes das plantas (COPPIN & RICHARDS, 2007). .....17
Figura 3 - Representação esquemática dos efeitos mecânicos de ancoramento, escoramento e arqueamento em um talude pela presença de árvores (WANG & YENG (1974) apud MORGAN & RICKSON (1995).....18
Figura 4 - Exemplares de *P. sellowianus* no meio de um curso de água. Fotografia: Rita Sousa.....20
Figura 5 - Exemplares de *G. schottiana* dentro de um curso de água. Fotografia: Rita Sousa. .....21
Figura 6 - Exemplares de *S. humboldtiana* ocupando a margem de um curso de água. Fotografia: Rita Sousa.....22
Figura 7 - Exemplares de *C. glabratus* formando denso agrupamento em ambiente brejoso. Fotografia: Rita Sousa. .....23
Figura 8 - Exemplar de *L. elegans* em ambiente alagado. Fotografia: Rita Sousa....24
Figura 9 - Representação esquemática da distribuição das estacas com densidades de plantio de estacas vivas nos blocos de arranquio casualizados e época de realização dos ensaios (Adaptado de MAFFRA, 2016).....25
Figura 10 - Equipamento utilizado no arranquio de estacas vivas. .....27
Figura 11 - Casca e câmbio vascular de *P. sellowianus* danificados devido à proximidade física das estacas dentro da cova.....32
Figura 12 – Relação entre a resistência máxima ao arranquio (N) e a soma da área basal dos brotos (mm²) das cinco espécies reófitas estudadas. .....36
Figura 13 - Curvas médias de resistência ao arranquio das espécies em função do deslocamento (extração) das estacas do solo. A densidade de plantio é de uma planta por cova.....37
Figura 14 - Curvas médias de resistência ao arranquio das espécies em função do deslocamento (extração) das estacas do solo. A densidade de plantio é de duas plantas por cova.....38

Figura 15 - Curvas médias de resistência ao arranquio das espécies em função do deslocamento (extração) das estacas do solo. A densidade de plantio é de três plantas por cova. .....39
Figura 16 – Características médias por planta da parte aérea e da parte subterrânea das espécies em estudo. As colunas acima do eixo horizontal correspondem aos valores da parte aérea e os valores abaixo do eixo horizontal correspondem aos valores da parte subterrânea.....40

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Taxas de sobrevivência das estacas das espécies em estudo (NV = número de estacas vivas; NT = número total de estacas; % = percentagem de pega). .....29

Tabela 2 - Valores de resistência ao arranquio (N) obtidos para os diferentes tratamentos distribuídos em blocos. .....30

Tabela 3 - Resistência máxima média ao arranquio (N) por espécie e densidade de plantio. F (N) = Força máxima; Fp (N) = Força proporcional (F (N) / n° de estacas por cova); DP = Desvio padrão; CV = Coeficiente de variação. .....31

Tabela 4 - Análise de variância do experimento. CV = Causa de variação; GL = Graus de liberdade; SQ = Soma de quadrados; QM = Quadrados médios; $F_c$ = $F_{calculado}$; $F_t$ = $F_{tabelado}$. .....33

Tabela 5 - Correlação entre a resistência ao arranquio e a parte aérea das espécies em estudo. F = Força de arranquio (N); SDB = Soma do diâmetro de brotos (mm); SCB = Soma do comprimento de brotos (cm); SAB = Soma da área basal de brotos ($mm^2$); MSB = Massa seca de brotos; CMB = Comprimento médio de brotos (cm); DMB = Diâmetro médio de brotos (mm); AMB = Área média de brotos ($mm^2$); NB = Número de brotos (n). .....34

Tabela 6 - Características gerais das espécies estudadas. Parte aérea: NB = Número de brotos; SCB = Soma do comprimento de brotos; CMB = Comprimento médio de brotos; SDB = Soma do diâmetro de brotos; DMB = Diâmetro médio de brotos; SAB = Soma da área basal de brotos; AMB = Área basal média de brotos; MSB = Massa seca de brotos. Parte subterrânea: NR = Número de raízes; SCR = Soma do comprimento de raízes; CMR = Comprimento médio de raízes; SDR = Soma do diâmetro de raízes; DMR = Diâmetro médio de raízes; SAR = Soma da área de raízes; AMR = Área média de raízes; MSR = Massa seca de raízes. TMR = Tensão média de raízes. DE = Diâmetro da estaca. DP = Desvio padrão; CV = Coeficiente de variação. 1 Est. = uma estaca. 2 Est. = duas estacas. 3 Est. = três estacas. .....48

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|---|---|
| ANOVA | Análise de Variância |
| DBC | Delineamento Blocos ao Acaso |
| DIC | Delineamento Inteiramente Casualizado |
| EN | Engenharia Natural |
| LabEN | Laboratório de Engenharia Natural |
| UFSM | Universidade Federal de Santa Maria |

**SUMÁRIO**


**1 INTRODUÇÃO ..... 13**

1.1 OBJETIVO GERAL ..... 14

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS ..... 14

**2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA ..... 14**

2.1 ENGENHARIA NATURAL ..... 14

2.2 ESTABILIDADE DE TALUDES ..... 16

2.3 CARACTERIZAÇÃO DAS PLANTAS ..... 19

2.3.1 *Phyllanthus sellowianus* (Klotsch) Müll Arg. - (Phyllanthaceae) ..... 19

2.3.2 *Gymnanthes schottiana* Müll. Arg. – (Euphorbiaceae) ..... 20

2.3.3 *Salix humboldtiana* Willd. – (Salicaceae) ..... 21

2.3.4 *Cephallanthus glabratus* (Spreng.) K. Schum. – (Rubiaceae) ..... 22

2.3.5 *Ludwigia elegans* (Cambess.) H. Hara – (Onagraceae) ..... 23

**3 MATERIAIS E MÉTODOS ..... 24**

3.1 LOCAL DO EXPERIMENTO ..... 24

3.2 DESCRIÇÃO DA MÁQUINA DE ARRANQUIO ..... 26

3.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS ..... 27

**4 RESULTADOS E DISCUSSÃO ..... 28**

4.1 SOBREVIVÊNCIA DAS PLANTAS ..... 28

4.2 RESISTÊNCIA AO ARRANQUIO E DENSIDADE DE PLANTIO ..... 30

4.3 ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) ..... 33

4.4 CORRELAÇÃO ENTRE PARTE AÉREA E A RESISTÊNCIA AO ARRANQUIO ..... 34

4.5 CURVAS MÉDIAS DE RESISTÊNCIA AO ARRANQUIO ..... 37

**5 CONCLUSÃO ..... 42**

**6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS ..... 44**

# 1 INTRODUÇÃO

A Engenharia Natural é um subdomínio da Engenharia que tem objetivos técnicos, ecológicos e estéticos através da utilização de plantas ou partes de plantas (sementes, estacas, mudas) que podem ser combinadas, ou não, com materiais inertes (pedras, madeiras, geotêxteis), para o controle de processos erosivos. A Engenharia Natural serve como substituto, mas principalmente como complemento às soluções tradicionais de engenharia (SCHIECHTL, 1980).

As intervenções realizadas possuem a vantagem de aproveitamento de materiais construtivos encontrados no local da obra (plantas, pedra, madeira, solo, entre outros), apresentando, geralmente, custos de construção inferiores comparados com os métodos tradicionais da Engenharia (FERNANDES & FREITAS, 2011).

Devido à fácil adaptabilidade de implantação, as técnicas de Engenharia Natural são utilizadas na estabilização de taludes naturais, taludes rodoviários, margens fluviais, encostas, áreas costeiras e dunares, diques, aterros sanitários, assim como outros locais sob a ação de processos erosivos (ZEH, 2007).

O uso de plantas, sob o ponto de vista técnico para a solução de problemas de instabilidade geotécnica e controle de processos erosivos superficiais, caracteriza o principal diferencial da Engenharia Natural em relação a outras áreas técnicas. Desta forma, as plantas a serem utilizadas devem ser preferencialmente nativas do local da intervenção, uma vez que as chances de adaptação e posterior desenvolvimento são otimizadas (ZEH, 2007).

No entanto, a utilização de plantas como material construtivo em obras pressupõe o reconhecimento de algumas propriedades biotécnicas intrínsecas (SUTILI & GAVASSONI, 2012). Segundo DURLO & SUTILI (2014), além de outras propriedades biotécnicas a serem analisadas, deve-se optar por plantas que resistam à exposição parcial das raízes, possuam um sistema radicial resistente e volumoso, tenham capacidade de rebrota em eventuais quebras do ápice e ramos, resistam ao aterramento parcial, possuam rápido crescimento e propagação vegetativa. Do ponto de vista da estabilização geotécnica de taludes, o sistema radicial passa a ser uma das propriedades biotécnicas de maior importância.

Segundo Gray & Leiser (1982), as raízes das plantas aumentam a estabilidade dos solos, diminuindo as solicitações mecânicas atuantes sobre o talude.

Uma das formas de obtenção de valores indicativos da estabilidade do solo proporcionado pelas raízes das plantas é por meio de um teste de arranquio (FLORINETH, 2004). Segundo o mesmo autor, o teste de arranquio mede a força vertical ascendente necessária à extração da planta do solo.

## 1.1 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho teve como objetivo investigar a sobrevivência e a resistência ao arranquio das espécies reófitas *Phyllanthus sellowianus* (Klotsch.) Müll. Arg., *Gymnanthes schottiana* Müll. Arg., *Salix humboldtiana* Willd., *Cephallanthus glabratus* (Spreng.) K. Schum. e *Ludwigia elegans* (Cambess.) H. Hara nativas do Bioma Mata Atlântica.

## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar o efeito do plantio em diferentes densidades sobre a resistência ao arranquio das espécies em estudo;
- Estabelecer relações entre a parte aérea (brotos) com a resistência ao arranquio;
- Descrever o desenvolvimento aéreo e as características do sistema radicial das espécies em estudo;

# 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

## 2.1 ENGENHARIA NATURAL

O termo Engenharia Natural surgiu na Alemanha no ano de 1936, ano da criação do Departamento de Pesquisa em Engenharia Natural "*Forschungsstelle für Ingenieurbiologie*" pelo Inspetor – Geral de Estradas Alemãs, Fritz Todt (BISCHETTI et al., 2012). A primeira definição oficial do termo ocorreu em 1951, ano de publicação do livro *Ingenieurbiologie*, cujo autor é o engenheiro florestal Arthur V.

Kruedener, que naquele momento era o líder do instituto mencionado acima (SCHIECHTL & STERN, 1996).

A partir de então a Engenharia Natural sofreu uma ampla difusão principalmente na Europa Central. Atualmente também é muito aplicada nos Estados Unidos da América. Devido a esta ampla distribuição, o termo sofreu algumas variações conforme o país de aplicação. Os principais termos equivalentes para a Engenharia Natural são *Bioengenharia de Solos* (Estados Unidos da América), *Engenharia Biológica* (Alemanha, Áustria, Suíça e França) e *Engenharia Naturalística* (Itália). No Brasil é reconhecida pelo nome *Engenharia Natural* ou *Bioengenharia de Solos*. Apesar das variações terminológicas, é importante salientar que os princípios e conceitos aplicados em ambos os termos é o mesmo.

Para Kruedener (1951, apud Schiechtl & Stern, 1996), a Engenharia Natural vale-se do aproveitamento biológico, concentrando conhecimentos botânicos que são aplicados por meio de medidas de proteção e estabilização de taludes e encostas, margens de cursos de água, voçorocas, dentre outras. O mesmo autor relata ainda que a vegetação pode ser utilizada de forma combinada, ou não, com elementos inertes para o controle de processos erosivos e estabilização de solos.

Estas técnicas possuem baixo impacto ambiental e consideram essencialmente as propriedades biotécnicas das plantas na execução de intervenções (SAULI & CORNELINI, 2005). Além disso, o uso de plantas promove uma maior integração paisagística e estética, em comparação com soluções tradicionais que utilizem apenas materiais inertes (DURLO & SUTILI, 2014).

O emprego de plantas em técnicas de Engenharia Natural tem por objetivo a reconstituição de novas unidades ecossistemáticas e devolver a resiliência a ambientes degradados, impactando de forma positiva nas características geopedológicas, hidrológicas, florísticas, hidráulicas, faunísticas e paisagísticas do território (MENEGAZZI & PALMERI, 2013). As plantas também melhoram as propriedades mecânicas do solo, através do aumento da coesão e da resistência ao cisalhamento, contribuindo, desta forma, para o aumento da consolidação de massas de solo (GRAY & SOTIR, 1996).

## 2.2 ESTABILIDADE DE TALUDES

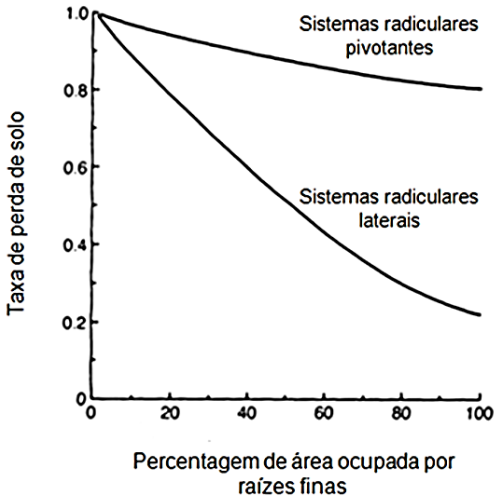
As plantas, através do sistema radicial, têm a capacidade de contribuir e melhorar a estabilidade de taludes devido à melhoria das propriedades de engenharia dos solos (COPPIN & RICHARDS, 2007; GRAY & SOTIR, 1996).

As plantas exercem estes efeitos por meio de funções hidrológicas e mecânicas (SOUSA, 2015). As principais funções hidrológicas que modificam a resistência dos solos são a evapotranspiração (redução da pressão neutra e retirada de água do solo) (COPPIN & RICHARDS, 2007) e a drenagem (redução da pressão neutra e diminuição do peso do solo) (SOUSA, 2015).

No entanto, a influência das raízes na estabilidade de taludes é expressa principalmente pelas funções mecânicas por elas desempenhadas. Entre as ações mais importantes desempenhadas pelas raízes estão o confinamento, reforço, ancoragem, arqueamento e escoramento do solo (SOUSA, 2015).

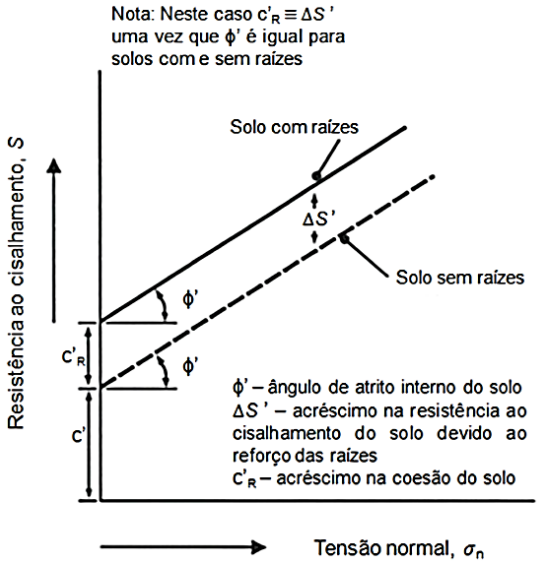
Ali & Osman (2008), Coppin & Richards (2007) e Morgan & Rickson (1995) afirmam que as raízes de menor diâmetro são as que confinam e estabilizam as partículas do solo, impedimento que as mesmas sejam erodidas e transportadas pela gravidade, pela água e/ou pelo vento. Conforme estes mesmos autores, as plantas com sistemas radiciais laterais e grande percentagem de raízes finas contribuem mais para a redução da perda de solo, em comparação com plantas de sistema radicial tipicamente pivotante, conforme pode ser observado na Figura 1.

Figura 1 - Relação entre taxa de perda de solo e percentagem de área ocupada por raízes finas para diferentes tipos de sistemas radiciais (DISSMEYER & FOSTER, 1985 apud MORGAN & RICKSON, 1995).



O reforço do solo pelo sistema radicial é obtido por meio de uma matriz solo-raízes (VENTI et al., 2003). Para Cecconi et al., (2012), Morgan & Rickson (1995) e Coppin & Richards (2007), um solo com grande quantidade de raízes tem as características mecânicas de um material composto, em que os dois elementos principais funcionam de maneira complementar, pois o primeiro (solo) tem elevada resistência à compressão enquanto o segundo (raízes) tem elevada resistência à tração. Na prática, a presença de raízes no solo constitui maior resistência contra as solicitações cisalhantes que normalmente ocorrem em taludes naturais ou artificiais (Figura 2).

Figura 2 - Variação no aumento da resistência ao cisalhamento do solo proporcionado pela presença de raízes das plantas (COPPIN & RICHARDS, 2007).




Com base na Figura 2 é possível observar que o ângulo de atrito interno do solo não sofre alteração, e o acréscimo na resistência ao cisalhamento do solo na presença de raízes é entendido como um aumento adicional na coesão do solo.

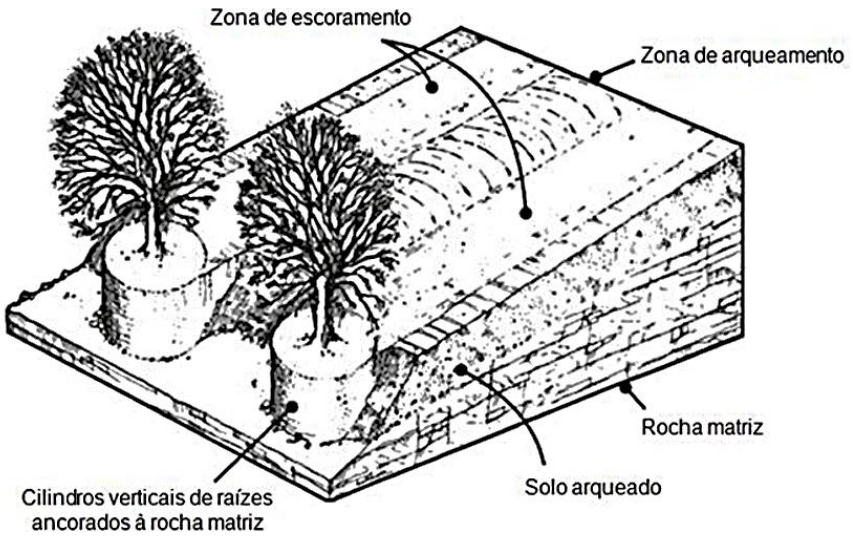
Desta forma, o efeito mecânico das raízes é o de contribuir no aumento da resistência do solo ao deslizamento (rotacional ou translacional), sendo este efeito mais pronunciado quanto maior for a concentração de raízes e sua distribuição lateral e em profundidade (MORGAN & RICKSON, 1995; NORRIS & GREENWOOD, 2006). Segundo os mesmos autores, somado à característica de reforço do solo, o efeito mecânico proporcionado pelas raízes também permite a transferência de cargas atuantes em zonas sobrecarregadas para zonas que estejam sob a ação de

solicitações de menor magnitude. Isto é garantido pela interação e atuação conjunta de um sistema semi-contínuo de raízes.

COPPIN & RICHARDS (2007) relatam que a magnitude do efeito mecânico de reforço do solo é função das propriedades das raízes, nomeadamente, densidade, resistência à tração, módulo de elasticidade, relação entre comprimento e diâmetro, alinhamento e angularidade e orientação da direção das tensões principais.

Além das ações de confinamento e reforço, as raízes das plantas também promovem ancoramento, arqueamento e escoramento da massa de solo. O ancoramento é bastante visível em espécies arbóreas, uma vez que a raiz principal e as raízes secundárias penetram várias camadas do solo (em profundidade), dependendo da permeabilidade, ancorando o solo ao talude e/ou rocha matriz (TSUKAMOTO, 1990; GRAY & LEISER, 1982), conforme pode ser observado na Figura 3.

Figura 3 - Representação esquemática dos efeitos mecânicos de ancoramento, escoramento e arqueamento em um talude pela presença de árvores (WANG & YENG (1974) apud MORGAN & RICKSON (1995).




O escoramento é aquele que ocorre a partir do cilindro ancorado pela planta, no sentido ascendente ou na direção do aclive do talude, como ilustrado na Figura 3. A extensão da capacidade do efeito de escoramento do solo em um talude depende da profundidade das camadas de solo, do nível do lençol freático e da capacidade das raízes em penetrar a rocha-matriz (GRAY, 1978 apud COPPIN & RICHARDS, 2007).

O arqueamento é o aumento da resistência do solo causado lateralmente, entre duas plantas. A magnitude do arqueamento é função do espaçamento, alinhamento, diâmetro e encaixe das árvores, espessura e inclinação das camadas do talude, bem como das propriedades de resistência dos solos (COPPIN & RICHARDS, 2007).

## 2.3 CARACTERIZAÇÃO DAS PLANTAS

### *2.3.1 Phyllanthus sellowianus* (Klotsch) Müll Arg. - (Phyllanthaceae)

Arbusto caducifólio nativo de 2 – 3 metros de altura com copa paucifoliada, apresentando numerosos ramos finos e delgados (KETTENHUBER, 2014). Uma diferenciação morfológica é a emissão de flores de dimensões reduzidas nas axilas das folhas (REITZ, 1988). Esta espécie é popularmente denominada de sarandi, sarandi-branco, filanto e sarandi-vermelho. A espécie reproduz-se facilmente por estacas, apresentando altas taxas de sobrevivência (DURLO & SUTILI, 2014). Os brotos caracterizam-se pela grande flexibilidade (SMITH et al., 1988) e as raízes pela sua resistência e volume (SOUSA et al., 2016).

É uma espécie bastante apropriada para a solução de problemas de estabilização hidráulica de margens de cursos de água e taludes de reservatórios de barragens. Pode ser utilizada para o controle de processos erosivos superficiais, desde que plantada em altas densidades, devido à copa bastante ramificada com folhas grandes, mas em pequenas quantidades. Também pode ser empregada para solucionar problemas de instabilidade geotécnica (SOUSA et al., 2016).

Por ser uma espécie reófita, esta espécie costuma ocorrer, na maioria das vezes, de forma descontínua nas margens de cursos de água, mas preferencialmente dentro do canal em pequenas ilhas e em corredeiras (REITZ, 1988), conforme se pode observar na Figura 4.

Figura 4 - Exemplares de *P. sellowianus* no meio de um curso de água. Fotografia: Rita Sousa.

Nestes locais costuma ocorrer em associação com *Gymnanthes schottiana*, *Terminalia australis* e *Calliandra brevipes* (SMITH, 1988). Suporta variações grandes de umidade e seca, sendo capaz de sobreviver submersa por vários dias durante períodos de cheia (SOUSA et al., 2016).

### 2.3.2 *Gymnanthes schottiana* Müll. Arg. – (Euphorbiaceae)

Comumente conhecida por sarandi, sarandi-vermelho, amarilho, içaranduba. Esta espécie se caracteriza por ser um arbusto caducifólio de até 3,5 metros de altura, com indivíduos providos de numerosas brotações, copa paucifoliada e flexível. Possui flores pequenas de coloração amarelada com tamanho reduzido, assim como os seus frutos (MARCHIORI, 2000).

A espécie reproduz-se facilmente por estacas obtidas do caule e dos ramos mais jovens, apresentando taxas de sobrevivência altas e emissão de brotos e raízes vigorosas (DURLO & SUTILI, 2014). Esta espécie ocorre ao longo de margens e em ilhas dentro do curso de água, isolada ou combinada com outras espécies reófitas, distribuída geralmente de forma descontínua e irregular (MARCHIORI, 2000), como se pode observar na Figura 5. Suporta variações grandes de umidade e seca, sendo capaz de sobreviver submersa por vários dias durante períodos de cheia (DURLO & SUTILI, 2014).

Figura 5 - Exemplares de *G. schottiana* dentro de um curso de água. Fotografia: Rita Sousa.

Esta espécie pode ser empregada em obras de estabilização hidráulica de margens de cursos de água e taludes de reservatórios de barragens. Caso seja plantada em altas densidades, pode ser utilizada para o controle de erosão superficial. Esta espécie também pode ser utilização em estabilizações geotécnicas (SOUSA et al., 2016).

### *2.3.3 Salix humboldtiana* Willd. – (Salicaceae)

Esta espécie nativa é vulgarmente denominada de salseiro, salso, salgueiro. Trata-se de uma árvore caducifólia de até 20 metros de altura, provida de ramos delgados e flexíveis, com copa grande e pouco densa. A espécie possui alta capacidade de propagação vegetativa, com estacas oriundas de caules jovens e ramos. As taxas de sobrevivência são altas e a emissão de brotos e raízes descreve um desenvolvimento vegetativo rápido e vigoroso (SOUSA et al., 2016).

Sua ocorrência se dá ao longo de margens de cursos de água (Figura 6) de forma isolada ou em agrupamentos densos onde pode permanecer inundada por até vários meses seguidos (MOURA, 2002; CARPANEZZI et al., 1999).

Figura 6 - Exemplares de *S. humboldtiana* ocupando a margem de um curso de água. Fotografia: Rita Sousa.

*S. humboldtiana* é indicada para estabilização geotécnica de taludes, já que apresenta raízes que possibilitam a ancoragem em profundidade do solo. Não é indicada para implantações no meio ou no topo de taludes, devido ao seu porte arbóreo, o que pode levar ao aumento da sobrecarga. Em determinadas obras requer manutenção por meio de podas periódicas, com o intuito de manter um porte reduzido. Também possui aplicação para o controle de erosão superficial e estabilização hidráulica de taludes de cursos de água e margens fluviais de lagos de barragens (SOUSA et al., 2016).

### 2.3.4 *Cephallanthus glabratus* (Spreng.) K. Schum. – (Rubiaceae)

Também conhecido popularmente por sarandi, sarandi-colorado, sarandi-de-vela, esta espécie reófita nativa possui porte arbustivo, caducifólio ou semicaducifólio, com 3 a 5 metros de altura, apresentando muitos ramos formando uma copa pouco densa (SIEGLOCH et al., 2011). A espécie reproduz-se com facilidade por meio de estaquia (SOUSA et al., 2016).

Esta espécie cresce preferencialmente em ambientes úmidos de água parada, em regiões brejosas e de banhado, formando densos agrupamentos vegetativos (DELPRETE et al., 2004), como se pode observar na Figura 7.

Figura 7 - Exemplares de *C. glabratus* formando denso agrupamento em ambiente brejoso. Fotografia: Rita Sousa.

Seu uso é recomendado para estabilização hidráulica de margens e leitos de cursos de água, bem como de taludes de reservatórios de barragens. Também pode ser utilizada no controle de processos erosivos superficiais, desde que plantadas em altas densidades. Esta espécie possui aplicações na estabilização geotécnica de taludes (SOUSA et al., 2016).

### 2.3.5 *Ludwigia elegans* (Cambess.) H. Hara – (Onagraceae)

É uma espécie nativa de porte subarbustivo, perenifólia de até 1,80 metros de altura e muito ramificada (BERTUZZI, et al., 2011). Possui flores amarelas muito atrativas, cujo formato é em forma de cruz, dando origem ao seu nome comum de cruz-de-malta. A espécie reproduz-se facilmente por meio de estaquia, apresentando altos índices de pega (SOUSA et al., 2016).

Sua ocorrência se dá preferencialmente às margens de áreas cultivadas, e também é encontrada ao longo de cursos de água, canais de drenagem e açudes, beiras de caminhos e estradas (BERTUZZI et al., 2011), como se pode observar na Figura 8.

Figura 8 - Exemplar de *L. elegans* em ambiente alagado. Fotografia: Rita Sousa.

A espécie é adequada para o controle de processos erosivos superficiais, desde que plantada em altas densidades. Seu emprego também é indicado para estabilização hidráulica de margens de cursos de água e taludes de reservatórios de barragens (SOUSA et al., 2016).

# 3 MATERIAIS E MÉTODOS

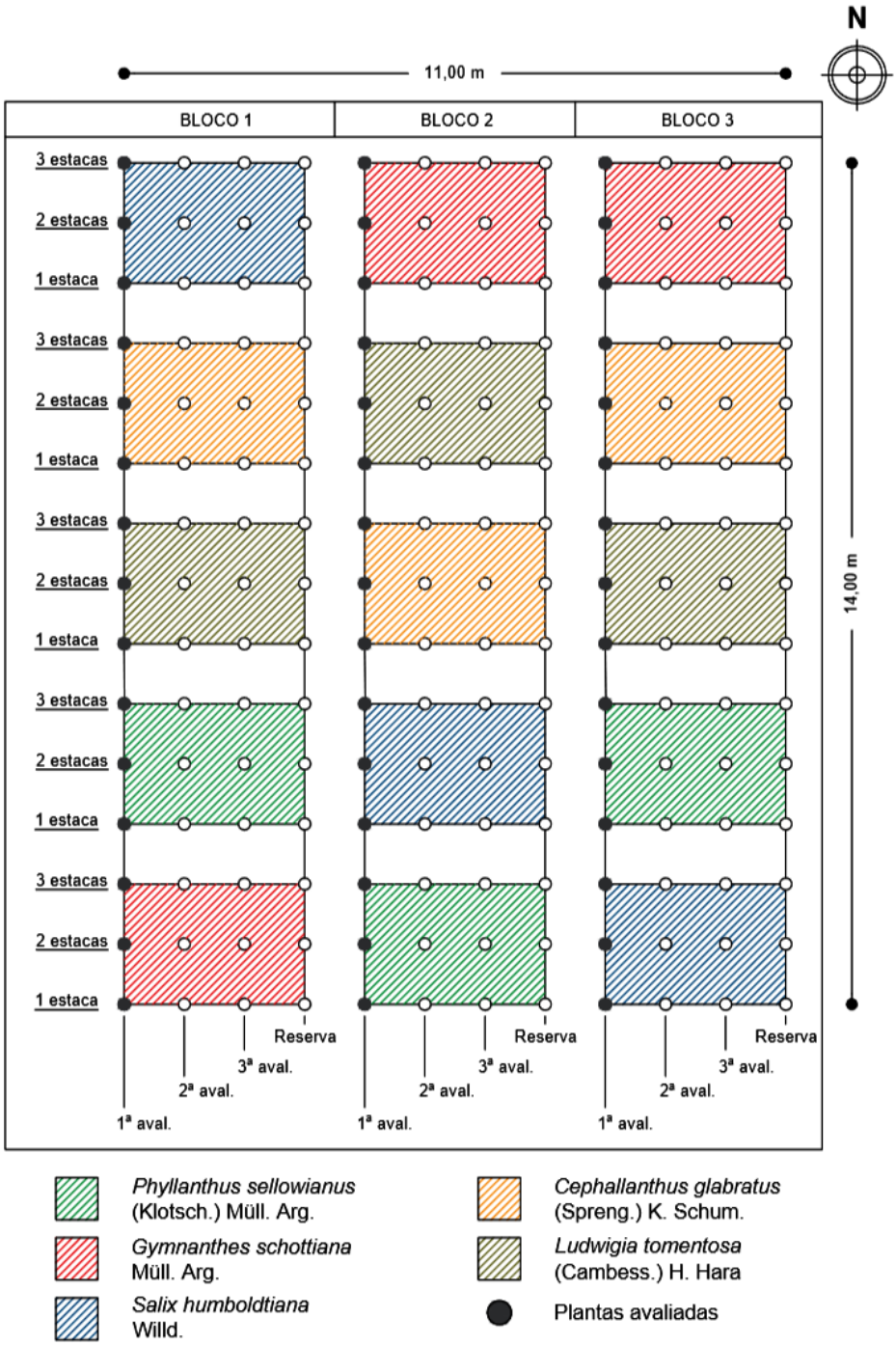
## 3.1 LOCAL DO EXPERIMENTO

A área experimental está localizada na Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), em Santa Maria, RS. O experimento foi instalado em outubro de 2015 e será conduzido durante 20 meses, com data de conclusão do trabalho previsto em maio de 2017. Por esta razão serão apresentados neste trabalho somente resultados parciais do experimento, correspondentes ao 1° arranquio.

O plantio das estacas foi executado em diferentes densidades, especificamente uma, duas e três estacas por cova. Em relação ao fator tempo serão realizados 3 arranquios, nomeadamente aos 8 meses, 14 meses e 20 meses após a instalação do experimento. As espécies reófitas nativas em estudo são *P. sellowianus*, *G. schottiana*, *S. humboldtiana*, *C. glabratus* e *L. elegans*. Os fatores e

seus níveis (tratamentos) foram considerados em 3 blocos (repetições) implantados na área, conforme pode ser observado na Figura 9.

Figura 9 - Representação esquemática da distribuição das estacas com densidades de plantio de estacas vivas nos blocos de arranquio casualizados e época de realização dos ensaios (Adaptado de MAFFRA, 2016).




A área experimental apresenta variações em relação às suas características do solo. Desta forma optou-se em utilizar o delineamento de blocos casualizados

(DBC), com o objetivo de reduzir uma eventual interferência no desenvolvimento das plantas. O experimento é do tipo fatorial em que estão envolvidos 3 fatores, nomeadamente densidade, tempo e espécie.

O preparo da área do experimento foi realizado através de roçada e capina manual. Tomou-se o cuidado de evitar o ataque de formigas cortadeiras (gênero *Atta*) comuns na região, por meio da aplicação de formicida comercial à base de fipronil.

A abertura das covas para o plantio das estacas foi executada com a ajuda de um trado mecânico motorizado. No total foram abertas 180 covas de 40 cm de profundidade e 20 cm de diâmetro. O espaçamento adotado entre uma cova e outra foi de 1,0 m x 1,0 m, totalizando 180 m². As estacas foram plantadas cuidadosamente na posição vertical e apresentavam diâmetro médio de 3,0 cm e comprimento de 60 cm.

Nas datas de avaliação, antes do arranquio, foram levantados a campo o número, comprimento e diâmetro da base dos brotos primários. Do sistema radicial foram anotados o número, diâmetro no ponto de ruptura, e comprimento de todas as raízes, bem como o diâmetro na base da estaca. Para obtenção da massa seca, o material vegetal da parte aérea e do sistema radicial foi colocado em estufa a 70$\pm$5 °C até peso constante.

Todas as espécies estudadas foram avaliadas quanto à resistência ao arranquio.

Em cada teste de arranquio procurou-se manter a uniformidade das condições de umidade do solo. Em cada arranquio foram arrancadas, por espécie, as plantas presentes em 9 covas (3 covas com uma estaca, 3 covas com duas estacas e 3 covas com três estacas), totalizando 18 estacas, conforme desenho esquemático representado na Figura 9.

## 3.2 DESCRIÇÃO DA MÁQUINA DE ARRANQUIO

O teste de arranquio foi realizado com auxílio de uma máquina constituída por um tripé metálico ajustável equipado com um guincho automotivo elétrico, conforme Figura 10.

Figura 10 - Equipamento utilizado no arranquio de estacas vivas.

O motor utilizado executa um torque contínuo e constante máximo de 2 kN. O equipamento também possui uma célula de carga com capacidade de 10 kN, um amplificador de frequência Scout 55 (para interpretar as leituras da célula de carga) e um laptop com um software específico para a leitura e armazenamento dos dados coletados.

## 3.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS

A análise dos dados foi realizada com o auxílio do software Microsoft Excel.

As taxas de sobrevivência das plantas de ambas as espécies foram submetidas ao teste Qui-quadrado ($x^2$), com nível de significância de 5%, com o intuito de verificar a existência, ou não, de diferença significativa entre os valores observados.

Os picos máximos de resistência ao arranquio foram agrupados em uma tabela para proceder à Análise de Variância (ANOVA) do experimento. Esta análise foi executada a fim de observar a eficiência do uso de blocos no controle da variância dos dados.

Os dados de resistência ao arranquio foram correlacionados com as características morfológicas da parte aérea, para posterior compilação e análise através de curvas de regressão com a variável ajustada.

As curvas características médias de resistência ao arranquio de cada espécie foram ajustadas para uma melhor compreensão do efeito das diferentes densidades de plantio. Esta análise foi complementada por meio da elaboração de uma tabela das características gerais de desenvolvimento, tanto da parte aérea como das raízes das plantas.

# 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

## 4.1 SOBREVIVÊNCIA DAS PLANTAS

A análise da taxa de sobrevivência das plantas para a Engenharia Natural é uma das variáveis de maior importância. Quanto maior é a taxa de sobrevivência das estacas ou mudas plantadas a campo, maior é a chance de sucesso das intervenções executadas.

A parte aérea destas estacas possui a função de proteger superficialmente o solo da ação da água da chuva e do vento, tendo ainda a função de retirar água do talude através da evapotranspiração, resultando em maior estabilidade ao local de intervenção. As raízes das plantas sobreviventes passam a cumprir a função de estabilização do solo, tanto de camadas superficiais quanto profundas, ancorando o solo à rocha-mãe (eficiente contra rupturas translacionais), ou ainda, ancorando o solo em profundidade superior à superfície potencial de ruptura (eficiente contra rupturas rotacionais).

A taxa de sobrevivência afeta também os custos de execução e manutenção de obras. Quanto maior forem as taxas de sobrevivência das plantas, menor será a quantidade de material a ser implantado para alcançar a densidade de plantio desejada, além de diminuir custos futuros com práticas de replantio.

A Tabela 1 apresenta a percentagem de sobrevivência das espécies em estudo, 8 meses após a data de implantação do experimento.

Os valores apresentados variam estatisticamente entre si pelo teste Qui-quadrado ($\chi^2$) em nível de significância de 5%.

Tabela 1 - Taxas de sobrevivência das estacas das espécies em estudo (NV = número de estacas vivas; NT = número total de estacas; % = percentagem de pega).

| ESPÉCIE | NV | NT | % |
|---|---|---|---|
| *Phyllanthus sellowianus* Müll. Arg. | 18 | 18 | 100 |
| *Salix humboldtiana* Willd. | 18 | 18 | 100 |
| *Gymnanthes schottiana* Müll. Arg. | 15 | 18 | 83 |
| *Cephallanthus glabratus* (Spreng.) K. Schum. | 12 | 18 | 67 |
| *Ludwigia elegans* (Cambess.) H. Hara | 9 | 18 | 50 |
| Média | 14 | 18 | 80 |

As espécies *P. sellowianus* (100%) e *S. humboldtiana* (100%) apresentaram resultados mais promissores de sobrevivência, seguido da espécie *G. schottiana* (83%), *C. glabratus* (67%) e *L. elegans* (50%). As três primeiras espécies apresentaram valores desejados, do ponto de vista prático, considerando uma taxa de pega mínima de 70% (SCHLÜTER, 1971). Sutili (2007), em execução de teste de resistência ao arranquio com estacas a campo, observou taxas de sobrevivência de 100% para *S. humboldtiana*, mais de 90% para *P. sellowianus* e 60% para a espécie *G. schottiana*.

As espécies *C. glabratus* e *L. elegans* apresentaram baixos índices de sobrevivência. Dewes et al. (2012) observaram taxas de sobrevivência para *C. glabratus* de 32% e 30% após 60 e 90 dias, respectivamente, da implantação dos testes de propagação vegetativa em casa de vegetação. Guimarães et al. (2014) observaram taxas de pega de 76% para *L. tomentosa* propagada em casa de vegetação e 88% para estacas plantadas em uma área de voçoroca.

Apesar das taxas de sobrevivência destas duas espécies serem baixas, este parâmetro não deve implicar na rejeição das mesmas para uso em obras de Engenharia Natural. Uma alternativa é aumentar a proporção de estacas plantadas, em relação às outras espécies, a fim de obter taxas de sobrevivência compatíveis com os objetivos técnicos e ecológicos a serem alcançados em intervenções biotécnicas.

A média global de sobrevivência das estacas (80%) apenas é importante considerar do ponto de vista prático de obras. Este valor é um bom indicativo do sucesso do plantio das estacas ou mudas durante a execução de intervenções à campo, servindo como parâmetro de base para o planejamento e realização de replantios. Do ponto de vista prático, 80% de sobrevivência das plantas à campo é considerando bom.

## 4.2 RESISTÊNCIA AO ARRANQUIO E DENSIDADE DE PLANTIO

O principal objetivo deste trabalho é analisar o efeito de diferentes densidades de plantio de estacas vivas sobre a resistência ao arranquio de algumas espécies reófitas nativas utilizadas em obras de Engenharia Natural.

Na Tabela 2 são apresentados os valores de resistência máxima ao arranquio para as espécies em estudo. Estes valores correspondem à força observada a campo para cada espécie após 8 meses de plantio.

Através dos dados referentes a média apresentados na Tabela 2 é possível observar uma tendência de aumento gradual da resistência ao arranquio conforme aumento da densidade de plantio. Esta tendência só não foi observada para a espécie *L. elegans* com densidade de plantio de duas estacas por cova em relação a uma estaca por cova. O aumento gradual da resistência ao arranquio acontece devido a uma maior quantidade de área superficial de estacas plantadas, o que por sua vez permite a emissão de uma maior quantidade de raízes por cova.

Tabela 2 - Valores de resistência ao arranquio (N) obtidos para os diferentes tratamentos distribuídos em blocos.

| **Tratamentos (i)** | | **Blocos (j)** | | | **Soma** | **Média** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | **1** | **2** | **3** | | |
| *P. sellowianus* | 1 estaca | 569 | 515 | 278 | 1362 | 454,0 |
| | 2 estacas | 1277 | 1005 | 517 | 2799 | 933,0 |
| | 3 estacas | 1403 | 1430 | 872 | 3705 | 1235,0 |
| *S. humboldtiana* | 1 estaca | 865 | 404 | 858 | 2127 | 709,0 |
| | 2 estacas | 1362 | 359 | 706 | 2427 | 809,0 |
| | 3 estacas | 1061 | 331 | 1061 | 2453 | 817,7 |
| *G. schottiana* | 1 estaca | 417 | 150 | 596 | 1163 | 387,7 |
| | 2 estacas | 335 | 268 | 582 | 1185 | 395,0 |
| | 3 estacas | 540 | 765 | 1058 | 2363 | 787,7 |
| *C. glabratus* | 1 estaca | 227 | 127 | 466 | 820 | 273,3 |
| | 2 estacas | 753 | 383 | 473 | 1609 | 536,3 |
| | 3 estacas | 865 | 838 | 380 | 2083 | 694,3 |
| *L. elegans* | 1 estaca | 258 | 188 | 186 | 632 | 210,7 |
| | 2 estacas | 134 | 214 | 122 | 470 | 156,7 |
| | 3 estacas | 244 | 183 | 222 | 649 | 216,3 |
| ∑ | | 10310 | 7160 | 8377 | 25847 | 574,4 |

Os testes de médias para a indicação dos melhores tratamentos não foram analisados neste trabalho. Isto se justifica, uma vez que a Engenharia Natural prioriza a diversidade florística e o uso múltiplo de espécies vegetais em obras, em detrimento de plantios com uma única ou poucas espécies. Concomitantemente, além das funções técnicas, as plantas empregadas devem trazer benefícios ecológicos e ecossistêmicos ao local em tratamento, condições estas mais facilmente alcançáveis com o uso de várias espécies vegetais em uma mesma intervenção.

Apesar do aumento gradual da resistência ao arranquio das plantas, este aumento não ocorreu de forma proporcional, ou seja, a resistência ao arranquio não duplicou e triplicou, de modo aproximado, com duas e três estacas por cova, respectivamente, conforme pode ser observado na Tabela 3.

Tabela 3 - Resistência máxima média ao arranquio (N) por espécie e densidade de plantio. F (N) = Força máxima; Fp (N) = Força proporcional (F (N) / n° de estacas por cova); DP = Desvio padrão; CV = Coeficiente de variação.

| ESPÉCIE | DENSIDADE (n°) | F (N) | Fp (N) | DP | CV |
|---|---|---|---|---|---|
| *P. sellowianus* | 1 estaca | 454,0 | 454,0 | 154,8 | 34,1 |
| | 2 estacas | 933,0 | 466,5 | 385,1 | 41,3 |
| | 3 estacas | 1235,0 | 411,7 | 314,7 | 25,5 |
| *S. humboldtiana* | 1 estaca | 709,0 | 709,0 | 264,2 | 37,3 |
| | 2 estacas | 809,0 | 404,5 | 509,4 | 63,0 |
| | 3 estacas | 817,7 | 272,6 | 421,5 | 51,5 |
| *G. schottiana* | 1 estaca | 387,7 | 387,7 | 224,4 | 57,9 |
| | 2 estacas | 395,0 | 197,5 | 165,4 | 41,9 |
| | 3 estacas | 787,7 | 262,6 | 259,7 | 33,0 |
| *C. glabratus* | 1 estaca | 273,3 | 273,3 | 174,2 | 63,7 |
| | 2 estacas | 536,3 | 268,2 | 193,0 | 36,0 |
| | 3 estacas | 694,3 | 231,4 | 272,6 | 39,3 |
| *L. elegans* | 1 estaca | 210,7 | 210,7 | 41,0 | 19,5 |
| | 2 estacas | 156,7 | 78,3 | 50,0 | 31,9 |
| | 3 estacas | 216,3 | 72,1 | 30,9 | 14,3 |

Para todas as espécies testadas, o plantio de uma estaca por cova, quando comparado ao plantio de duas e três estacas, demonstrou, proporcionalmente, conferir maior resistência ao arranquio. Um dos motivos pelos quais isso ocorreu foi devido à concorrência estabelecida entre plantas, quando plantadas em densidades maiores que uma estaca por cova.

Em análises visuais realizadas durante a execução do arranquio observou-se que as superfícies de contato entre estacas (caso de 2 ou 3 estacas por cova) emitiram menor quantidade de raízes em comparação ao lado oposto das mesmas (superfície livre). Em alguns casos ocorreu inclusive a morte de parte da casca e do câmbio, impossibilitando a emissão de raízes nestas regiões da estaca (Figura 11).

Figura 11 - Casca e câmbio vascular de *P. sellowianus* danificados devido à proximidade física das estacas dentro da cova.

Além do aspecto técnico de maior resistência proporcional ao arranquio, também é preferível o plantio de uma estaca por cova quanto ao aspecto econômico relacionado à mão de obra e coleta de material vegetal. O plantio em densidades maiores que uma estaca por cova acarreta na necessidade de coleta de maior quantidade de estacas vivas e, consequente, maior quantidade de mão de obra para o plantio.

Do ponto vista prático, em casos de projetos de grande magnitude, em que há pouca disponibilidade de material vegetal próximo ao local de intervenção, a busca por estacas precisa ser realizada a distâncias cada vez maiores, acarretando em um aumento significativo nos custos de coleta e transporte, o que por sua vez tem influência direta nos custos de execução de obras biotécnicas.

Os coeficientes de variação dos tratamentos mostraram-se altos a muito altos, exceto para a espécie *L. elegans* com densidade de uma estaca e três estacas por cova, baseado na classificação de Gomes (1985). A causa destes resultados pode ser a pequena quantidade de repetições do experimento, acarretando em observações com grande dispersão e a obtenção de médias pouco confiáveis.

## 4.3 ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA)

Na Tabela 4 é apresentada a Análise de Variância (ANOVA) para o experimento realizado.

Tabela 4 - Análise de variância do experimento. CV = Causa de variação; GL = Graus de liberdade; SQ = Soma de quadrados; QM = Quadrados médios; $F_c = F_{calculado}$; $F_t = F_{tabelado}$.

| CV | GL | SQ | QM | $F_c$ | $F_t$ |
|---|---|---|---|---|---|
| Blocos | 2 | 336446,2 | 168223,1 | 2,61 | 3,34 |
| Tratamentos | 14 | 4097522,6 | 292680,2 | 4,54 | 2,06 |
| Erro | 28 | 1804189,8 | 64435,3 | - | - |
| Total | 44 | 6238158,6 | - | - | - |

A partir dos dados obtidos para o $F_c$ ($F_{calculado}$) e $F_t$ ($F_{tabelado}$) é possível concluir que o uso de blocos (uma restrição) para a realização do experimento não foi eficiente. Desta forma, o Delineamento Inteiramente Casualizado (DIC) poderia ter sido empregado para a condução desta investigação científica a campo.

Os resultados demonstram que a resistência ao arranquio é pouco influenciada por mudanças de solo ou outras características do local, podendo possivelmente haver maior relação com a arquitetura, ângulo de inserção das raízes na estaca e resistência à tração individual, condicionada pelo arranjo e constituição anatômica das raízes.

A partir desta constatação, que ainda deverá ser confirmada em outros testes de arranquio, podem-se obter equações ajustadas dos valores de resistência ao arranquio para as espécies estudadas, assim como uma equação global para mais de uma espécie. Estas equações poderão possivelmente ser utilizadas para a rápida obtenção e, com precisão aceitável, da resistência ao arranquio de plantas empregadas em obras de Engenharia Natural (EN) executadas em diferentes locais.

Quanto aos tratamentos, estes apresentaram diferenças significativas entre si.

## 4.4 CORRELAÇÃO ENTRE PARTE AÉREA E A RESISTÊNCIA AO ARRANQUIO

Uma alternativa interessante para a obtenção prática e rápida da resistência ao arranquio de plantas é a determinação indireta usando a medição de características morfológicas da parte aérea. Isso é possível por meio de equações que descrevem a relação entre resistência ao arranquio (variável dependente) e características morfológicas das plantas (variáveis independentes). Preferencialmente, por questões de representatividade, essas relações devem ser estabelecidas a partir de medições de experimentos implantados a campo. Para esse tipo de determinação, o uso de variáveis morfológicas, além de serem de fácil obtenção, uma vez estabelecidas as relações representativas, não exigem a extração e consequente destruição da planta, podendo esta continuar a cumprir com a função de proteção e estabilização do solo.

Em estudos realizados por Weitzer et al. (1998), os autores afirmam que não existe uma relação significativa entre o volume e a altura da parte aérea das plantas com suas respectivas resistências ao arranquio. No entanto, Sutili (2007) obteve uma boa relação entre algumas variáveis da parte aérea com a resistência ao arranquio. Segundo o autor, o coeficiente de correlação que melhor se relacionou com o arranquio foi a área basal dos brotos (mm²) para a espécie *P. sellowianus* (0,77), *S. humboldtiana* (0,78) e *G. schottiana* (0,80). Em estudo similar realizado por Hörbinger (2013), a variável da parte aérea que melhor se relacionou com a resistência ao arranquio para *P. sellowianus* e *G. schottiana* também foi a área basal dos brotos (mm²), com um coeficiente de determinação de 0,83.

Na Tabela 5 são apresentadas as correlações obtidas entre diversas variáveis da parte aérea e a resistência ao arranquio para o presente experimento. Estas correlações foram obtidas através de valores observados das espécies em estudo.

Tabela 5 - Correlação entre a resistência ao arranquio e a parte aérea das espécies em estudo. F = Força de arranquio (N); SDB = Soma do diâmetro de brotos (mm); SCB = Soma do comprimento de brotos (cm); SAB = Soma da área basal de brotos (mm²); MSB = Massa seca de brotos; CMB = Comprimento médio de brotos (cm); DMB = Diâmetro médio de brotos (mm); AMB = Área média de brotos (mm²); NB = Número de brotos (n).

| | **SDB** | **SCB** | **SAB** | **MSB** | **CMB** | **DMB** | **AMB** | **NB** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **F** | 0,79 | 0,77 | 0,75 | 0,65 | 0,63 | 0,60 | 0,60 | 0,54 |

Apesar da pequena quantidade de repetições para as espécies, foi possível obter correlações significativas. Estes valores poderão possivelmente ser otimizados através do aumento do número de repetições por tratamento, o que acarretará na obtenção de uma média mais confiável, levando a um desvio padrão e coeficientes de variação menores.

Apesar da variável soma da área basal dos brotos não apresentar o maior coeficiente de determinação (0,75), optou-se por relacionar esta variável com a resistência ao arranquio. Estudos anteriormente realizados por Sutili (2007), Hörbinger (2013) e outras pesquisas em andamento realizadas pelo LabEN, que incluem inclusive algumas das espécies estudadas neste trabalho, mostraram que a variável soma da área basal dos brotos é a que proporciona as melhores correlações com a resistência ao arranquio.

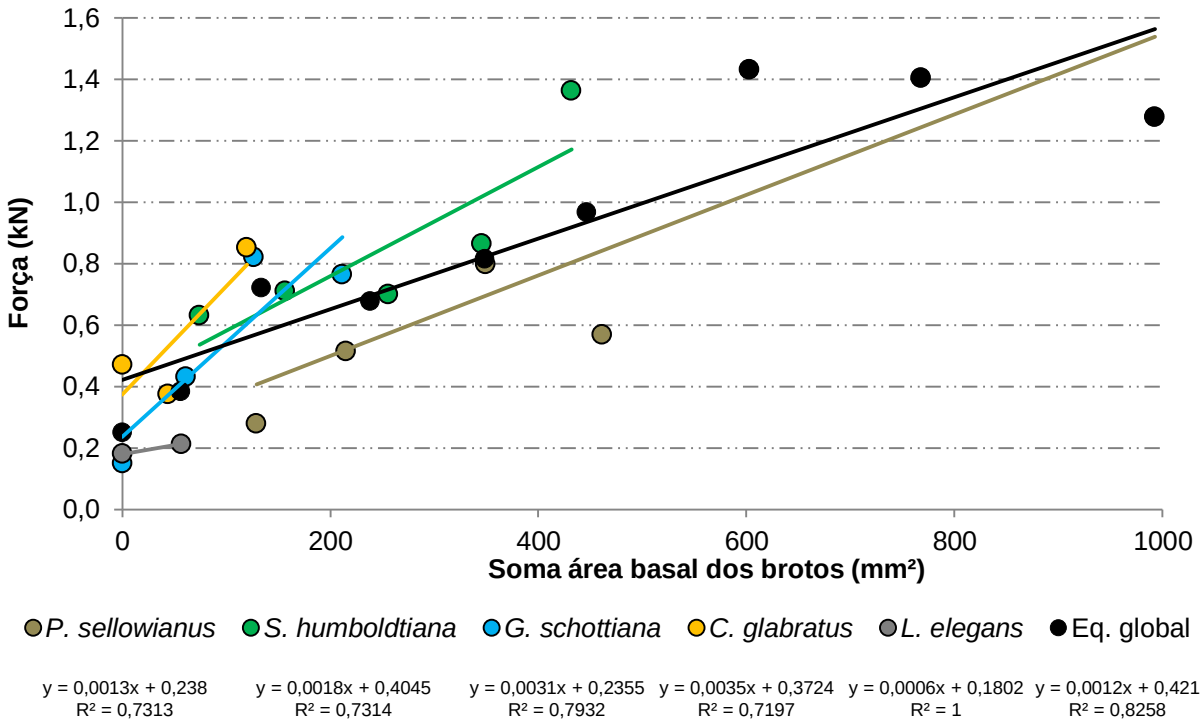
Na Figura 12 são apresentadas as relações entre a soma da área basal dos brotos ($mm^2$) e a resistência ao arranquio (kN). Os dados foram organizados em classes de soma de área basal dos brotos com amplitude de 100 $mm^2$, para que pudessem ser geradas equações para cada espécie separadamente e uma equação global pela união de todos os dados.

*P. sellowianus* (234,3±139,4) foi a espécie que apresentou a maior soma da área basal dos brotos, seguido de *S. humboldtiana* (111,5±84,7), *G. schottiana* (54,9±34,2), *C. glabratus* (41,6±25,2) e *L. elegans* (45,2±26,8). Isto se deve pela grande quantidade de brotos emitidos por planta pela espécie *P. sellowianus*, sendo superado somente pela espécie *G. schottiana*. No entanto, os diâmetros dos brotos de *P. sellowianus* foram superiores aos da espécie *G. schottiana*, resultando em uma área basal maior por planta, conforme pode ser observado na Figura 16 e também na Tabela 6 (Apêndice).

As espécies *C. glabratus* e *L. elegans* apresentaram, de modo geral, pequena quantidade de brotos com diâmetros reduzidos em comparação às demais espécies. As médias das classes para todas as espécies ficaram distribuídas, em sua maioria, até 400 $mm^2$ de área basal.

Devido à pequena quantidade de dados para a espécie *L. elegans*, pode-se organizar somente duas classes de dados, resultando em um coeficiente de determinação máximo. Portanto, esta análise mostrou-se insatisfatória para esta espécie.

Figura 12 – Relação entre a resistência máxima ao arranquio (N) e a soma da área basal dos brotos (mm²) das cinco espécies reófitas estudadas.




Para as características deste experimento, foi possível a obtenção de equações com altos coeficientes de correlação, o que demonstra uma forte correlação positiva entre a resistência ao arranquio e a soma da área basal dos brotos.

Verificou-se que as características de crescimento das espécies, bem como a relação de interdependência entre parte aérea e sistema radicial, permitem que determinações de resistência ao arranquio sejam simplificadas através da organização do conjunto de dados em classes de amplitudes iguais. Essa forma de organização foi empregada na soma de área basal de brotos e se mostrou muito promissora para obter informações rápidas e de precisão aceitável dos valores médios de resistência ao arranquio. Obviamente essas são informações prévias que podem ou não ser corroboradas em trabalhos futuros para todas as espécies estudadas.

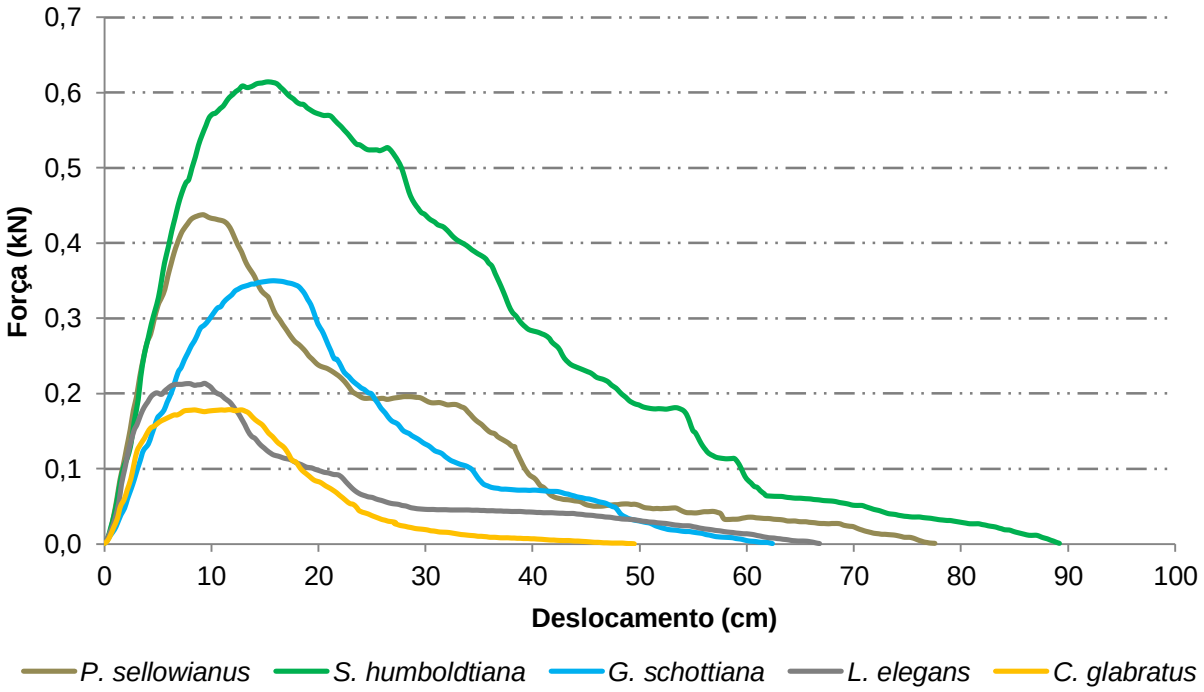
## 4.5 CURVAS MÉDIAS DE RESISTÊNCIA AO ARRANQUIO

Na Figura 13, Figura 14 e Figura 15 são apresentas as curvas médias de resistência ao arranquio em função do deslocamento das plantas obtidas para todas as espécies, com densidade de plantio de uma, duas e três estacas por cova.

De modo geral, a curva de arranquio aumenta rapidamente logo após o início da aplicação da força, alcançando um pico máximo para, em seguida, diminuir até ou próximo de zero.

A fase de aplicação de força antes do pico máximo representa a fase de alongamento das raízes e distribuição das tensões para raízes menos solicitadas. Quando a distribuição das tensões e o alongamento das raízes são máximos, cada esforço adicional resulta no rompimento das raízes e na passagem de uma situação elástica para uma plástica e alcança-se o pico máximo da curva, para em seguida ocorrer uma diminuição progressiva da força necessária ao rompimento das demais raízes ainda tensionadas.

Figura 13 - Curvas médias de resistência ao arranquio das espécies em função do deslocamento (extração) das estacas do solo. A densidade de plantio é de uma planta por cova.



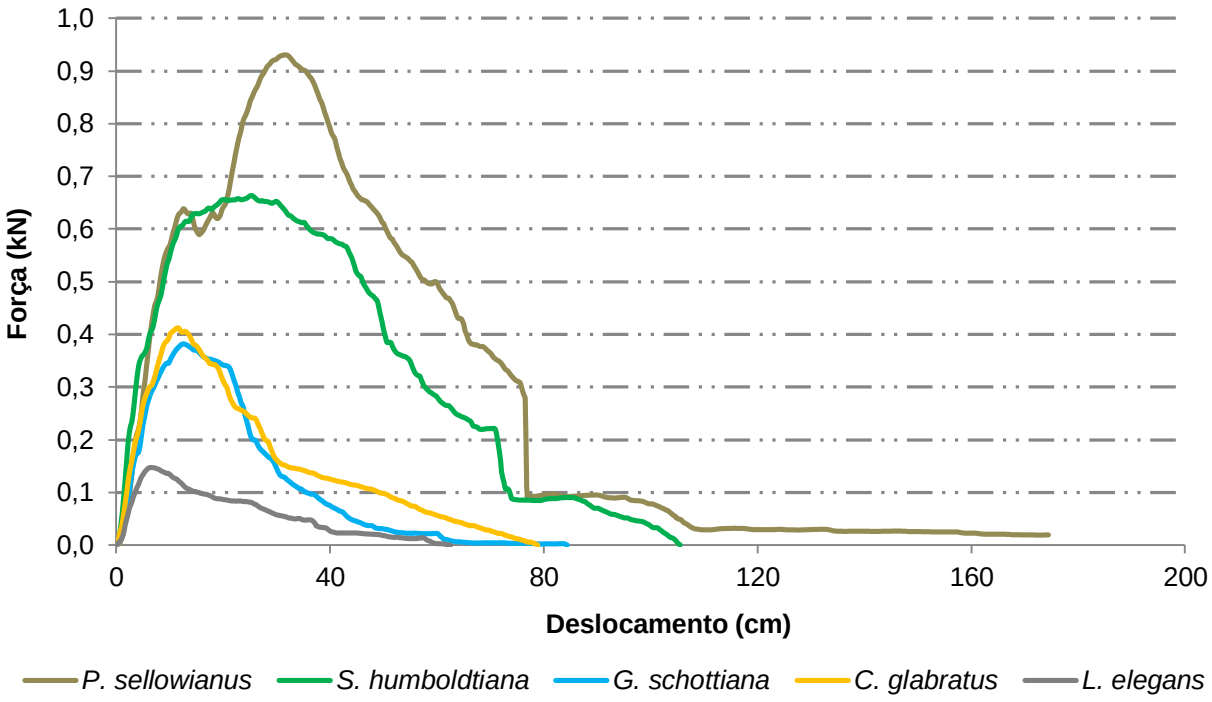

Para a densidade de uma planta por cova (Figura 13) a espécie *S. humboldtiana* apresentou o maior pico de resistência ao arranquio, pela combinação

de fatores como a grande quantidade de raízes (117,8) e a maior soma de área das raízes no ponto de ruptura (55mm²) produzidos em relação às demais espécies. No entanto, variáveis como a arquitetura e o tipo de raiz de cada espécie podem ter influenciado os resultados de resistência ao arranquio observados.

A espécie *G. schottiana* apresentou menor resistência ao arranquio em comparação com a espécie *P. sellowianus*, o que resulta possivelmente de uma menor quantidade de raízes para *G. schottiana*, já que os diâmetros das raízes são os mesmos para as duas espécies (0,7 mm).

*L. elegans* e *C. glabratus* apresentaram resultados parecidos, com um pico máximo ligeiramente maior para a primeira espécie. Isto decorre da presença de uma grande quantidade de raízes e de um comprimento total de raízes muito superior para *L. elegans* em comparação à *C. glabratus*, resultando em uma alta área superficial específica e maior resistência por atrito (Tabela 6).

Figura 14 - Curvas médias de resistência ao arranquio das espécies em função do deslocamento (extração) das estacas do solo. A densidade de plantio é de duas plantas por cova.

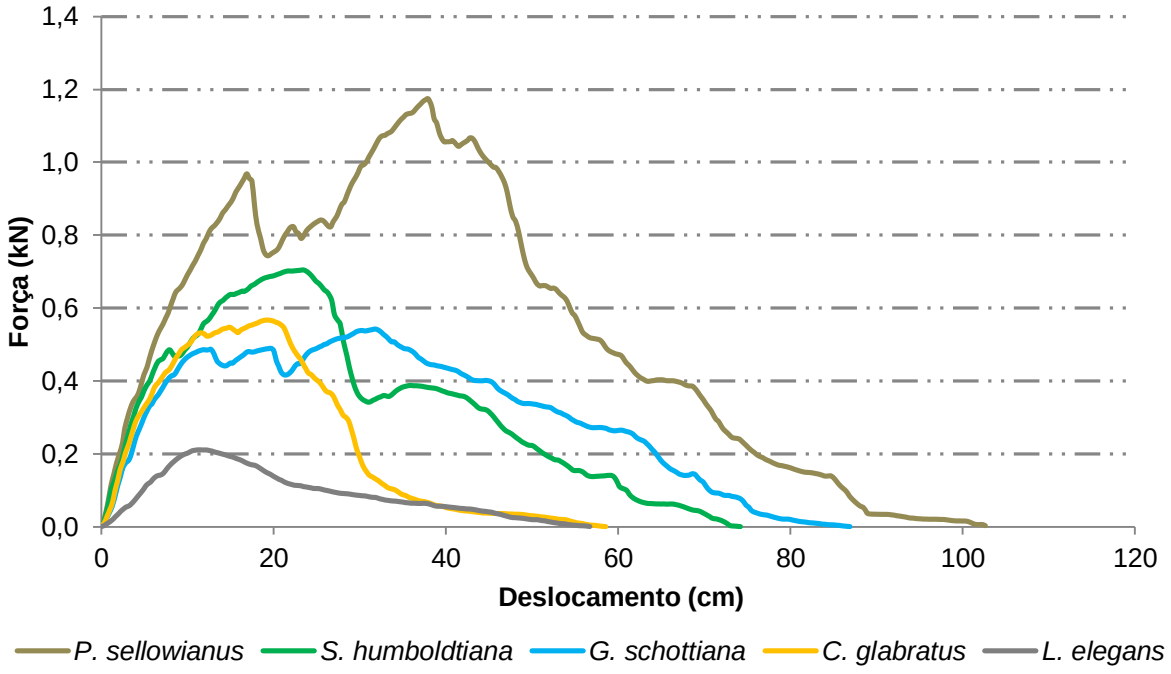



Os resultados para o plantio de duas estacas por cova (Figura 14) apresentaram resultados diferentes dos anteriores. *P. sellowianus* apresentou os maiores picos de resistência ao arranquio, seguido de *S. humboldtiana*. Esta inversão do comportamento das curvas entre as duas espécies ocorre,

possivelmente, devido à competição maior entre os sistemas radiciais das plantas da espécie *S. humboldtiana* como se pode observar após extração das estacas do solo.

O mesmo comportamento para o sistema radicial ocorre com a espécie *G. schottiana* que apresentou resultados similares à espécie *C. glabratus*. O plantio de duas estacas por cova aparentemente também prejudica o desenvolvimento do sistema radicial de *L. elegans*, evidenciado pela apresentação de um pico máximo menor em relação ao plantio de uma estaca por cova.

Figura 15 - Curvas médias de resistência ao arranquio das espécies em função do deslocamento (extração) das estacas do solo. A densidade de plantio é de três plantas por cova.




Os resultados para as espécies plantadas com densidade de três estacas por cova (Figura 15) mostraram-se similares aos apresentados anteriormente.

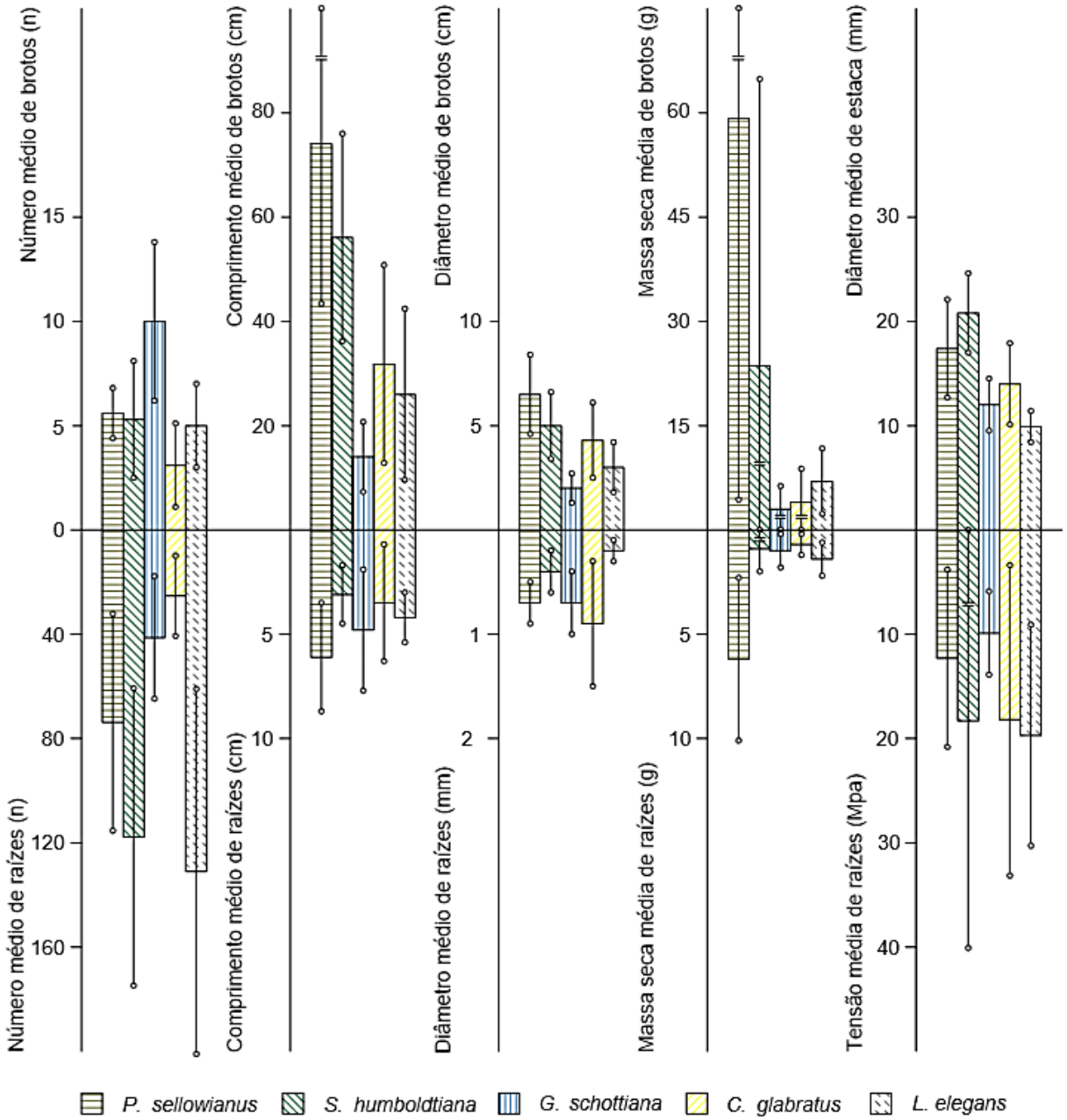
No entanto, para esta densidade de plantio as curvas médias de resistência distribuíram-se mais à direita do gráfico, ou seja, o deslocamento das raízes até o pico máximo foi maior. A provável tração não simultânea de todas as plantas e de seus sistemas radiciais na cova pode ter ocasionado este efeito, levando a um tempo de arranquio maior.

Observa-se ainda a ocorrência de inúmeros picos intermediários anteriores ao pico máximo de resistência, que pode ser resultado do rompimento individual ou

conjunto de raízes, provavelmente condicionado pelo ângulo de inserção e posição de ligação ao longo da estaca.

A Figura 16 apresenta as características médias de crescimento vegetativo da parte aérea e do sistema radicial de cada uma das espécies estudadas, assim como a resistência à tração média das raízes por unidade de área de cada espécie. A compilação destes valores é importante para melhorar a compreensão dos resultados de arranquio apresentados acima.

Figura 16 – Características médias por planta da parte aérea e da parte subterrânea das espécies em estudo. As colunas acima do eixo horizontal correspondem aos valores da parte aérea e os valores abaixo do eixo horizontal correspondem aos valores da parte subterrânea.



A espécie *G. schottiana* apresentou o maior número médio de brotos por planta, seguido de *P. sellowianus* e *S. humboldtiana*. No entanto, a presença de muitos brotos com pouco comprimento resultou no menor volume da parte aérea das três espécies referidas. Os melhores resultados de somatório do comprimento dos brotos podem ser observados para *P. sellowianus,* seguida de *S. humboldtiana*, *G. schottiana*, *L. elegans* e *C. glabratus*. O mesmo comportamento pode ser observado para o diâmetro dos brotos em que, quanto maior a altura, maior é o diâmetro, e vice-versa. A massa seca dos brotos apresenta o mesmo comportamento. A variável da massa seca dos brotos apresentou grande amplitude dos dados, o que pode ser evidenciado pela grande variação do desvio padrão característico de cada espécie.

Quanto à parte subterrânea, a espécie *L. elegans* apresentou a maior quantidade média de raízes por planta (131,0±70,0), seguido de *S. humboldtiana* (117,8±57,0) e *P. sellowianus* (73,8±41,6). No entanto, as plantas de *L. elegans* foram as que desenvolveram os menores diâmetros de raízes (0,2±0,1), levando na maioria das vezes a picos de resistência máximos inferiores aos apresentados pelas outras espécies. Os maiores diâmetros de raízes foram observados para *C. glabratus* (0,9±0,6), *P. sellowianus* (0,7±0,2) e *G. schottiana* (0,7±0,3).

A variável comprimento médio das raízes refere-se às raízes remanescentes ao longo da estaca após a execução do arranquio. Esta variável possui relação direta com a massa seca das raízes que, conforme maior o comprimento médio, tendencialmente maior o diâmetro e maior a massa seca. Para os objetivos deste trabalho, o comprimento médio e a massa seca das raízes são tratados com interesse secundário, uma vez que não têm tanta importância para os picos de resistência máxima.

Outra análise interessante a ser realizada é a força média (N) suportada por unidade de área ($mm^2$) no ponto de ruptura das raízes. A partir desta análise é possível dizer qual a espécie que possui a raiz mais resistente à tensão (força/área).

Pela Figura 16 é possível observar que *L. elegans* possui, dentre as espécies testadas, o sistema radicial com maior valor médio de resistência à tração (19,7±10,6) As espécies *C. glabratus* (18,2±14,8) e *S. humboldtiana* (18,3±21,8) apresentaram resultados parecidos entre si.

A espécie *L. elegans* tem maior resistência à tração por unidade de área no ponto de ruptura e o menor diâmetro médio de raízes. Este resultado confirma que

raízes de menor diâmetro (finas) apresentam maior resistência à tração, conforme indicado por diversos autores (BISCHETTI, 2005; LOADES, 2010; MAFFRA, 2016).

# 5 CONCLUSÃO

O estudo das características do sistema radicial das plantas utilizadas em intervenções de Engenharia Natural é de fundamental importância para a compreensão da sua influência na resistência do solo. Devido ao crescente avanço desta disciplina técnica no cenário brasileiro, torna-se cada vez mais importante, estudos com maior rigor técnico-científico acerca das propriedades mecânicas das raízes, objetivando maior segurança e eficiência no dimensionamento e execução de obras de contenção e estabilização. Após execução deste trabalho foi possível contemplar os objetivos propostos e concluir sobre alguns aspectos inerentes ao sistema radicial das espécies estudadas.

As taxas de sobrevivência das espécies estudadas foram consideradas satisfatórias sob o ponto de vista dos requisitos mínimos julgados necessários para emprego em obras de Engenharia Natural.

Os resultados mais promissores foram alcançados para *P. sellowianus* e *S. humboldtiana* (100%) e *G. schottiana* (83%). As espécies *C. glabratus* (67%) e *L. elegans* (50%) apresentaram resultados insatisfatórios. No entanto, baixas taxas de sobrevivência não justificam a rejeição destas espécies para uso em intervenções biotécnicas, uma vez que um dos objetivos da Engenharia Natural é promover o aumento da biodiversidade florística. Desta forma deve-se aumentar a proporção de plantio, de modo a alcançar a taxa de sobrevivência desejada.

Aconselha-se o plantio de uma estaca por cova para o melhor aproveitamento do potencial de propagação de cada estaca, ou seja, a otimização da emissão e crescimento de raízes por comprimento de estaca plantada. No entanto, quando o objetivo técnico do trabalho for o de aumentar a resistência global por unidade de área, pode-se plantar mais de uma estaca por cova.

Quanto à resistência ao arranquio, os resultados mais promissores foram observados, respectivamente, para a espécie *S. humboldtiana*, seguida de *P. sellowianus*, *G. schottiana*, *L. elegans* e *C. glabratus*, considerando a densidade de uma estaca por cova.

As densidades de plantio de duas e três estacas por cova mostraram resultados semelhantes entre si. Os melhores resultados de resistência ao arranquio foram obtidos para a espécie *P. sellowianus*, seguida de *S. humboldtiana*, *C. glabratus*, *G. schottiana* e *L. elegans*. Estes resultados demonstram uma maior competição e dificuldade no crescimento do sistema radicial de *S. humboldtiana* e *G. schottiana*, sendo menos prejudicial para *P. sellowianus* e *C. glabratus*, respectivamente.

Os resultados de resistência ao arranquio obtidos para todas as espécies demonstraram possuir uma boa correlação com suas respectivas partes aéreas. Com base nisto foi possível o ajuste de uma equação global para a rápida determinação da resistência ao arranquio das espécies a campo, valendo-se unicamente da área basal dos brotos e sem destruição da planta. No entanto, é importante e necessário coletar mais dados para validação de seu uso.

A espécie *G. schottiana* produziu o maior número de brotos em relação às demais espécies. No entanto, os maiores valores de crescimento vegetativo, tendo como indicativos variáveis como comprimento, diâmetro e massa seca de brotos, foram observados para *P. sellowianus*, ao passo que *G. schottiana* teve os valores menos representativos dentre as espécies estudadas.

Em relação ao número de raízes e resistência à tração do sistema radicial, os melhores resultados foram obtidos para a espécie *L. elegans*, seguida de *S. humboldtiana*. O maior número médio de raízes foi apresentado por *C. glabratus*, seguido de *P. sellowianus* e *G. schottiana*.

O uso de blocos (uma restrição) na execução do experimento mostrou-se ineficiente. Este aspecto deve ser novamente observado em experimentos futuros que objetivem investigar a resistência ao arranquio de espécies reófitas.

Recomenda-se ainda atenção especial na coleta de estacas para testes futuros. As estacas devem ser as mais retilíneas possíveis e apresentar diâmetros semelhantes (intra e interespécies), na tentativa de melhor controlar fontes de variação que podem ter influência direta nos resultados de resistência ao arranquio.

Aconselha-se que outros arranquios sejam executados ao longo do tempo, a fim de investigar o comportamento da resistência ao arranquio ao longo de diferentes períodos de desenvolvimento, e principalmente o seu comportamento sob a influência das estações do ano. Para trabalhos futuros recomenda-se a escavação integral do sistema radicial de algumas plantas por espécie para a análise do

comprimento médio total das raízes e a execução de testes de tração individual de raízes em laboratório. Conjuntamente deve-se analisar a arquitetura e investigar o tipo de raízes de cada espécie, procurando-se relacionar essas informações com a resistência ao arranquio obtida a campo.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALI, F. H.; OSMAN, N. Shear strength of a soil containing vegetation roots. Soils and Foundations - Japanese Geotechnical Society, v. 48, n. 4, p. 10, 2008.

BERTUZZI, T.; GRIGOLETTO, D.; CANTO-DOROW, T. S.; EISINGER, S. M. O gênero *Ludwigia* L. (Onagraceae) no município de Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil. Ciência e Natura, UFSM, v. 33, n. 1, p. 43-73, 2011.

BISCHETTI, G. B. et al. Root strength and root area ratio of forests species in Lombardy (Northern Italy). Plant Soil, 278:11-22, 2005.

BISCHETTI, G. B.; DI FI DIO, M.; FLORINETH, F. On the origin of Soil Bioengineering. Landscape Research, v. 0, n. 0, p. 1–13, 2012.

CARPANEZI, A. A.; TAVARES, F. R.; SOUZA, V. A. Informações sobre a estaquia do salseiro (*Salix humboldtiana* WILLD.). Colombo –PR. Embrapa (Circular técnica; n. 33), 1999.

CECCONI, M. et al. Deep Roots Planting for Surface Slope Protection. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, v. 17, p. 2809–2820, 2012.

COPPIN, N. J.; RICHARDS, I. G. (EDS.). Use of Vegetation in Civil Engineering. 2ª. ed. London, UK: Construction Industry Research and Information Association (CIRIA), 2007.

DELPRETE, P.G.; SMITH, L.B.; KLEIN, R.M. Rubiáceas. In: REITZ, P.R. (Org.). Flora Ilustrada Catarinense. Itajaí: Herbário Barbosa Rodrigues, 2004.

DEWES, J. J.; LANZ, J. C. K.; BACH, R. J.; SUTILI, F. J. Propagação vegetativa de *Cephallanthus glabratus* (Spreng.) K. Schum. como alternativa para a Engenharia Natural. Anais: 11° Congresso Florestal Estadual do Rio Grande do Sul e 2° Seminário Mercosul da Cadeia Madeireira, Nova Prata, 2012.

DURLO, M.; SUTILI, F. Bioengenharia - Manejo biotécnico de cursos de água. 3ª. ed. Santa Maria: Pallotti, 2014.

FERNANDES, J.; FREITAS, A. Introdução à Engenharia Natural. Portugal: EPAL - Empresa Portuguesa das Águas Livres, S.A., 2011.

FLORINETH, F. Pflanzen statt Beton - Handbuch zur Ingenieurbiologie und Vegetationstechnik. Berlin – Hannover: Patzer Verlag, 2004.

GOMES, F. P. Curso de estatística experimental. São Paulo: Nobel, 1985. 467 p.

GRAY, D. H.; LEISER, A. T. Biotechnical slope protection and erosion control. New York, USA: Van Nostrand Reinhold, 1982.

GRAY, D. H.; SOTIR, R. B. Biotechnical and soil bioengineering - Slope stabilization - A practical guide for erosion control. New York, USA: Jonh Wiley and Sons, Inc., 1996.

GUIMARÃES, J.N.; LELIS, S. M.; KOZOVITS, A.R. Propagação vegetativa de *Ludwigia tomentosa* (Cambess.) H. Hara para o emprego em obras de engenharia natural em voçorocas. Anais: 10° Simpósio Nacional de Recuperação de áreas Degradadas – Soluções Práticas, Foz do Iguaçu, 2014.

HÖRBINGER, S. A pull out test of *Phyllanthus sellowianus* and *Sebastiania schottiana* and development of Soil Bioengineering constructions in Southern Brazil. Dissertação de mestrado – Universität für Bodenkultur Wien, Wien, 2013. 91 p.
IP, J. The Role of Roots in Slope StabilityFRST 497- Graduating Essay, 2011.

KETTENHUBER, P. L. W. Distribuição geográfica de espécies do bioma Mata Atlântica com potencial de uso em obras de Engenharia Natural em travessias duto-viárias. Trabalho de conclusão de curso—Santa Maria, Brasil: Universidade Federal de Santa Maria, 2014.

LOADES, K. W. Quantifying soil reinforcement by fibrous roots. Ph.D thesis, University of Dundee, UK, 2007. 241 p.

MAFFRA, C. R. B. Reforço mecânico do solo proporcionado por raízes de plantas utilizadas em Engenharia Natural. Exame de qualificação de doutorado (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016. 66 p.

MARCHIORI, J. N. C. Dendrologia das Angiospermas - das Bixáceas às Rosáceas. Santa Maria: Editora da UFSM, 2000.

MENEGAZZI, G.; PALMERI, F. Il Dimensionamento delle Opere di Ingegneria Naturalistica. Roma, Itália: Regione Lazio, 2013.

MORGAN, R. P. C.; RICKSON, R. J. Slope stabilization and erosion control - A bioengineering approach. 1ª. ed. London, UK: Chapman & Hall, 1995.

MOURA, V.P.G. Introdução de novas espécies de *Salix* (Salicaceae) no Planalto Sul de Santa Catarina, Brasil. Embrapa (Comunicado técnico; n.71), 2002.

NORRIS, J. E.; GREENWOOD, J. R. Assessing the role of vegetation on soil slopes in urban areas Congress Proceedings of the 10th IAEG International Congress. Anais...: 744. In: IAEG2006 - ENGINEERING GEOLOGY FOR TOMORROW'S CITIES. Nottingham, UK: 2006 Disponível em: <http://www.icevirtuallibrary.com/content/article/10.1680/geng.2004.157.4.199>. Acesso em: 20 de outubro de 2016.

REITZ, P. R. Euforbiáceas. In: REITZ, P. R. (Org.). Flora Ilustrada Catarinense. Itajaí: Herbário Barbosa Rodrigues, 1988.

REITZ, P.R.; KLEIN, R.M.; REIS, A. Projeto Madeira do Rio Grande do Sul. Superintendência do Desenvolvimento da Região Sul (SUDESUL) – Governo do Estado do Rio Grande do Sul (RS) – Herbário Barbosa Rodrigues (HBR), 1988.

SAULI, G.; CORNELINI, P. Manuale di Indirizzo delle Scelte Progettuali per Interventi di Ingegneria Naturalistica. Roma, Itália: Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio, Direzione Generale per la Difesa del Suolo, Progetto Operativo Difesa Suolo (PODIS), 2005.

SCHIECHTL, H. M. Bioengineering for land reclamation and conservation. Edmonton, Canada: Department of the Environment, Government of Alberta. University of Alberta Press, 1980.

SCHIECHTL, H.; STERN, R. Ground bioengineering techniques for slope protection and erosion control. Oxford, UK: Blackwell Science Ltd, 1996.

SCHLÜTER, U. Versuche über die Eignung von Gehölzen als Heckenlagen zur Stabilisierung steiler Kippenböschungen aus saurem tertiärem Abraummaterial. Landschaft + Stadt. 1, 1971. 9 p.

SIEGLOCH, A.M.; MARCHIORI, J.N.C.; SANTOS, S.R. Anatomia do lenho de *Cephalanthus glabratus* (Spreng.) K. Schum. (Rubiaceae). Balduinia, Santa Maria. N 31, 2011.

SMITH, L.B.; DOWNS, R.J.; KLEIN, R.M. Euforbiáceas. In: REITZ, P.R. (Org.). Flora Ilustrada Catarinense. Itajaí: Herbário Barbosa Rodrigues, 1988.

SOUSA, R. S. Metodologia para especificação de plantas com potencial biotécnico em Engenharia Natural. 2015. 152 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

SOUSA, R. S.; KETTENHUBER, P. L. W.; DENARDI, L.; SUTILI, F. J. Plantas para Engenharia – Caracterização biotécnica de plantas para o emprego de técnicas de Engenharia Natural no controle de erosão, estabilização de taludes e perenizacão de cursos de água – Bioma Mata Atlântica. (Versão prévia da primeira edição), Santa Maria, 2016.

SUTILI, F.; GAVASSONI, E. Pesquisa e aplicação da Engenharia Natural no Brasil Proceedings Cascais World Forum 2012. Anais... In: "FÓRUM MUNDIAL DE CASCAIS: ENGENHARIA NATURAL E GESTÃO DO TERRITÓRIO - NOVOS DESAFIOS - II CONGRESS APENA - VII CONGRESS AEIP – VII CONGRESS EFIB. Cascais, Portugal: 2012.

SUTILI, F.J. Bioengenharia de solos no âmbito fluvial do Sul do Brasil – Espécies aptas, suas propriedades vegetativo-mecânicas e emprego na prática. Tese

(Doutorado em Engenharia Florestal). Universidade Rural de Viena, Viena, 2007. 97 p.

TSUKAMOTO, Y. Effect of vegetation on debris slide occurrences on steep forested slopes in Japan Islands Proceedings of the Fiji Symposium. Anais...: 192. In: RESEARCH NEEDS AND APPLICATIONS TO REDUCE EROSION AND SEDIMENTATION IN TROPICAL STEEPLANDS. IAHS-AISH, 1990.

VENTI, D. et al. Manuale Tecnico di Ingegneria Naturalistica della Provincia di Terni. Applicabilità delle tecnich, limiti e soluzioni. Itália: Provincia di Terni, Servizio Assetto del Territorio, 2003.

WEITZER, C.; DOPPLER, F.; FLORINETH, F. Untersuchungen über die Wirksamkeit von Pflanzen in Einzugsgebieten des Forsttechnischen Dienstes der Wildbach- und Lawinenverbauung. Arbeitsbereich Ingenieurbiologie und Landschaftsbau, Universität für Bodenkultur Wien, Herausgegeben Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Gruppe V/C, 1998.

ZEH, H. Ingenieurbiologie Handbuch Bautypen. Zurich: vdf Hochschulverlag an der ETH, 2007.

ZIEMER, R. R. Logging effects on soil moisture losses. PhD Dissertation—Fort Collins, Colorado: Colorado State University, 1978.

# APÊNDICE A – CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS E DE RESISTÊNCIA DAS PLANTAS ESTUDADAS

Tabela 6 - Características gerais das espécies estudadas. Parte aérea: NB = Número de brotos; SCB = Soma do comprimento de brotos; CMB = Comprimento médio de brotos; SDB = Soma do diâmetro de brotos; DMB = Diâmetro médio de brotos; SAB = Soma da área basal de brotos; AMB = Área basal média de brotos; MSB = Massa seca de brotos. Parte subterrânea: NR = Número de raízes; SCR = Soma do comprimento de raízes; CMR = Comprimento médio de raízes; SDR = Soma do diâmetro de raízes; DMR = Diâmetro médio de raízes; SAR = Soma da área de raízes; AMR = Área média de raízes; MSR = Massa seca de raízes. TMR = Tensão média de raízes. DE = Diâmetro da estaca. DP = Desvio padrão; CV = Coeficiente de variação. 1 Est. = uma estaca. 2 Est. = duas estacas. 3 Est. = três estacas.

| | | ***P.sellowianus* (n=18)** | | | ***S. humboldtiana* (n=18)** | | | ***G. schottiana* (n=14)** | | | ***C. glabratus* (n=11)** | | | ***L. elegans* (n=5)** | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | **Média** | **DP** | **CV** | **Média** | **DP** | **CV** | **Média** | **DP** | **CV** | **Média** | **DP** | **CV** | **Média** | **DP** | **CV** |
| **Sobrevivência (%)** | | 100 | - | - | 100 | - | - | 83 | - | - | 67 | - | - | 50 | - | - |
| **PARTE AÉREA** | **NB (n)** | 5,6 | 1,2 | 22,2 | 5,3 | 2,8 | 53,9 | 9,5 | 3,8 | 39,5 | 3,1 | 2,0 | 63,8 | 5,4 | 3,0 | 56,5 |
| | **SCB (cm)** | 416,9 | 200,0 | 48,0 | 259,5 | 106,7 | 41,1 | 137,8 | 76,8 | 55,7 | 81,5 | 41,1 | 50,4 | 127,2 | 75,9 | 59,6 |
| | **CMB (cm)** | 74,1 | 30,7 | 41,5 | 56,1 | 19,9 | 35,5 | 14,1 | 6,7 | 47,6 | 31,8 | 19,0 | 59,7 | 25,6 | 16,4 | 64,0 |
| | **SDB (mm)** | 36,4 | 13,9 | 38,2 | 23,6 | 10,4 | 44,3 | 22,9 | 10,5 | 46,1 | 11,6 | 5,4 | 46,8 | 15,8 | 7,2 | 45,5 |
| | **DMB (mm)** | 6,5 | 1,9 | 30,0 | 5,0 | 1,6 | 32,8 | 2,3 | 0,7 | 30,7 | 4,3 | 1,8 | 43,3 | 3,1 | 1,2 | 37,2 |
| | **SAB (mm²)** | 234,3 | 139,4 | 59,5 | 111,5 | 84,7 | 76,0 | 54,9 | 34,2 | 62,2 | 41,6 | 25,2 | 60,5 | 45,2 | 26,8 | 59,3 |
| | **AMB (mm²)** | 41,8 | 24,0 | 57,4 | 25,4 | 20,1 | 79,3 | 5,5 | 3,2 | 58,5 | 17,4 | 14,1 | 81,2 | 9,7 | 7,0 | 72,7 |
| | **MSB (g)** | 59,2 | 54,9 | 92,7 | 23,6 | 41,3 | 175,4 | 3,2 | 3,3 | 102,3 | 4,0 | 4,8 | 121,9 | 7,0 | 4,7 | 67,2 |

(continua)

(continua)

| | | *P.sellowianus* (n=18) | | | *S. humboldtiana* (n=18) | | | *G. schottiana* (n=13) | | | *C. glabratus* (n=16) | | | *L. elegans* (n=5) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | **Média** | **DP** | **CV** | **Média** | **DP** | **CV** | **Média** | **DP** | **CV** | **Média** | **DP** | **CV** | **Média** | **DP** | **CV** |
| **PARTE SUBTERRÂNEA** | **NR (n)** | 73,8 | 41,6 | 56,4 | 117,8 | 57,0 | 48,4 | 41,3 | 23,5 | 56,8 | 25,3 | 15,4 | 60,7 | 131,0 | 70,0 | 53,5 |
| | **SCR (cm)** | 419,6 | 204,5 | 48,7 | 388,7 | 272,4 | 70,1 | 209,4 | 157,2 | 75,0 | 83,9 | 71,0 | 84,7 | 561,7 | 380,2 | 67,7 |
| | **CMR (cm)** | 6,1 | 2,6 | 41,8 | 3,1 | 1,4 | 43,5 | 4,8 | 2,9 | 61,0 | 3,5 | 2,8 | 80,9 | 4,2 | 1,2 | 29,1 |
| | **SDR (mm)** | 50,7 | 22,8 | 44,9 | 46,3 | 26,2 | 56,5 | 27,5 | 16,1 | 58,6 | 21,4 | 18,1 | 84,7 | 26,7 | 13,9 | 51,9 |
| | **DMR (mm)** | 0,7 | 0,2 | 30,6 | 0,4 | 0,2 | 54,0 | 0,7 | 0,3 | 43,0 | 0,9 | 0,6 | 63,7 | 0,2 | 0,1 | 42,0 |
| | **SAR (mm²)** | 46,8 | 24,9 | 53,2 | 55,0 | 83,8 | 152,4 | 33,9 | 27,3 | 80,4 | 27,5 | 28,1 | 102,4 | 8,0 | 4,06 | 50,9 |
| | **AMR (mm²)** | 0,8 | 0,6 | 73,6 | 0,6 | 1,3 | 207,5 | 0,8 | 0,6 | 72,6 | 1,3 | 1,3 | 101,7 | 0,1 | 0,1 | 111,6 |
| | **MSR (g)** | 6,2 | 3,9 | 63,4 | 0,9 | 1,1 | 125,9 | 1,0 | 0,8 | 80,0 | 0,7 | 0,5 | 75,1 | 1,4 | 0,8 | 55,0 |
| **TMR (Mpa)** | | 12,3 | 8,5 | 69,3 | 18,3 | 21,8 | 118,7 | 9,9 | 4,0 | 40,4 | 18,2 | 14,8 | 81,0 | 19,7 | 10,6 | 53,6 |
| **DE (mm)** | | 17,4 | 4,7 | 27,0 | 20,8 | 3,8 | 18,3 | 12,0 | 2,5 | 20,9 | 14,0 | 3,9 | 27,6 | 9,9 | 1,5 | 14,9 |
| | | *P.sellowianus* (n=18) | | | *S. humboldtiana* (n=18) | | | *G. schottiana* (n=14) | | | *C. glabratus* (n=11) | | | *L. elegans* (n=5) | | |
| **Densidade de plantio** | | **1 Est.** | **2 Est.** | **3 Est.** | **1 Est.** | **2 Est.** | **3 Est.** | **1 Est.** | **2 Est.** | **3 Est.** | **1 Est.** | **2 Est.** | **3 Est.** | **1 Est.** | **2 Est.** | **3 Est.** |
| **Resistência ao arranquio (kN)** | | 0,454 | 0,933 | 1,235 | 0,709 | 0,809 | 0,817 | 0,387 | 0,395 | 0,787 | 0,273 | 0,536 | 0,694 | 0,21 | 0,156 | 0,216 |