

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

**CHARLES RODRIGO BELMONTE MAFFRA**

**RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE SOLO  
COM RAÍZES – ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO *IN SITU***

Santa Maria, RS  
2018



**Charles Rodrigo Belmonte Maffra**

**RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE SOLO COM RAÍZES – ENSAIOS DE  
CISALHAMENTO DIRETO *IN SITU***

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

Orientador: Prof. Dr. Fabrício Jaques Sutili

Santa Maria, RS  
2018

Esse trabalho utilizou bolsa de estudos concedida pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e foi apoiado com recursos financeiros da Fundação de Apoio à Tecnologia e Ciência (FATEC).

Maffra, Charles Rodrigo Belmonte

Resistência ao cisalhamento de solo com raízes - ensaios de cisalhamento direto in situ / Charles Rodrigo Belmonte Maffra.- 2018.

179 p.; 30 cm

Orientador: Fabrício Jaques Sutili

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós Graduação em Engenharia Florestal, RS, 2018

1. Engenharia Natural 2. Recuperação de Áreas Degradadas 3. Interação solo-raízes 4. Reforço do solo 5. Fator de segurança I. Jaques Sutili, Fabrício II. Título.

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

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

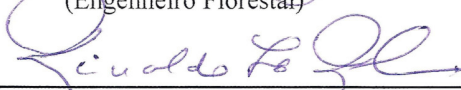
**RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE SOLO  
COM RAÍZES – ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO *IN SITU***

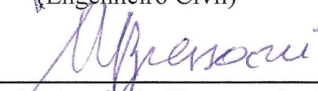
elaborada por  
**Charles Rodrigo Belmonte Maffra**

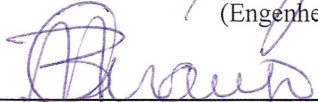
como requisito parcial para a obtenção do grau de  
**Doutor em Engenharia Florestal**

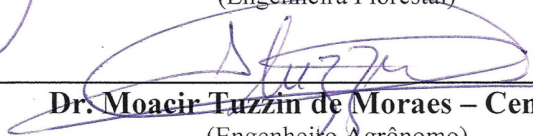
**COMISSÃO EXAMINADORA:**

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Fabrício Jaques Sutili (Presidente/Orientador)**  
(Engenheiro Florestal)

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Rinaldo José Barbosa Pinheiro – UFSM**  
(Engenheiro Civil)

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Luiz Antônio Bressani – UFRGS**  
(Engenheiro Civil)

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dra. Maristela Machado Araujo – UFSM**  
(Engenheira Florestal)

  
\_\_\_\_\_  
**Dr. Moacir Tuzzin de Moraes – Cena-USP**  
(Engenheiro Agrônomo)

Santa Maria, 26 de fevereiro de 2018



## AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), meu lar, pelas inúmeras oportunidades de aprendizado e também de convívio com pessoas realmente especiais.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal (PPGEF), do Centro de Ciências Rurais (CCR) da Universidade Federal de Santa Maria, por me conferir o suporte necessário para iniciar e concluir o doutorado.

Ao querido, e sempre professor, Miguel Antão Durlo, o mentor da Engenharia Natural no Brasil, que por anos tomou frente e contribuiu para despertar o interesse de alunos e instituições por essa disciplina tão promissora em nosso país. Sem os esforços iniciais do professor, o presente trabalho não teria seguido o caminho que seguiu. Muito obrigado professor!

Ao professor Fabrício Jaques Sutili, amigo e orientador, pelos ensinamentos constantes e lições que transcenderam os assuntos acadêmicos. Seus ensinamentos e exemplos me auxiliaram a ter visão diferenciada do ambiente à minha volta e certamente serão utilizados para nortear minhas ações futuras.

Ao professor e amigo Elvidio Gavassoni, que ainda no mestrado, ao coorientar a minha dissertação, me auxiliou a criar interesse pelo assunto que trato nesta tese.

Ao professor Rinaldo José Barbosa Pinheiro, pela amizade, por estar sempre interessado e disponível para trocar uma ideia, e pela paciência em ouvir minhas associações entre as plantas e a Geotecnia. Além disso, sou grato ao professor por ter aberto as portas do Laboratório de Geotecnia da UFSM para que eu pudesse conduzir parte dos ensaios que fazem parte desta tese. Esta oportunidade me possibilitou conhecer pessoas como seu o João e o Alisson, laboratoristas prestativos, sempre simpáticos e prontos para um mate e uma boa conversa.

Aos professores José Mário Doleys Soares e Magno Baroni, que muito gentilmente me auxiliaram com ideias e sugestões valiosas para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao professor Luciano Denardi, pela amizade e também pela sinceridade na troca de ideias, e por gentilmente ter encontrado um tempo para ler a primeira versão desta tese e me auxiliar a melhorá-la nos aspectos mais pertinentes.

Aos professores Luiz Antônio Bressani (UFRGS) e Maristela Machado Araújo (UFSM) e ao Dr. Moacir Tuzzin de Moraes (Cena-USP), por terem de bom grado aceitado integrar a

comissão examinadora e por nessa atuação terem contribuído com sugestões pertinentes que com certeza agregaram qualidade à tese.

Aos amigos do Laboratório de Engenharia Natural, Rita, Júnior, Vinícius, Paula, Dione e Manu, que se revezaram e sempre encontraram um tempo para me auxiliar no dia a dia das atividades acadêmicas e de pesquisa. Agradeço o companheirismo e a paciência que tiveram ao realizarem juntos comigo os incessantes ensaios de campo. Por fim, “Não se preocupem, só faltam mais 4.”

À Rita e ao Júnior, amigos de fato especiais, sempre interessados e disponíveis para uma conversa leve e descontraída, permeada, apenas por vez ou outra, por algum devaneio acadêmico. A vocês, pelos anos de convívio repletos de camaradagem e parceria, meu muito obrigado!

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa concedida durante os anos dedicados à realização desta tese, bem como à Fundação de Apoio à Tecnologia e Ciência (FATEC), pelo apoio financeiro. Sem estes auxílios seria mais difícil dedicar-me exclusivamente à pesquisa.

À Tiane e à Jessica, amigas que o Laboratório de Geotecnia me proporcionou, e que de bom grado me auxiliaram nos ensaios de laboratório quando precisei.

Aos professores da pós-graduação (Engenharia Florestal, Agrônômica e Civil), pelos ensinamentos e conhecimentos transmitidos, que foram fundamentais para que eu pudesse planejar e elaborar este trabalho.

A todos os colegas de pós, pelos momentos compartilhados e pela troca de ideias sempre convenientes a peculiaridade de cada momento.

À Greici, minha amiga, companheira e namorada, sempre ao meu lado, carinhosa e compreensiva, tornando todos os momentos mais fáceis e divertidos.

Ao Juca, amigo que é o bicho, sempre pronto para uma caminhada despreocupada.

À minha família, sempre especial, por todo o apoio e pelo amor puro e sincero.

Aos amigos que fizeram parte deste processo, torcendo ou incentivando.

**Muito Obrigado a Todos!**



“There is nothing we imagine which we do not already know. And our ability to imagine is our ability to remember what we have already once experienced and to apply it to some different situation.”

*(Stephen Spender)*



## RESUMO

### RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE SOLO COM RAÍZES – ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO *IN SITU*

AUTOR: Charles Rodrigo Belmonte Maffra

ORIENTADOR: Fabrício Jaques Sutili

O crescente uso da Engenharia Natural em obras de infraestrutura tem exigido o aperfeiçoamento de informações técnicas a respeito do comportamento e desempenho das plantas que são utilizadas como material construtivo. Neste sentido, nos últimos anos, tem-se dado grande destaque à inclusão de plantas em cálculos de estabilidade geotécnica de taludes. Para tornar isso possível, o primeiro passo é determinar, de modo representativo, o efeito de plantas na resistência ao cisalhamento do solo, o que ainda é um desafio devido à falta de equipamentos específicos e procedimentos padronizados para realização de ensaios de campo, com plantas desenvolvendo sob condições naturais ou de plantio. No sentido de contribuir para o atendimento dessas questões, o presente trabalho teve por objetivo investigar o efeito de plantas da espécie lenhosa *Phyllanthus sellowianus* (Klotzsch) Müll. (Phyllanthaceae) na resistência do solo ao cisalhamento direto *in situ* e sua influência na estabilidade de taludes. Para atender a esse objetivo, o estudo foi desenvolvido em duas etapas interdependentes: 1) Análise da relação entre desenvolvimento da parte aérea das plantas e resistência do sistema radicular ao arranquio; e 2) Ensaios de resistência ao cisalhamento direto *in situ*, de solo com e sem raízes. Os experimentos de arranquio e cisalhamento direto *in situ* foram implantados no distrito de Vale Vêneto, no município de São João do Polêsine, RS. Tanto no experimento de arranquio quanto no experimento de cisalhamento direto *in situ*, o plantio de *P. sellowianus* foi realizado por meio de estacas coletadas de diferentes plantas matrizes, plantadas em sistema de plantio direto, em área roçada e capinada, em espaçamento de 1,0x1,0 m (arranquio) e 0,7x0,7 m (cisalhamento). Para a condução dos testes de arranquio e dos ensaios de cisalhamento foram utilizadas máquinas especificamente projetadas e desenvolvidas para as tarefas. No estudo da interdependência entre desenvolvimento da parte aérea das plantas e seu sistema radicular, identificou-se que a soma da área transversal de brotos (mm<sup>2</sup>) foi a variável com maior capacidade de descrever as variações na resistência das raízes. Essa variável, portanto, foi utilizada para amostrar de maneira representativa as plantas a serem empregadas nos ensaios de cisalhamento direto *in situ*. Nos ensaios de cisalhamento, identificou-se que, após tempo relativamente curto de desenvolvimento a campo (até 12 meses), as plantas não influenciaram o ângulo de atrito interno do solo, porém tiveram influência na coesão do solo, para a qual proporcionaram um aumento de até 83,1%. Portanto, as plantas atuaram como elementos de reforço do solo. O equipamento de cisalhamento direto *in situ*, desenvolvido para viabilizar o presente estudo, assim como os procedimentos que possibilitaram o seu uso, se mostraram efetivos na tarefa de quantificar o efeito de plantas na resistência ao cisalhamento do solo. Seguindo os meios e os procedimentos utilizados no presente estudo, o aspecto geral dos ensaios de resistência ao cisalhamento direto *in situ* pode evoluir para a elaboração de uma especificação técnica padronizada, que pode ser útil aos projetos de estabilização geotécnica de taludes.

**Palavras-chave:** Engenharia Natural. Recuperação de Áreas Degradadas. Interação Solo-Raízes. Reforço do Solo. Sistema radicular. Fator de Segurança. Manejo de Bacias Hidrográficas.



## ABSTRACT

### SHEAR STRENGTH OF SOIL WITH ROOTS – IN-SITU DIRECT SHEAR TESTS

AUTHOR: Charles Rodrigo Belmonte Maffra

ADVISOR: Fabrício Jaques Sutili

The increasing use of Soil Bioengineering in infrastructure works has required the improvement of the technical information regarding the behavior and performance of the plants which are used as building material. On this subject, the inclusion of plants on the calculation of geotechnical slope stability has been emphasized in recent years. To make this possible, the first step is to determine, in a representative way, the effect of plants on the shear strength of the soil, which is still a challenge due to the lack of specific equipment and standard procedures for conducting field tests with plants under natural or planting conditions. In order to contribute to these questions, this study aimed to investigate the effect of the woody species *Phyllanthus sellowianus* (Klotzsch) Müll. (Phyllanthaceae) on the soil resistance to in-situ direct shear and its influence on slope stability. To achieve this objective, the study was developed in two interdependent parts: 1) Analysis of the relationship between the plant aerial compartments and the root system resistance to the pullout; and 2) In-situ direct shear tests performed on soil with and without roots. The pullout and the in-situ direct shear experiments were performed in the Vale Vêneto district, in the municipality of São João do Polêsine, RS. In both experiments, the *P. sellowianus* planting was carried out using live cuttings collected from different plants. In the mowing and weeding area, the live cuttings were planted by direct planting system, in spacings of 1.0x1.0 m (pullout tests) and 0.7x0.7 m (shear tests). For the conduction of the pullout and the in-situ shear tests, devices specifically designed and developed for the tasks were used. In the study of the interdependence between the development of plant aerial compartments and the root system resistance, it was identified that the sum of the cross-sectional area of shoots ( $\text{mm}^2$ ) was the variable with the greatest capacity to describe the variations in the resistance of the roots of the plants. This variable, therefore, was used to representatively sample the plants to be used in in-situ direct shear tests. In the shear tests, it was identified that, after 12 months of field development, the plants did not influence the angle of internal friction of the soil, but they had influence on the soil cohesion, which provided an increase of up to 83.1%. Therefore, the plants acted as soil reinforcement elements. Regarding the influence of the plants on the slope stability, a positive contribution was verified since the plants influenced significantly the cohesion of the soil. The in-situ direct shear machine, developed to make feasible the present study, as well as the procedures that supported its use, were effective in the task of quantifying the effect of plants in the shear strength of the soil. Following the means and procedures used in the present study, the general aspect of the in-situ direct shear tests may evolve towards the elaboration of a standardized technical specification, which may be useful for slope geotechnical stabilization projects.

**Keywords:** Soil Bioengineering. Reclamation of Degraded Areas. Soil-Root Interaction. Soil Reinforcement. Root System. Factor of Safety. Watershed management.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Efeitos hidrológicos (a) e mecânicos (b) da vegetação em taludes.....	29
Figura 2 – Principais componentes do sistema radicular de uma planta lenhosa, incluindo raízes laterais, pivotantes e secundárias .....	31
Figura 3 – Representação esquemática da forma natural de sistemas radiculares de plantas lenhosas do tipo <i>plate</i> , <i>heart</i> e <i>tap</i> (a); e aproximações geométricas dos sistemas radiculares (b). R, raio médio do sistema radicular; Z, profundidade efetiva do sistema radicular.....	32
Figura 4 – Variação da resistência à tração de acordo com o diâmetro das raízes e o seu percentual de celulose. ● = Percentual de celulose; ○ = Resistência à tração .....	34
Figura 5 – Representação da soma de características que compõem a resistência mecânica do sistema solo-raiz.....	35
Figura 6 – Efeito de reforço proporcionado pelas raízes na resistência ao cisalhamento do solo. Onde: $\phi'$ , ângulo de atrito interno efetivo do solo; $c'$ , coesão efetiva; $c'_R$ , aumento na coesão efetiva; $\Delta S$ , aumento efetivo na resistência do solo ao cisalhamento devido à presença de raízes .....	36
Figura 7 – Formas de falha da resistência das raízes. a) Propagação da falha por superação das forças de adesão entre solo e raízes; b) Rompimento das raízes sob tração em diferentes estágios de deformação.....	37
Figura 8 – Modelo de reforço do solo por raiz perpendicular. a) Raiz flexível e elástica alinhada perpendicularmente à superfície de ruptura no início do teste e sua deformação com aplicação de uma tensão horizontal contínua. Onde: z, espessura da zona de cisalhamento; x, deflexão horizontal da raiz; $\theta$ , ângulo de distorção do cisalhamento; $T_r$ , resistência da raiz à tração; $\tau$ , força de atrito entre solo e raiz. b) representação de amostra de solo cisalhada com um segmento de raiz (linha pontilhada) inicialmente alinhado perpendicularmente ao plano de ruptura e posteriormente deformado (linha contínua). .....	40
Figura 9 – Arranquio de plantas inteiras. Relação típica entre força e deslocamento.....	44
Figura 10 – Informações obtidas em ensaios de cisalhamento direto em solo arenoso. a) Representação da envoltória de Mohr-Coulomb; b) Relação entre tensão cisalhante aplicada e deslocamento horizontal; c) Relação entre variação volumétrica e deslocamento horizontal; $\tau$ , tensão cisalhante (kPa); $\phi$ , ângulo de atrito interno ( $^\circ$ ). .....	46
Figura 11 – Representação esquemática de um equipamento para realização de testes de cisalhamento direto <i>in situ</i> , em blocos de solo com raízes. a) Caixa para moldar o bloco de solo com raízes; b) Caixa com bloco de solo e raízes; c) Sistema de cisalhamento preparado para a realização do teste .....	47

Figura 12 – Forças atuantes na fatia de solo de um talude infinito com vegetação. Onde: D, carga do vento paralela ao talude; Sw, sobrecarga devido ao peso da vegetação; C, D, E e F são as posições que delimitam a fatia de solo analisada;  $\beta$ , ângulo de inclinação do talude;  $\gamma$ , peso específico do solo;  $\gamma_w$ , peso específico da água; hz, altura de solo acima da superfície de ruptura; hw, altura da água acima da superfície de ruptura;  $\theta$ , ângulo entre raízes e superfície de ruptura; b, largura da fatia; l, comprimento da base da fatia (b.sec  $\beta$ ). ..... 52

Figura 13 – Talude com ruptura rotacional, mostrando as principais influências da vegetação e os parâmetros aplicados na análise de estabilidade. D, carga do vento paralela ao talude; Sw, sobrecarga devido a massa da vegetação; hz, altura de solo acima da superfície de ruptura; hw: altura da água acima da superfície de ruptura;  $\delta hw$ , variação no nível do lençol freático;  $\beta$ , ângulo de inclinação do talude;  $\theta$ , ângulo entre raízes e superfície de ruptura;  $\alpha$ , ângulo de inclinação da base da fatia com a horizontal; l, comprimento da base da fatia (b.sec  $\alpha$ ); T, força de tração das raízes atuando na base da superfície de ruptura; W, peso total da fatia de solo; b, largura da fatia..... 53

Figura 14 – Áreas de ocorrência natural de *Phyllanthus sellowianus*. (a) exemplar em torrente de montanha, na região de Itaara, RS; (b) exemplares em leito rochoso, em planície de alagamento no Rio Uruguai, RS; (c) exemplares fixados no leito rochoso do Salto do Yucumã, Rio Uruguai, RS. .... 55

Figura 15 – Localização das áreas onde foram conduzidos os experimentos de arranquio e cisalhamento direto *in situ*, bem como dos pontos de coleta de estacas vivas de *Phyllanthus sellowianus* utilizadas nos plantios experimentais ..... 58

Figura 16 – Solos das áreas em que foram realizados os experimentos de arranquio e cisalhamento direto *in situ*..... 59

Figura 17 – Representação esquemática da distribuição das estacas nos blocos de arranquio e época de realização dos ensaios. Cada um dos retângulos representa um conjunto de 24 plantas, que foram avaliadas em períodos diferentes (61, 133, 186, 252, 320 e 421 dias após o plantio). O espaçamento entre plantas é de 1,0 m. .... 61

Figura 18 – Aspecto geral do solo até 100 cm de profundidade (a), coleta de amostras indeformadas para determinação da densidade do solo (b) e para determinação da resistência ao cisalhamento direto em laboratório (c)..... 62

Figura 19 – Aspecto geral do equipamento utilizado no arranquio vertical das plantas de *Phyllanthus sellowianus*. a) tripé metálico que dá suporte ao motor elétrico, espia de aço e célula de carga, e mantém as forças verticais perpendicularmente alinhadas à superfície do solo até a completa extração do sistema radicial; b) aspectos da célula de carga (parte superior), planta arrancada (centro) e motor elétrico para aplicação das tensões (direita); c) aspectos do amplificador de frequências (Scout 55, à esquerda), que faz a conexão entre a célula de carga e o software instalado no notebook (à direita). ..... 63

Figura 20 – Imagens mostrando a sequência do processo de arranquio de uma planta de *Phyllanthus sellowianus* 252 dias (8 meses) após o plantio. A imagem 1 representa o início do ensaio por acionamento do comando que liga o motor elétrico e início das leituras no software das forças aplicadas (N) a cada instante (segundos); Entre as imagens 2 e 8, o ensaio encontra-se em andamento, o sistema radicial da planta encontra-se em contínua remoção do interior do solo; a imagem 9 corresponde ao encerramento do ensaio, onde o sistema radicial foi extraído, a leitura de força cai a 0 N, o motor é desligado e as leituras no software são encerradas ..... 64



Figura 21 – Parte aérea e sistema radicial de *Phyllanthus sellowianus* propagado a partir de estacas. (a) Indicação da estaca viva e de sua brotação; (b) Vista superior de uma estaca viva com diversas raízes. As linhas verdes indicam as raízes principais, ou seja, aquelas ligadas diretamente à estaca. ... 66

Figura 22 – Representação esquemática da área do experimento. É possível observar a distribuição das espécies *Phyllanthus sellowianus* e *Salix humboldtiana* e dos espaços vazios, não plantados (solo). O espaçamento entre plantas é de 0,7×0,7 m. P1, P2, P3, P4 e P5 são pontos onde foram coletadas amostras para caracterização física, química e mecânica do solo ..... 68

Figura 23 – Procedimento de plantio das estacas vivas de *Phyllanthus sellowianus*. (a) utensílios e materiais utilizados no plantio: calda composta com água e solo local, estacas vivas e trado com diâmetro de 2,5 cm para perfuração do solo; (b) perfuração do solo até 50 cm de profundidade com auxílio de trado; (c) preenchimento do furo com a calda de solo e água previamente preparada; (d) e (e) inserção da estaca no solo; (f) estaca plantada, permanecendo 10 cm de comprimento acima da superfície solo. .... 69

Figura 24 – Área do experimento. (a) aspecto da área logo após o plantio; (b) aspecto da área no período de inverno, 10 meses após o plantio, início dos ensaios de cisalhamento direto *in situ*. .... 70

Figura 25 – Representação esquemática de uma estaca imediatamente após o plantio (esquerda) e após alguns meses (direita) ..... 71

Figura 26 – Coleta de amostras deformadas e indeformadas para as caracterizações química, física e de resistência ao cisalhamento do solo na área do experimento. (a) coleta de amostras deformadas para análises físico-químicas; (b) coleta de amostras indeformadas para caracterização da estrutura e da resistência ao cisalhamento direto em laboratório; (c) e (d) aplicação de parafina nos corpos de prova indeformados para minimizar a perda de umidade ..... 73

Figura 27 – Mensuração de variáveis do sistema radicial. (a) corpo de prova após o ensaio de cisalhamento direto *in situ*, onde as setas indicam a estaca viva e as raízes cruzando a superfície de ruptura; (b) lavagem e separação das raízes para posterior obtenção de sua massa seca. .... 76

Figura 28 – Representação esquemática do equipamento de ensaio de cisalhamento direto *in situ*, em bloco de solo com raízes. Onde: 1) Caixa de cisalhamento; 2) Placas de ferro fundido; 3) Amplificador de frequência; 4) Célula de carga; 5) Conjunto hidráulico (bomba e pistão); 6) Grampos de ancoragem; 7) Defletômetros verticais; 8) Defletômetro horizontal; 9) Barra de aço e suportes para defletômetros; 10) Chapa de aço com cunha de 15° para posicionamento do pistão do macaco hidráulico; 11) Suporte para posicionamento do pistão do macaco hidráulico; 12) Notebook e software. .... 79

Figura 29 – Tipos de corpos de prova cisalhados: a) solo sem raízes; b) solo com plantas de *Phyllanthus sellowianus* de entre 10 e 12 meses após o plantio (período de inverno); c) representação esquemática do corpo de prova de 40×40×20 cm sem raízes; d) representação esquemática do corpo de prova de 40×40×20 cm com raízes de *Phyllanthus sellowianus*. .... 82

Figura 30 – Preparação do corpo de prova para ensaio de cisalhamento direto *in situ*. Onde: a) demarcação da amostra; b) escavação preparatória; c) escavação concluída; d) remoção da parte aérea da planta; e) nivelamento da caixa de cisalhamento; f) regularização da superfície do corpo de prova; g) homogeneização da umidade do solo; h) retirada do excesso de água; i) preenchimento e regularização da superfície do corpo de prova com areia e régua de madeira; j) Aplicação da tensão normal; k) aplicação de areia para posicionamento das placas metálicas; l) tensão normal aplicada e início do adensamento. .... 84

Figura 31 – Segunda fase do ensaio de cisalhamento direto <i>in situ</i> : instalação do macaco hidráulico para aplicação da força horizontal e também dos instrumentos para medição das deformações horizontais e verticais. a) colocação da placa de aço com cunha para posicionamento do pistão do macaco hidráulico; b) acoplagem da célula de carga à caixa de cisalhamento; c) fixação da placa de posicionamento ao solo por meio de grampos de aço; d) vista lateral da máquina; e) vista da parte posterior do equipamento de cisalhamento direto <i>in situ</i> pronta para o início do ensaio; f) início do ensaio de cisalhamento direto <i>in situ</i> .....	86
Figura 32 – Características determinadas imediatamente após os ensaios de cisalhamento direto: a) determinação do peso dos corpos de prova de dimensões 40×40×20 cm; b) coleta de amostras indeformadas de solo na superfície de ruptura (linhas vermelhas) para determinação das características físicas e acompanhamento da umidade do solo. ....	88
Figura 33 – Envoltórias de resistência ao cisalhamento do solo. As linhas pontilhadas indicam o intervalo de confiança dos dados com 95% de confiabilidade .....	92
Figura 34 – Aspectos gerais do desenvolvimento das plantas de <i>Phyllanthus sellowianus</i> após a implantação do experimento. a) planta com 2 semanas; b) plantas aos 252 dias (8 meses) após o plantio, com brotações de 1,0 m de altura; c) plantas aos 421 dias (14 meses) após o plantio, com brotações passando de 2,0 m de altura .....	93
Figura 35 – Porcentagem média e total de raízes que permaneceram ligadas ao longo do comprimento de estaca enterrada após o arranquio vertical. Os dados incluem plantas com 133, 186, 252, 320 e 421 dias após o plantio.....	94
Figura 36 – Distribuição diamétrica das raízes que permaneceram ligadas ao longo do comprimento das estacas enterradas após o arranquio vertical. Os dados incluem plantas com 133, 186, 252, 320 e 421 dias após o plantio .....	95
Figura 37 – Relação entre a resistência ao arranquio vertical e o comprimento total de brotos e raízes remanescentes de <i>Phyllanthus sellowianus</i> . Os dados incluem plantas de 61, 133, 186, 252, 320 e 421 dias após o plantio. Médias com as mesmas letras não são estatisticamente diferentes entre si de acordo com o teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro; <i>n</i> é o número de plantas avaliadas em cada período.....	96
Figura 38 – Relação entre resistência máxima ao arranquio vertical e a soma da área transversal de brotos de <i>Phyllanthus sellowianus</i> . As linhas tracejadas representam o intervalo de confiança com 95% de confiabilidade .....	99
Figura 39 – Características texturais do solo de 0 a 50 cm de profundidade. A linha vermelha pontilhada indica a profundidade que foi trabalhada nos ensaios de cisalhamento direto <i>in situ</i> .....	102
Figura 40 – Curva característica de retenção de umidade para o solo do experimento para a profundidade de 20 cm .....	104
Figura 41 – Envoltórias de resistência do solo obtidas em ensaios de cisalhamento direto em laboratório para a profundidade de 20 cm, para solo com graus de saturação de S=63% e S=79%. O grau de saturação de 63% foi obtido antes do umedecimento do solo, enquanto o grau de saturação de 79% foi obtido após o umedimento do solo .....	106

Figura 42 – Relação entre tensão cisalhante e deformação horizontal obtida em laboratório, para a profundidade de 20 cm, para solo com graus de saturação de S=63% (a) e S=79% (b).....	107
Figura 43 – Relação entre deformação vertical e horizontal do solo obtida em laboratório em corpos de prova de 5×5×2 cm, para a profundidade de 20 cm, para solo com graus de saturação de S=63% (a) e S=79% (b) .....	109
Figura 44 – Distribuição de frequência e crescimento das plantas de <i>Phyllanthus sellowianus</i> . a) distribuição de frequência de acordo com o centro de classe; b) distribuição normal da soma de área transversal de brotos; c) crescimento da parte aérea das plantas e indicação dos sete centros de classe. ....	112
Figura 45 – Sistemas radiciais de plantas de 5 classes de soma de área transversal de brotos amostradas nos ensaios de cisalhamento direto <i>in situ</i> , onde as estacas têm 20 cm de comprimento (da superfície do solo à superfície de cisalhamento). Onde: a) classe 2; b) classe 3; c) classe 4; d) classe 5; e) classe 6 .....	118
Figura 46 – Aspecto geral de parte do sistema radicial de uma planta de <i>Phyllanthus sellowianus</i> da classe de crescimento 5, com raízes ultrapassando 40 cm além do comprimento final da estaca. A linha vermelha pontilhada indica a posição da superfície de cisalhamento, abaixo da mesma a estaca está inserida mais 30 cm no solo.....	119
Figura 47 – Envoltórias de resistência de pico do solo com e sem plantas de <i>Phyllanthus sellowianus</i> . a) envoltórias médias de resistência de pico do solo com e sem plantas; b) intervalo de confiança para a envoltória de resistência de pico do solo sem raízes; c) intervalo de confiança para a envoltória de resistência de pico do solo com raízes.....	122
Figura 48 – Envoltórias de resistência pós-pico (de 6 a 12% de deformação horizontal) do solo com e sem plantas de <i>Phyllanthus sellowianus</i> . a) envoltórias médias de resistência do solo com e sem plantas; b) intervalo de confiança para a envoltória de resistência pós-pico do solo sem raízes; c) intervalo de confiança para a envoltória de resistência pós-pico do solo com raízes .....	123
Figura 49 – Relação entre tensão cisalhante e deformação horizontal obtida em <i>in situ</i> , para a profundidade de 20 cm, para solo sem raízes (a) e com plantas de <i>Phyllanthus sellowianus</i> (b) .....	127
Figura 50 – Relação entre tensão cisalhante normalizada e deformação horizontal obtida a partir dos ensaios de cisalhamento direto <i>in situ</i> . a) comparação entre o solo sem raízes e solo com raízes de <i>Phyllanthus sellowianus</i> de diferentes classes de soma de área transversal de brotos; b) comparativo do solo sem raízes e do solo com raízes (média das classes de crescimento avaliadas) .....	129
Figura 51 – Relação entre deformação vertical e deformação horizontal do solo <i>in situ</i> , para a profundidade de 20 cm, para solo sem (a) e com (b) plantas de <i>Phyllanthus sellowianus</i> .....	131
Figura 52 – Aspecto geral dos corpos de prova após o ensaio de cisalhamento direto <i>in situ</i> . a) corpo de prova durante o ensaio de cisalhamento recebendo uma força cisalhante e sofrendo deformação horizontal; b) deformação horizontal do corpo de prova ao final do ensaio; c) aspecto geral da deformação horizontal sofrida pelo corpo de prova; d) aspecto da superfície de cisalhamento do solo sem planta; e) aspecto da superfície de cisalhamento do solo com planta de <i>Phyllanthus sellowianus</i> .....	133

Figura 53 – Aspecto geral de deformação dos corpos de prova com plantas de <i>Phyllanthus sellowianus</i> . a) corpo de prova e estaca intactos; b) corpo de prova com 12% de deformação horizontal e estaca com 13° de inclinação (deformação reversível – deformação final dos ensaios de cisalhamento conduzidos <i>in situ</i> ); c) corpo de prova com 50% de deformação horizontal e estaca com 45° de inclinação (deformação irreversível). A linha vermelha corresponde à superfície de cisalhamento .....	134
Figura 54 – Detalhes e aspectos geométricos dos taludes analisados. a) taludes sem plantas; b) taludes em que o efeito das plantas foi considerado até 0,2 m de profundidade, observando que esta foi objeto dos ensaios de cisalhamento direto <i>in situ</i> ; c) taludes em que o efeito das plantas foi considerado até 0,5 m, limite de profundidade das estacas .....	166
Figura 55 – Estimativa do incremento em resistência ao cisalhamento do solo de acordo com a densidade e tempo decorrido após o plantio de <i>Phyllanthus sellowianus</i> : a) efeito de 6 plantas/m <sup>2</sup> ; b) efeito de 12 plantas/m <sup>2</sup> ; c) efeito de 18 plantas/m <sup>2</sup> . .....	168
Figura 56 – Efeito da densidade e da idade das plantas na estabilidade de taludes com diferentes inclinações, considerando o reforço do solo até a profundidade de 20 cm, trabalhada nos ensaios de campo. A curva em cor azul representa o solo sem raízes e as curvas em cor vermelha representam, em ordem crescente, o solo com raízes de <i>Phyllanthus sellowianus</i> 1, 2, 3, 4 e 5 anos após o plantio. ....	171
Figura 57 – Efeito da densidade e da idade das plantas na estabilidade de taludes com diferentes inclinações, considerando o reforço do solo até a profundidade de 50 cm. A curva em cor azul representa o solo sem raízes e as curvas em cor vermelha representam, em ordem crescente, o solo com raízes de <i>Phyllanthus sellowianus</i> 1, 2, 3, 4 e 5 anos após o plantio. ....	172
Figura 58 – Representação esquemática da estabilidade de taludes de 45° de inclinação sem (a) e com plantas de <i>Phyllanthus sellowianus</i> (b). O valor de coesão para solo com raízes foi estimado para a densidade de 18 plantas/m <sup>2</sup> , para 5 anos de desenvolvimento a campo. As linhas vermelhas indicam a posição da superfície de ruptura com o menor fator de segurança calculado. No solo sem raízes, as linhas azuis representam superfícies de ruptura potenciais com FS>1,76, enquanto no solo com raízes as linhas azuis representam linhas potenciais de ruptura com FS>2,12. As setas indicam os principais pontos de contribuição das raízes para a estabilidade do talude .....	174
Figura 59 – Exemplos de análises de estabilidade de taludes conduzidas para o solo sem raízes. a) talude com inclinação de 15°; b) talude com inclinação de 30°; c) talude com inclinação de 45°; d) talude com inclinação de 60° .....	177
Figura 60 – Exemplos de análises de estabilidade de taludes conduzidas para o solo com raízes de <i>P. sellowianus</i> , para a densidade de 6 plantas/m <sup>2</sup> , com contribuição homogênea das plantas até 0,2 m de profundidade, 1 ano após o plantio. a) talude com inclinação de 15°; b) talude com inclinação de 30°; c) talude com inclinação de 45°; d) talude com inclinação de 60° .....	178
Figura 61 – Exemplos de análises de estabilidade de taludes conduzidas para o solo com raízes de <i>P. sellowianus</i> , para a densidade de 6 plantas/m <sup>2</sup> , com contribuição homogênea das plantas até 0,5 m de profundidade, 1 ano após o plantio. a) talude com inclinação de 15°; b) talude com inclinação de 30°; c) talude com inclinação de 45°; d) talude com inclinação de 60° .....	179

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dimensões de caixas utilizadas em ensaios de cisalhamento direto <i>in situ</i> .....	47
Tabela 2 – Valores de tensão normal utilizados em ensaios de cisalhamento direto <i>in situ</i> .....	48
Tabela 3 – Características físicas do solo na área do experimento de arranquio vertical. Aspectos de textura (areia, silte e argila), estrutura (densidades e porosidade) e limites de Atterberg (limites de liquidez e plasticidade).....	91
Tabela 4 – Características químicas do solo na área do experimento de arranquio vertical .....	92
Tabela 5 – Coeficientes de determinação ( $r^2$ ) de equações lineares obtidas da relação entre variáveis biométricas e resistência ao arranquio de plantas de <i>Phyllanthus sellowianus</i> . As análises foram realizadas para 107 plantas com 133 a 421 dias de desenvolvimento a campo .....	98
Tabela 6 – Características físicas do solo na área de estudo. Aspectos de textura, estrutura e limites de Atterberg (liquidez, plasticidade e índice de plasticidade) ao longo do alcance em profundidade das estacas plantadas. Os valores destacados em negrito indicam a profundidade que foi trabalhada nos ensaios de cisalhamento direto <i>in situ</i> .....	101
Tabela 7 – Propriedades químicas do solo na área destinada aos ensaios de cisalhamento direto <i>in situ</i> .....	103
Tabela 8 – Distribuição de frequência das plantas de <i>Phyllanthus sellowianus</i> organizadas em classes de soma de área transversal de brotos ( $\text{mm}^2$ ) .....	111
Tabela 9 – Características físicas do solo na superfície de ruptura dos corpos de prova, após os ensaios de cisalhamento direto <i>in situ</i> .....	114
Tabela 10 – Características físicas dos corpos de prova de 40×40×20 cm, com e sem plantas de <i>Phyllanthus sellowianus</i> .....	115
Tabela 11 – Massa seca das raízes e brotos e diâmetro das estacas de <i>Phyllanthus sellowianus</i> na superfície de cisalhamento. ....	117
Tabela 12 – Verificação dos efeitos das plantas de <i>Phyllanthus sellowianus</i> pelos testes de igualdade de intercepto, paralelismo e coincidência de curvas. A hipótese de igualdade entre valores é aceita se P-valor for maior que 0,05 .....	125
Tabela 13 – Normalidade dos dados de soma de área transversal de brotos.....	157
Tabela 14 – Análise de variância (ANOVA) dos dados de resistência ao cisalhamento direto <i>in situ</i> . As análises foram conduzidas para as resistências de pico e pós-pico de solo com e sem plantas <i>P. sellowianus</i> .....	158
Tabela 15 – Teste de homogeneidade da variância dos dados de resistência ao cisalhamento direto <i>in situ</i> . As análises foram conduzidas para as resistências de pico e pós-pico de solo com e sem plantas <i>P. sellowianus</i> . ....	159
Tabela 16 - Teste de normalidade dos resíduos dos dados de resistência ao cisalhamento direto <i>in situ</i> . As análises foram conduzidas para as resistências de pico e pós-pico de solo com e sem plantas <i>P. sellowianus</i> . ....	160

Tabela 17 – Teste de independência dos resíduos dos dados de resistência ao cisalhamento direto <i>in situ</i> . As análises foram conduzidas para as resistências de pico e pós-pico de solo com e sem plantas <i>P. sellowianus</i> .....	160
Tabela 18 – Análise de variância do modelo de regressão linear com variável Dummy. As análises foram conduzidas para os resultados dos ensaios de cisalhamento direto <i>in situ</i> , especificamente para as resistências de pico e pós-pico de solo com e sem plantas <i>P. sellowianus</i> . ....	161
Tabela 19 – Verificação dos efeitos das plantas pelos testes de igualdade de intercepto, paralelismo e coincidência de curvas. As análises foram realizadas para os dados de resistência de pico para plantas com 1 ano de desenvolvimento e para estimativas realizadas para plantas com 2, 3, 4 e 5 anos de desenvolvimento a campo. A hipótese de igualdade entre valores é aceita se P-valor for maior que 0,05. ....	162
Tabela 20 – Condições de plantio utilizadas nas análises do efeito das plantas de <i>P. sellowianus</i> na resistência ao cisalhamento do solo.....	164
Tabela 21 – Condições utilizadas para a simulação numérica da estabilidade de taludes.....	165

## LISTA DE APÊNDICES

APÊNDICE A – Análise de normalidade dos dados de soma de área transversal de brotos.....	157
APÊNDICE B – Análise de variância das regressões lineares.....	158
APÊNDICE C – Condicionantes das regressões.....	159
APÊNDICE D – Anova da Comparação de Curvas.....	161
APÊNDICE E – Comparação de curvas com contribuição das plantas para a resistência ao cisalhamento do solo estimada para 2, 3, 4 e 5 anos de desenvolvimento a campo.....	162
APÊNDICE F – Simulações do efeito da densidade e idade das plantas na estabilidade de taludes..	164
APÊNDICE G – Exemplos das análises de estabilidade de taludes conduzidas para solo com e sem raízes de plantas de <i>P. sellowianus</i> .....	177





## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>25</b>
1.1	Objetivos .....	27
1.1.1	Objetivo geral .....	27
1.1.2	Objetivos específicos .....	27
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>29</b>
2.1	O papel da vegetação na estabilidade e proteção de taludes .....	29
2.2	Propriedades mecânicas das raízes na resistência do solo .....	30
2.2.1	Morfologia do sistema radicular .....	30
2.2.2	Resistência das raízes .....	33
2.2.3	Resistência do sistema solo-raiz .....	35
2.3	Modelo teórico de avaliação do reforço do solo pelas raízes .....	39
2.4	Ensaio para determinar o reforço dos solos pelas raízes.....	43
2.4.1	Arranquio <i>in situ</i> .....	43
2.4.2	Cisalhamento direto <i>in situ</i> .....	45
2.5	Avaliação da estabilidade de taludes considerando a vegetação.....	49
2.6	Propagação por estacas.....	54
2.7	A espécie em estudo .....	55
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>57</b>
3.1	Considerações gerais .....	57
3.2	Caracterização da região do estudo .....	57
3.3	Experimento de resistência ao arranquio vertical.....	60
3.3.1	Características gerais do experimento .....	60
3.3.2	Caracterização do solo .....	61
3.3.3	Arranquio vertical.....	62
3.3.4	Medição das variáveis da parte aérea e sistema radicial.....	65
3.3.5	Análise dos dados .....	66
3.4	Experimento de resistência ao cisalhamento direto <i>in situ</i> .....	66
3.4.1	Características gerais do experimento .....	67

3.4.2	Caracterização do solo .....	71
3.4.3	Medidas biométricas das plantas .....	75
3.4.4	O equipamento de cisalhamento direto <i>in situ</i> .....	77
3.4.5	Procedimentos para realização dos ensaios .....	81
3.4.6	Seleção das plantas para os ensaios.....	88
3.4.7	Análise dos dados.....	89
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>91</b>
4.1	Resistência ao arranquio vertical .....	91
4.1.1	Características físicas do solo .....	91
4.1.2	Resistência ao cisalhamento direto do solo em laboratório .....	91
4.1.3	Características químicas do solo .....	92
4.1.4	Crescimento das estacas e resistência ao arranquio vertical .....	92
4.1.5	Relação entre desenvolvimento das plantas e resistência do sistema radicial .....	97
4.1.6	Conclusões .....	100
4.2	Resistência ao cisalhamento direto <i>in situ</i> .....	101
4.2.1	Características físicas do solo .....	101
4.2.2	Características químicas do solo .....	103
4.2.3	Curva característica de retenção de água no solo.....	104
4.2.4	Resistência ao cisalhamento direto do solo em laboratório .....	105
4.2.5	Seleção de plantas para os ensaios de cisalhamento direto <i>in situ</i> .....	110
4.2.6	Características físicas dos corpos de prova e das superfícies de cisalhamento.....	113
4.2.7	Resistência ao cisalhamento do solo <i>in situ</i> .....	120
4.2.8	Conclusões .....	136
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>138</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>142</b>
	<b>APÊNDICES .....</b>	<b>157</b>

# 1 INTRODUÇÃO

A Engenharia Natural é o ramo da Engenharia que preconiza o uso de materiais vivos combinados ou não com materiais inertes para prevenir, mitigar ou corrigir problemas técnicos relacionados a processos erosivos e à perda de estabilidade superficial de massas. Tal como outros ramos da Engenharia, a Engenharia Natural depende do conhecimento das propriedades técnicas dos materiais construtivos para viabilizar a escolha, dimensionamento e avaliação das intervenções a serem utilizadas na correção de um determinado problema.

Na Engenharia Natural são empregados basicamente dois tipos de materiais construtivos, os vivos, representados por plantas, parte de plantas e sementes, e os inertes, compostos por solo, madeira, rocha, aço, polímeros sintéticos e fibras naturais (SCHIECHTL e STERN, 1997). Tais materiais, apesar de terem características bastante distintas, podem, sob o ponto de vista da Engenharia, e com as devidas adaptações, ter as propriedades técnicas avaliadas e utilizadas de maneira semelhante (COPPIN e RICHARDS, 1990).

Atualmente, mesmo com o crescente emprego da Engenharia Natural em obras de infraestrutura, ainda são escassas ou inexistentes informações sobre as propriedades técnicas dos materiais vivos utilizados. Um dos assuntos mais importantes e prementes refere-se à influência das plantas, sobretudo do sistema radicial<sup>1</sup>, na estabilidade de taludes, e como esses elementos vivos podem ser somados aos coeficientes de segurança das intervenções. Esses coeficientes, até o presente momento, têm sido calculados exclusivamente por meio das propriedades de resistência e suporte dos materiais inertes.

Na estabilidade de taludes, as raízes das plantas são importantes por desempenhar funções mecânicas na massa de solo. Para Wu (1995), a maior contribuição mecânica das raízes é o aumento da resistência do solo ao cisalhamento através da transferência de sua resistência à tração. Na prática, a resistência à tração das raízes, quando associada aos parâmetros de resistência do solo (coesão e ângulo de atrito interno) e de geometria do terreno, pode ser

---

<sup>1</sup> Ao longo do presente trabalho será comum a presença dos termos radicular e radicial. Radicular faz referência às raízes de plantas propagadas por via seminal, em que a primeira raiz emitida a partir da semente recebe o nome de radícula. Radicial, por sua vez, faz referência às raízes emitidas por plantas propagadas vegetativamente, ou seja, por meio de partes de caules (estacas), ramos, raízes ou folhas. Na literatura científica, a separação entre os dois termos é, em grande parte dos casos, bastante evidente, pois se observa que nos trabalhos que usam plantas propagadas a partir de sementes dá-se preferência ao termo radicular (MOREIRA, 2004; DIAS et al., 2008; ABICHEQUER e BOHNEN, 2008; ALMEIDA e ALMEIDA, 2014; SCAPINELLI et al., 2016), enquanto nos trabalhos com plantas propagadas a partir de estacas (principalmente na área de biotecnologia e melhoramento genético de plantas) dá-se preferência ao termo radicial (ALFENAS et al., 2004; FERREIRA et al., 2009; STUEPP et al., 2013; NICACIO, 2016; MANTOVANI et al., 2017).

empregada em análises de estabilidade de taludes naturais (margens de cursos de água e vertentes) e artificiais (corte e aterro) (STOKES et al., 2008).

O efeito das raízes na resistência ao cisalhamento do solo, apesar de ter considerável importância nas práticas geotécnicas, ainda tem recebido pouca atenção no Brasil. Essa realidade tem como resultados diretos a escassez de informações quantitativas básicas para uso em abordagens de Engenharia Natural e Recuperação de Áreas Degradadas, bem como a inexistência de procedimentos e métodos padronizados para realização de testes *in situ*, seja de cisalhamento direto ou de arranquio, que até então tem sido os mais empregados. Da mesma forma, as lacunas de informação abrangem os tópicos mais específicos, como é o caso da modificação dos efeitos das raízes na resistência do solo de acordo com a espécie, densidade de plantio, tempo após o plantio e locais de desenvolvimento.

Em última análise, a ausência de informações quantitativas sobre a contribuição das raízes para a resistência ao cisalhamento do solo atua como um empecilho para que as plantas sejam utilizadas de forma mais segura em projetos de engenharia. Como resultado, diversas espécies vegetais têm sido utilizadas de maneiras que não otimizam as suas capacidades técnicas, como é o caso do reforço adicional de estruturas e dos usos com fins puramente ecológicos, paisagísticos e/ou estéticos.

Nesse sentido, analisar o efeito das plantas sobre o reforço do solo, ao longo de seu desenvolvimento espacial e temporal, permite identificar seu potencial como material construtivo. Esse tipo de informação é fundamental na prática de Engenharia Natural e/ou Recuperação de Áreas Degradadas, pois permite que na elaboração de um projeto a escolha de uma determinada solução técnica seja também baseada em análises quantitativas.

Para que as plantas possam ser consideradas em cálculos de estabilidade de taludes é indispensável que o seu efeito sobre a resistência ao cisalhamento do solo seja estudado por meio de ensaios representativos. Isso envolve, necessariamente, o uso de plantas crescendo sob condições de campo (*in situ*). Além disso, para viabilizar esses ensaios, é preciso desenvolver equipamentos adequados e metodologias específicas.

O presente trabalho, portanto, visa contribuir para o conhecimento do efeito de plantas lenhosas nos parâmetros de resistência do solo, nomeadamente coesão e ângulo de atrito interno. Para atingir este intento, a espécie reófila lenhosa *Phyllanthus sellowianus* (Klotzsch) Müll. (Phyllanthaceae), por suas excelentes qualidades biotécnicas<sup>2</sup> e por ser frequentemente

---

<sup>2</sup> Fácil propagação vegetativa, grande desenvolvimento e densidade da parte aérea e sistema radicial, rusticidade (resiliente aos danos causados pela dinâmica do fluxo em cursos de água) e grande flexibilidade de ramos. Propriedade biotécnica pode ser entendida como uma característica do material construtivo vivo que, por meio de

empregada em obras biotécnicas na região Sul do Brasil (de onde é nativa), foi selecionada para o estudo.

Considerando uma provável consonância com as características biotécnicas da espécie, o presente estudo parte da premissa de que as plantas de *P. sellowianus* são capazes de aumentar significativamente a resistência ao cisalhamento do solo mesmo após um período relativamente curto de desenvolvimento a campo (de até 12 meses). Isto posto, têm-se as seguintes hipóteses:

H<sub>0</sub>: Plantas de *P. sellowianus*, após 12 meses de desenvolvimento a campo, não proporcionam efeito positivo nos parâmetros de resistência do solo (coesão e ângulo de atrito interno).

H<sub>1</sub>: Plantas de *P. sellowianus*, após 12 meses de desenvolvimento a campo, proporcionam efeito positivo em pelo menos um dos parâmetros de resistência do solo (coesão e/ou ângulo de atrito interno).

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo geral

- Investigar o efeito de plantas da espécie lenhosa *Phyllanthus sellowianus* (Klotzsch) Müll. (Phyllanthaceae) na resistência do solo ao cisalhamento direto *in situ*, com vistas a fornecer elucidações e informações quantitativas para uso em análises de estabilidade geotécnica de taludes.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- Analisar a relação entre desenvolvimento da parte aérea e resistência do sistema radicial à tração (arranquio vertical), com vistas à seleção de plantas para a realização dos ensaios de cisalhamento direto *in situ*;
- Desenvolver uma metodologia e utilizá-la na avaliação *in situ* da resistência ao cisalhamento de solo com raízes;

---

características morfo-mecânicas inerentes, desempenha uma função técnica (hidrológica ou mecânica), e que, por um intermédio de ações, produz efeitos positivos nas propriedades de engenharia dos solos (SOUSA, 2015).

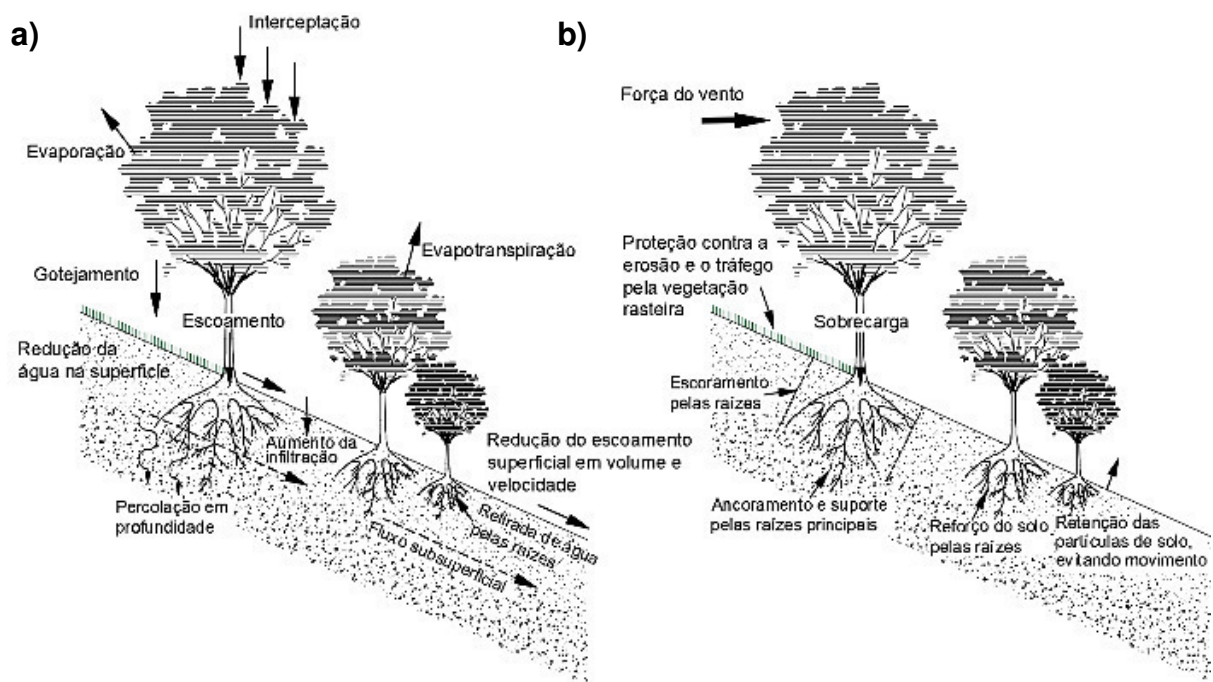
- Projetar e desenvolver os equipamentos específicos necessários para avaliar *in situ* o efeito das raízes na resistência ao cisalhamento do solo;
  
- Analisar o comportamento do sistema solo-raízes submetido aos ensaios de cisalhamento direto *in situ*;

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA<sup>3</sup>

### 2.1 O PAPEL DA VEGETAÇÃO NA ESTABILIDADE E PROTEÇÃO DE TALUDES

A influência da vegetação sobre a estabilidade e proteção de taludes ocorre de duas formas: por meio dos efeitos hidrológicos e dos efeitos mecânicos (COPPIN e RICHARDS, 2007; SOUSA, 2017) (Figura 1). Os efeitos hidrológicos envolvem a parte aérea e radicular das plantas e proporcionam interceptação de água da chuva, diminuição da velocidade da água durante o escoamento superficial, alterações nas taxas de infiltração e de evaporação de água no solo, e absorção de água pelas raízes com consequente transpiração (GRAY e SOTIR, 1996). Já os efeitos mecânicos de agregação, ancoramento e de resistência ao cisalhamento do solo são resultados da presença de raízes (COPPIN e RICHARDS, 2007; MORGAN e RICKSON, 1995).

Figura 1 – Efeitos hidrológicos (a) e mecânicos (b) da vegetação em taludes



<sup>3</sup> Esta revisão bibliográfica foi publicada na revista Scientia Agrária, em dezembro de 2017, v. 18, p. 129-143, sob o título *Métodos de avaliação da influência e contribuição das plantas sobre a estabilidade de taludes*.

De modo geral, os efeitos hidrológicos e mecânicos contribuem para a redução das solicitações na superfície do solo e aumento da resistência de suas camadas superficiais e subsuperficiais.

As plantas podem desempenhar efeitos positivos e negativos na estabilidade de taludes. Como efeitos positivos, pode ser destacado o reforço mecânico do solo pelas raízes (STOKES et al. 2008), a redução do conteúdo de água do solo pela absorção de água pelas raízes (MORGAN e RICKSON, 1995) e ação de ancoramento do solo pelo crescimento do sistema radicular (STYCZEN e MORGAN, 1995). Como efeitos negativos são destacados a sobrecarga, efeito de cunha das raízes e o tombamento pela ação do vento (GRAY e LEISER, 1982). Nos taludes, principalmente naqueles de maior inclinação, os efeitos negativos são normalmente desenvolvidos pela presença de árvores de grande porte, alocadas em posições inadequadas (centro e topo de talude) (DURLO e SUTILI, 2014). Esse é um dos motivos pelo qual se preconiza o uso de espécies de pequeno porte na estabilização de taludes.

A contribuição mais efetiva das plantas para a estabilidade de uma massa de solo se dá por meio do reforço mecânico proporcionado pelas raízes (GRAY e SOTIR, 1996). Diversos estudos desenvolvidos *in situ* (LAWRENCE et al., 1996; MICKOVSKI e VAN BEEK, 2009; VEYLON et al., 2015; WALDRON, 1977; WU et al., 1979) e em laboratório (OPERSTEIN e FRYDMAN, 2000; GHESTEM et al., 2014) indicam que o reforço do solo propiciado por pequenas quantidades de raízes pode conferir grande aumento de sua resistência ao cisalhamento.

## 2.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS RAÍZES NA RESISTÊNCIA DO SOLO

O uso de plantas em obras de estabilização de taludes tem efeitos reconhecidamente positivos na fixação do solo (OPERSTEIN e FRYDMAN, 2000). Tal fato, que resulta majoritariamente do reforço e ancoramento proporcionado pelas raízes, é governado por fatores como a arquitetura do sistema radicular, a resistência das raízes e a interação solo-raízes (REUBENS et al., 2007).

### 2.2.1 Morfologia do sistema radicular

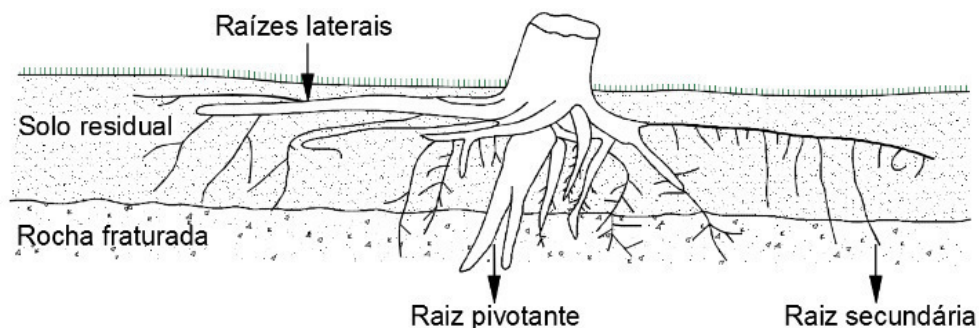
A morfologia ou arquitetura do sistema radicular é complexa e apresenta elevada variação entre diferentes espécies, tipos de solo e condições ambientais (COUTTS, 1983).



Também apresenta grande sensibilidade à variação de fatores físicos como aeração, temperatura, disponibilidade hídrica e resistência mecânica à penetração (LETEY, 1985).

Quando não são limitadas pelas condições químicas, físicas ou de profundidade do perfil do solo, as plantas herbáceas, arbustivas e arbóreas conseguem expressar suas feições morfológicas ou de arquitetura radicular (NORRIS et al., 2008). Os termos lateral, pivotante e secundária são comumente utilizados para descrever as diferentes raízes de uma planta lenhosa (Figura 2).

Figura 2 – Principais componentes do sistema radicular de uma planta lenhosa, incluindo raízes laterais, pivotantes e secundárias



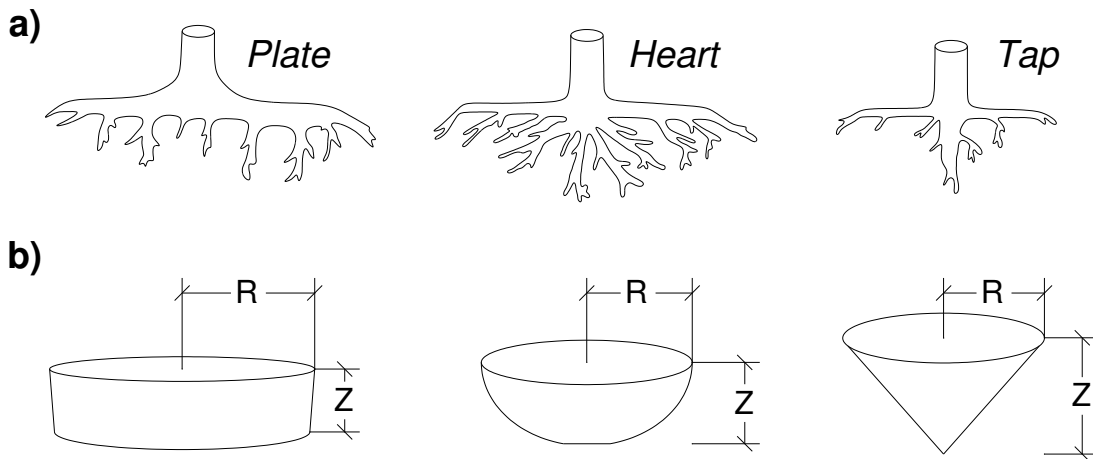
Fonte: (GRAY e SOTIR, 1996).

O aspecto geral ou morfologia do sistema radicular de plantas lenhosas também pode ser categorizado. Três formas distintas são reconhecidas: *plate* ou *sinker* (secundárias), com amplas raízes laterais e pequenas raízes verticais; *heart* (coração), com muitas raízes verticais e horizontais; e *tap* (aprumada), com raiz central (pivotante) e raízes laterais amplas e de proporções semelhantes (Figura 3a). Variantes dessas formas também podem ocorrer, uma vez que a morfologia é controlada pela genética, condições de solo e forma de propagação das plantas (GRAY e SOTIR, 1996). A representação integral dessas formas pode ser bastante complexa, por isso existem representações aproximativas de suas formas geométricas (Figura 3b).

Na estabilidade de taludes, o desenvolvimento de uma arquitetura radicular específica pode determinar a maior ou menor contribuição na resistência do solo (COUTTS, 1983). Sistemas radiculares fortes e verticais, que penetram as superfícies potenciais de ruptura ou de cisalhamento dos solos, têm maior potencial para aumentar a estabilidade de taludes contra deslizamentos (STYCZEN e MORGAN, 1995), funcionando como um sistema de ancoragem que interliga diferentes camadas de solo. Da mesma forma, sistemas radiculares com alta densidade de raízes finas podem ser mais efetivos no aumento da resistência ao cisalhamento

do solo do que aqueles constituídos por poucas raízes de diâmetros maiores (GRAY e SOTIR, 1996; NILAWEERA e NUTALAYA, 1999).

Figura 3 – Representação esquemática da forma natural de sistemas radiculares de plantas lenhosas do tipo *plate*, *heart* e *tap* (a); e aproximações geométricas dos sistemas radiculares (b). R, raio médio do sistema radicular; Z, profundidade efetiva do sistema radicular.



Fonte: (a, STOKES e MATTHECK, 1996; b, KOKUTSE et al, 2006).

Além disso, por terem maior área superficial específica, sistemas radiculares compostos por raízes finas são mais eficientes no confinamento do solo, o que constitui um mecanismo útil para minimizar perdas por erosão superficial (MORGAN e RICKSON, 1995; COPPIN e RICHARDS, 2007; ALI e OSMAN, 2008). De modo geral, as raízes têm sido classificadas, de acordo com o seu diâmetro, em: muito finas (<0,5 mm), finas (0,5-2 mm), pequenas (2-5 mm), médias (5-10 mm) e muito grandes ou grossas (>20 mm) (BÖHM, 1979). É comum que o sistema radicular de espécies lenhosas, principalmente em arbóreas e arbustivas, apresente tanto raízes grossas quanto raízes finas.

A capacidade das raízes lenhosas em estabilizar o solo também é fortemente influenciada pela sua simetria. Normalmente, a estabilidade é melhorada se a distribuição das raízes for simétrica. No entanto, em taludes, as raízes tendem a ter uma distribuição assimétrica no entorno da planta (NICOLL et al., 2006). No início do desenvolvimento das plantas essa pode ser uma resposta à maior disponibilidade de nutrientes e água. A longo prazo, o desenvolvimento assimétrico pode ser uma resposta ao estresse mecânico, que altera o número e/ou espessura das raízes na direção das tensões sofridas (STOKES et al., 2008). As tensões solicitantes mais comuns podem ser provocadas pela força do vento, energia do fluxo de água e movimentação de massas de solo. Nesse caso, para plantas em taludes, a quantidade de raízes,

assim como o seu espessamento, tende a ocorrer de maneira mais pronunciada na direção do declive (sentido topo base do talude) (DANJON et al., 2013).

### 2.2.2 Resistência das raízes

A resistência à tração das raízes é um “fator chave” no entendimento e predição da estabilização dos solos (LOADES et al., 2013a). A resistência à tração ( $\sigma_{rup}$ ) é a máxima força ( $F_{m\acute{a}x}$ ) aplicada por unidade de área para provocar a ruptura de um determinado material ( $\sigma_{rup}=F_{m\acute{a}x}/\acute{A}rea$ ). Nas plantas, esse teste pode ser realizado em raízes individuais (GENET et al., 2005), para um conjunto de raízes (GHESTEM et al., 2014), em raízes com diferentes idades (LOADES et al., 2015), ou até mesmo para uma ou mais plantas inteiras (LOADES et al., 2010). Esse tipo de ensaio fornece também a relação da resistência à tração com a deformação sofrida pelo material até o ponto de ruptura (LOADES et al., 2013a), o que possibilita o cálculo do módulo de elasticidade, usado para determinar deformações elásticas e plásticas no material. A unidade de medida padrão utilizada é a relação da força por área que é Pascal ( $N\ m^{-2}$ ) ou suas variações (LOADES et al., 2013b), mas em alguns estudos os valores são apresentados apenas em termos de força (VERGANI et al., 2014), o que dificulta o uso destes valores para análises de contribuição das raízes à resistência dos solos.

A resistência das raízes varia muito, não somente inter e intraespécies, mas também dentro de um mesmo sistema radicular (NORRIS et al., 2008). As variações dependem principalmente da espécie (genética) (STOKES et al., 2008), ambiente de desenvolvimento (SCHIECHTL e STERN, 1996), estação do ano, diâmetro da raiz (GRAY e SOTIR, 1996), orientação (GHESTEM et al., 2014) e constituição (teores de celulose e lignina) (ZHANG e CHEN, 2014).

As raízes normalmente apresentam valores de resistência à tração que variam de 8 a 80 MPa (NILAWEERA e NUTALAYA, 1999). Contudo, os valores máximos, dependendo da espécie, muitas vezes podem ultrapassar os 300 MPa (BISCHETTI et al., 2005). Dentro desses limites, raízes de arbustos e de árvores têm apresentado valores semelhantes (GRAY e SOTIR, 1996).

As raízes mais finas contribuem mais do que raízes grossas, no reforço e aumento da resistência ao cisalhamento do solo (GRAY e SOTIR, 1996), incrementando a resistência ao arranquio (OPERSTEIN e FRYDMAN, 2000), o que ocorre devido ao aumento exponencial da área superficial em função da redução do diâmetro das raízes (ALI e OSMAN, 2008). Entretanto, a maior resistência à tração das raízes finas não implica necessariamente em maior

reforço do solo (LOADES et al., 2013a). A relação entre resistência à tração e diâmetro de raízes é expressa na forma de uma equação logarítmica simples (Eq. 1) (GRAY e SOTIR, 1996).

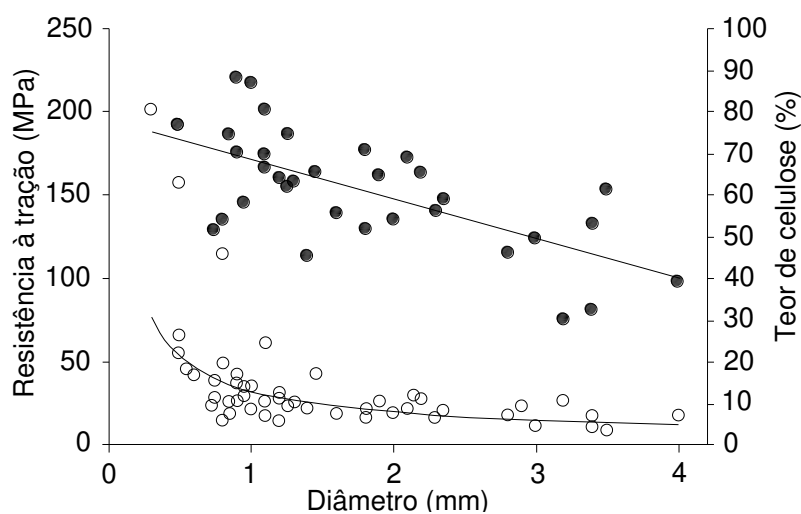
$$T_r = n \cdot D^m \quad (1)$$

Onde:  $T_r$ , resistência à tração (MPa);  $D$ , diâmetro da raiz;  $n$  e  $m$ , parâmetros da equação.

Diversos estudos indicam que a relação entre resistência à tração e diâmetro de raízes apresenta uma tendência que é descrita por uma equação de potência negativa (Figura 4) (BISCHETTI et al., 2005; GENET et al., 2005; MATTIA et al., 2005). Isso tem sido comumente associado à composição química primária das raízes, em que a maior resistência à tração apresentada por raízes finas pode ser resultado tanto da sua maior porcentagem de celulose (HATHAWAY e PENNY, 1975; GENET et al., 2005) (Figura 4) quanto da sua maior porcentagem de lignina (ZHANG e CHEN, 2014) em relação às raízes de maior diâmetro.

Quanto à composição química das raízes é importante destacar que, apesar de parecer um resultado que depende principalmente da espécie estudada, variações também podem ocorrer de acordo com a estação do ano (PATTON e GIESEKER, 1942), idade da planta (BERROCAL et al., 2004), posição ocupada no sistema radicular e condições de solo (ZHANG e CHEN, 2014).

Figura 4 – Variação da resistência à tração de acordo com o diâmetro das raízes e o seu percentual de celulose. ● = Percentual de celulose; ○ = Resistência à tração



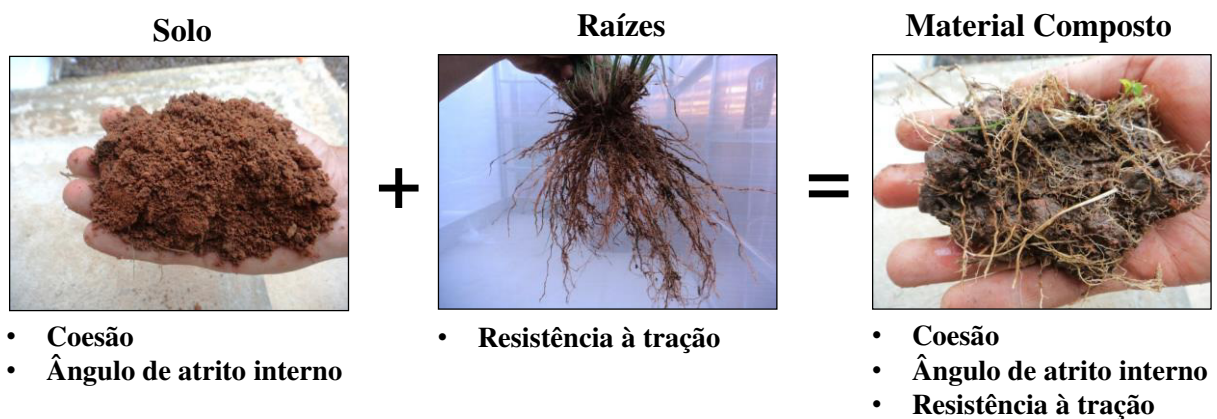
Fonte: (GENET et al., 2005).

Por outro lado, autores têm indicado que a representação gráfica da relação entre resistência à tração e diâmetro de raízes pode apresentar problemas de autocorrelação (HALES et al., 2013). A alternativa mais simples a esse problema é optar por uma relação linear entre resistência máxima à tração (N) e área transversal de raízes (mm<sup>2</sup>) (HALES et al., 2009; HALES et al., 2013).

### 2.2.3 Resistência do sistema solo-raiz

As raízes das plantas integram o solo produzindo um material composto, onde atuam como fibras de grande resistência à tração (GRAY e LEISER, 1982; WU, 1995). A resistência mecânica do material composto, portanto, advém da resistência à tração das raízes e dos parâmetros de resistência do solo (Figura 5). Trata-se de um sistema análogo aos sistemas de reforço do solo comuns em Engenharia Civil, onde a massa de solo é reforçada/estabilizada pela inclusão de materiais metálicos, sintéticos ou naturais (mas não vivos) (COPPIN e RICHARDS, 2007; GRAY e LEISER, 1982).

Figura 5 – Representação da soma de características que compõem a resistência mecânica do sistema solo-raiz

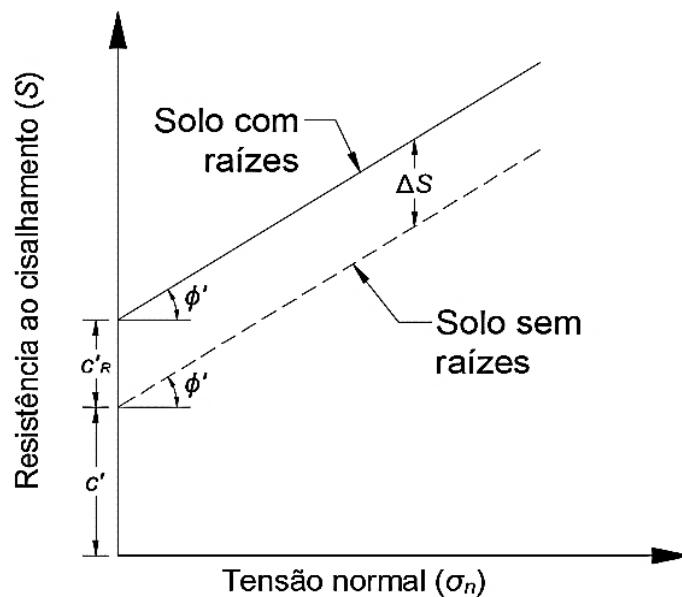


Fonte: Próprio autor.

Vários trabalhos têm indicado que a presença de raízes no solo pode ter efeito direto sobre a coesão (devido à resistência à tração das fibras lenhosas), porém pouca ou nenhuma influência sobre o ângulo de atrito interno (SHEWBRIDGE e SITAR, 1989; OPERSTEIN e FRYDMAN, 2000; COPPIN e RICHARD, 2007). Além disso, a massa de raízes tende a diminuir de forma linear o efeito das tensões normais aplicadas no solo (GRAY e LEISER, 1982). Assim, a relação entre resistência ao cisalhamento (S) e tensão normal ( $\sigma_n$ ) em solos com e sem raízes, demonstra genericamente o incremento da resistência ao cisalhamento devido

à presença de raízes (Figura 6). As raízes aumentam a resistência ao cisalhamento por meio do incremento em coesão do solo (intercepto coesivo,  $c'_R$ ). Os valores médios de acréscimos de coesão proporcionados pelas raízes podem variar de 1 a 25 kPa (NORRIS et al., 2008), dependendo do tipo e umidade do solo (estado de sucção), tipo de vegetação, idade, densidade de plantio, entre outros.

Figura 6 – Efeito de reforço proporcionado pelas raízes na resistência ao cisalhamento do solo. Onde:  $\phi'$ , ângulo de atrito interno efetivo do solo;  $c'$ , coesão efetiva;  $c'_R$ , aumento na coesão efetiva;  $\Delta S$ , aumento efetivo na resistência do solo ao cisalhamento devido à presença de raízes

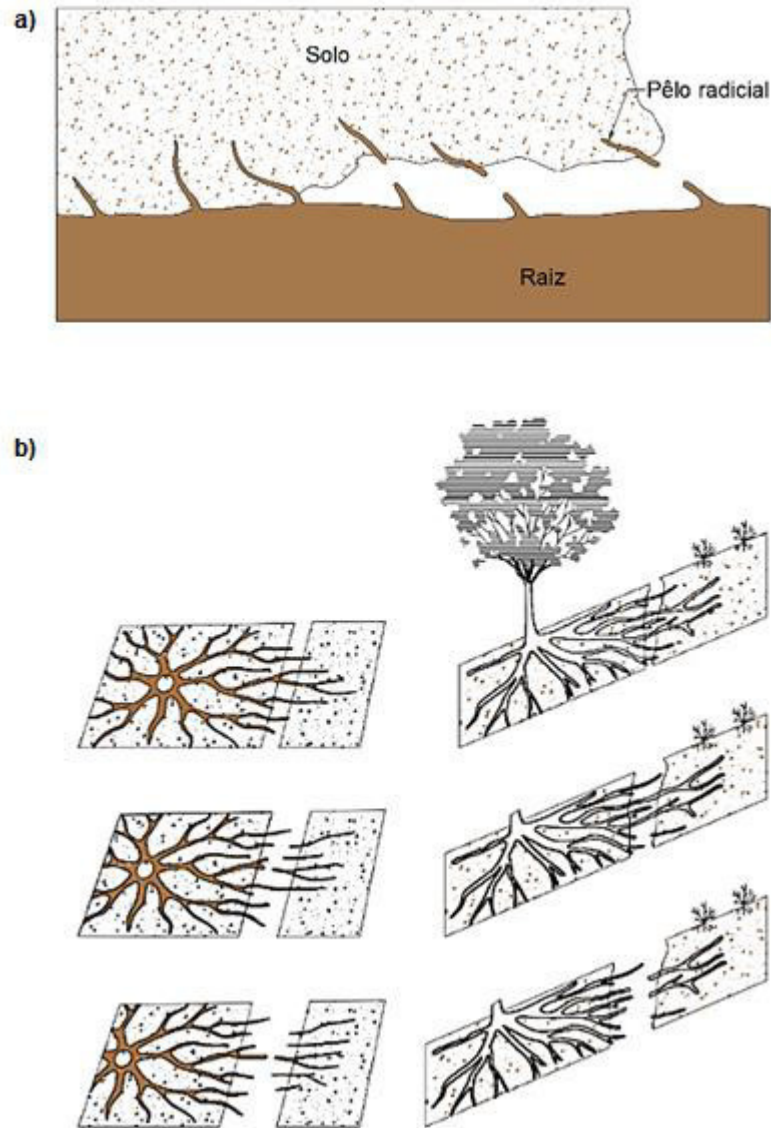


Fonte: (COPPIN e RICHARDS, 2007).

Apesar da maioria dos trabalhos encontrados relatarem o comportamento igual ou semelhante ao representado na Figura 6 (WALDRON, 1977; GRAY e OHASHI, 1983; SHEWBRIDGE e SITAR, 1989; WU e WATSON, 1998; OPERSTEIN e FRYDMAN, 2000), é importante destacar que também existem relatos de que as raízes, dependendo das condições do solo, podem ter maior influência sobre o ângulo de atrito interno, proporcionando pouca ou nenhuma variação na coesão (GRAF et al., 2009; ZANG et al., 2010; XIAO et al., 2014; VEYLON et al., 2015).

A mobilização da resistência máxima das raízes que integram o material composto pode ocorrer tanto por arranquio (deslizamento devido à pequena força de atrito entre solo e raiz, Figura 7a), como por ruptura (rompimento por tração, Figura 7b).

Figura 7 – Formas de falha da resistência das raízes. a) Propagação da falha por superação das forças de adesão entre solo e raízes; b) Rompimento das raízes sob tração em diferentes estágios de deformação



Fonte: (SCHWARZ et al., 2010a).

Além das raízes reforçarem o solo por meio de sua resistência à tração, existe o acréscimo em resistência proporcionado por diminuição da poro-pressão da água (COPPIN e RICHARDS, 2007). Esse fenômeno é caracterizado pelo aumento da sucção mátrica do solo, ou seja, a aproximação entre partículas sólidas devido à diminuição do filme de água que as envolve (FREDLUND e RAHARDJO, 1993).

Em cálculos de estabilidade de taludes, efeitos de sucção têm pouco uso prático, por isso são normalmente negligenciados. Nesses cálculos, por segurança, normalmente se considera a condição mais desfavorável à estabilidade, ou seja, a saturação da massa de solo.

O critério de ruptura de Mohr-Coulomb, usado para descrever a resistência ao cisalhamento de solos saturados (COPPIN e RICHARDS, 2007), pode ser modificado para incluir os efeitos da vegetação em solos não saturados. Nesse caso, a resistência ao cisalhamento de um solo não saturado, em termos de tensão efetiva ( $\sigma_n' = \sigma_n - u$ ), e considerando o efeito da vegetação, é representada pela equação 2. Removendo o efeito da vegetação, tem-se a equação 3 que, em termos de tensão efetiva, representa a equação geral de resistência ao cisalhamento de solos não saturados (FREDLUND e RAHARDJO, 1993). Por fim, a simplificação da equação 3, resulta, em termos de tensões efetivas, na equação geral de Mohr-Coulomb (Eq. 4).

$$S = (c' + c_R) + (\sigma_n - u_a) \cdot \tan \phi' + (u_a - u) \cdot \tan \phi^b \quad (2)$$

$$S = c' + (\sigma_n - u_a) \cdot \tan \phi' + (u_a - u) \cdot \tan \phi^b \quad (3)$$

$$S = c' + \sigma_n' \cdot \tan \phi' \quad (4)$$

Solos saturados geralmente perdem uma parcela significativa de coesão devido à redução das tensões de sucção (FREDLUND e RAHARDJO, 1993). Por essa razão, a contribuição das plantas para a resistência ao cisalhamento do solo tem sido considerada mais significativa em condições de solo saturado (COPPIN e RICHARDS, 2007). Assim, como a sucção ( $u_a - u$ ) se aproxima de zero na medida em que a saturação do solo é alcançada, em termos práticos, o termo referente a sucção pode ser desprezado, obtendo-se, em termos de tensões efetivas, a equação 5 (STOKES et al., 2008), que caracteriza a resistência ao cisalhamento de um solo saturado e com a presença de plantas.

$$S = (c' + c'_R) + (\sigma_n - u) \cdot \tan \phi' \quad (5)$$

Onde: S, resistência ao cisalhamento do solo (kPa);  $c'$ , coesão efetiva do solo (kPa);  $c'_R$ , contribuição das raízes à coesão do solo (kPa);  $\sigma_n$ , tensão normal (kPa);  $\sigma_n'$ , tensão normal efetiva (kPa);  $\phi'$ , ângulo de atrito interno efetivo do solo ( $^\circ$ );  $\phi^b$ , ângulo de atrito interno do solo ( $^\circ$ ) indicando a taxa de aumento na resistência ao cisalhamento relativa à sucção mátrica ( $u_a -$



u), com tensão normal no plano de ruptura ( $\sigma_n - u_a$ ) constante;  $u_a$ , poro-pressão do ar;  $u$ , poro-pressão da água;  $(u_a - u)$ , sucção mátrica do solo.

A magnitude do reforço mecânico da vegetação é uma função das propriedades das raízes, nomeadamente a densidade de comprimento radicular (*root length density*, comprimento de raízes por unidade de volume de solo) (LOADES et al., 2010), resistência à tração, módulo de elasticidade, relação comprimento/diâmetro, rugosidade da superfície, alinhamento (por exemplo, retilínea ou angulosa) (COPPIN e RICHARDS, 2007) e, orientação das fibrilas de celulose (ZHANG e CHEN, 2014).

O aumento na coesão do solo, devido à presença de raízes, varia proporcionalmente à densidade de comprimento e de área das raízes (COPPIN e RICHARDS, 2007). Assim, em condições de avaliação da estabilidade de taludes, normalmente apenas raízes com até 8 mm de diâmetro são consideradas. Estudos *in situ* têm mostrado que raízes acima desse diâmetro não contribuem significativamente para aumentar a resistência ao cisalhamento, e por isso são consideradas como se fossem tirantes individuais, funcionando como um sistema de ancoragem (WU et al., 1988).

Medições de resistência do material composto (solo-raízes) são comumente realizadas usando ensaios de cisalhamento direto *in situ*, em laboratório, ou por estimativas separadas de resistência à tração de raízes e resistência ao cisalhamento do solo. A interação entre solo e raízes pode ser estimada utilizando-se o modelo de raiz perpendicular desenvolvido por Wu (1976).

### 2.3 MODELO TEÓRICO DE AVALIAÇÃO DO REFORÇO DO SOLO PELAS RAÍZES

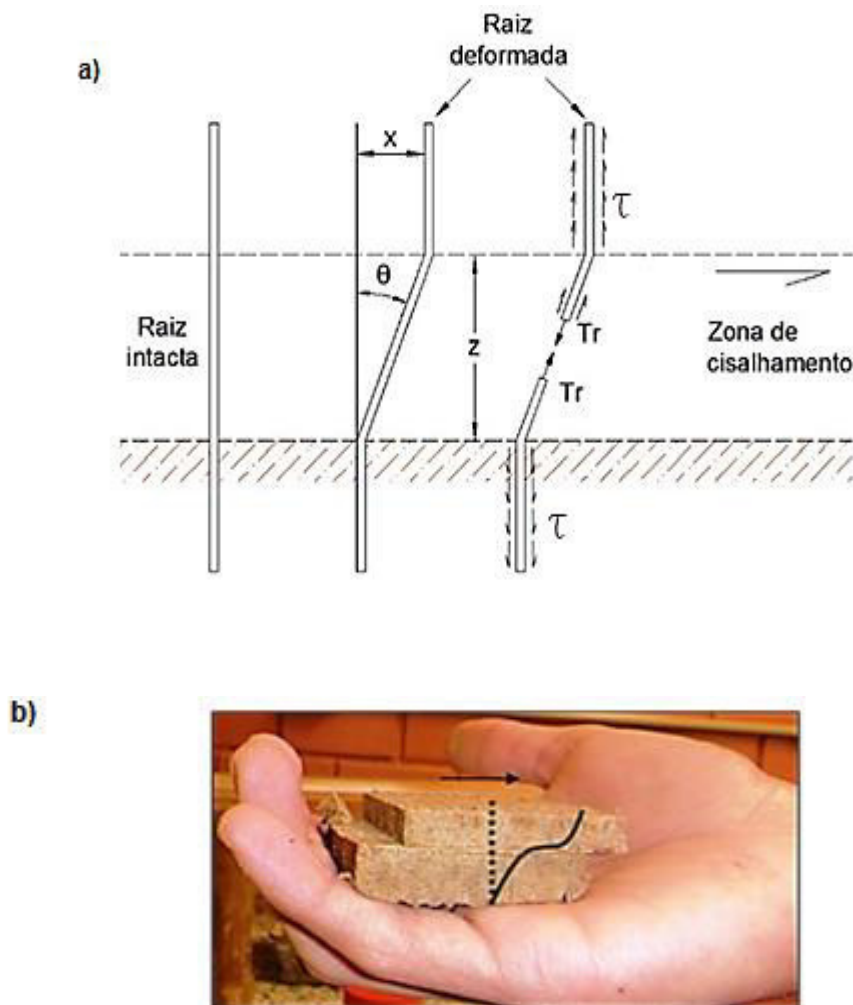
O modelo de raiz perpendicular (WU, 1976) é o mais usado para estimar a contribuição das raízes no reforço do solo ao cisalhamento.

O modelo foi desenvolvido partindo do pressuposto de que as raízes são elementos flexíveis e elásticos (WU, 1976), que atravessam um determinado plano de ruptura na posição perpendicular (Figura 8). Trata-se de um modelo idealizado para raízes pivotantes ou alinhadas perpendicularmente (raízes secundárias). É uma simplificação necessária, uma vez que na natureza as raízes atravessam planos de ruptura em várias posições diferentes, o que dificulta em grande medida a obtenção de informações detalhadas.

De acordo com o modelo de reforço do solo por raízes, quando o material composto (solo e raízes) é cisalhado, a resistência à tração mobilizada nas raízes pode ser separada em

componente tangencial, que resiste diretamente à força cisalhante, e componente normal, que aumenta a tensão de confinamento no plano de ruptura (WU, 1976). O modelo assume, implicitamente, que a resistência à tração das raízes é completamente mobilizada, não sendo por isso considerado o deslizamento das raízes no solo.

Figura 8 – Modelo de reforço do solo por raiz perpendicular. a) Raiz flexível e elástica alinhada perpendicularmente à superfície de ruptura no início do teste e sua deformação com aplicação de uma tensão horizontal contínua. Onde:  $z$ , espessura da zona de cisalhamento;  $x$ , deflexão horizontal da raiz;  $\theta$ , ângulo de distorção do cisalhamento;  $Tr$ , resistência da raiz à tração;  $\tau$ , força de atrito entre solo e raiz. b) representação de amostra de solo cisalhada com um segmento de raiz (linha pontilhada) inicialmente alinhado perpendicularmente ao plano de ruptura e posteriormente deformado (linha contínua).



Fonte: (a, WU, 1976; GRAY e LEISER, 1982).

Assume-se também que o ângulo de atrito interno do solo ( $\phi$ ) não é afetado pelo reforço. Assim, matematicamente, a resistência à tração nas fibras é transformada em aumento na resistência ao cisalhamento do solo (GRAY e LEISER, 1982), descrito pela equação 6.

$$\Delta S = t_R \cdot (\cos \theta \cdot \tan \phi + \sin \theta) \quad (6)$$

Onde:  $\Delta S$ , aumento na resistência ao cisalhamento proporcionado pelas raízes (kPa);  $\theta$ , ângulo de distorção do cisalhamento ( $^\circ$ );  $\phi$ , ângulo de atrito interno do solo ( $^\circ$ );  $t_R$ , resistência média das raízes por unidade de área (kPa).

O valor de resistência média à tração das raízes por unidade de área de solo ( $t_R$ ) pode ser determinado pela multiplicação da resistência média à tração das raízes ( $T_R$ ) pela fração transversal de solo ocupado por raízes ( $A_R/A$ ) (Eq. 7) (GRAY e LEISER, 1982).

$$t_R = T_R \cdot (A_R / A) \quad (7)$$

Onde:  $T_R$ , resistência média à tração das raízes (MPa ou kPa);  $A_R/A$ , fração de área transversal de solo ocupada por raízes (adimensional; na língua inglesa é denominada como RAR – *Root Area Ratio*).

Assim, a resistência à tração das raízes é calculada pela equação 8 (BISCHETTI et al., 2005):

$$T_R = \frac{F_{\text{máx}}}{A_r} = \frac{F_{\text{máx}}}{\left( \frac{D^2 \cdot \pi}{4} \right)} \quad (8)$$

Onde:  $F_{\text{máx}}$ , força máxima de tração aplicada em um segmento de raiz (kN);  $A_r$ , área do segmento de raiz ( $\text{m}^2$ );  $D$ , diâmetro do segmento de raiz (m).

A equação 6 é importante porque permite que a máxima contribuição das raízes para a resistência do solo seja estimada a partir do valor medido de resistência à tração ( $T_R$ ) e da fração da área transversal de solo ocupada por raízes ( $A_R/A$ ). A área transversal de raízes de uma planta ( $A_R$ ) é determinada pelo numerador da equação 9 (GRAY e LEISER, 1982).

$$\frac{A_R}{A} = \frac{\sum n_i \cdot a_i}{A} \quad (9)$$

Onde:  $n_i$ , número de raízes na classe de diâmetro  $i$ ;  $a_i$ , área transversal média das raízes na classe de diâmetro  $i$  ( $m^2$ );  $A$ , área transversal de solo da amostra considerada ( $m^2$ ).

Quando os ensaios de tração são realizados para raízes individuais, o cálculo da contribuição média de resistência à tração por área de solo assume a equação 10 (GRAY e LEISER, 1982).

$$t_R = \frac{\sum T_i \cdot n_i \cdot a_i}{A} \quad (10)$$

Onde:  $T_i$ , resistência à tração das raízes da classe  $i$  de diâmetro (kPa).

Assim, a contribuição das raízes para a resistência do solo pode ser estimada com o uso das equações 6 e 7 (GRAY e LEISER, 1982). A única incerteza ou variável indeterminável nas equações é o ângulo de distorção do cisalhamento ( $\theta$ ), que corresponde à inclinação máxima da raiz antes do rompimento. Esse ângulo, como visto na Figura 8a, varia de acordo com o deslocamento de cisalhamento ( $x$ ) e com a espessura da zona de cisalhamento ( $z$ ). Trabalhos têm indicado que os valores  $\theta$  variam de  $40^\circ$ - $90^\circ$  (WALDRON, 1977; WU et al., 1979). Essa variação, combinada com ângulos de atrito interno do solo de  $25^\circ$  e  $40^\circ$ , faz com que o termo entre parênteses na equação 6 apresente valores de 1,0 a 1,3. Usualmente, o valor médio de 1,15 é o mais adotado, fazendo com que a equação 6 assuma a forma da equação (11) (COPPIN e RICHARDS, 2007).

$$\Delta S = 1,15 \cdot t_R \quad (11)$$

É importante observar que o modelo de raiz perpendicular assume que a ruptura das raízes ocorre por tração. Para essa pressuposição ser válida, a ruptura por deslizamento ou falha na adesão solo-raiz precisa ser prevenida. Nesse caso, a força de ligação entre solo e raízes deve exceder a resistência à tração das raízes. Isso é possível se as raízes apresentarem comprimento suficiente além da zona de ruptura e grande adesão ao solo (COPPIN e RICHARDS, 2007).

Embora recentemente tenham sido desenvolvidos outros modelos mais elaborados e complexos para a estimativa de contribuição das raízes para o reforço do solo, nomeadamente *Fiber Bundle Model* (FBM – POLLEN e SIMON, 2005) e *Root Bundle Model* (RBM – SCHWARZ et al., 2010b), o modelo de raiz perpendicular de Wu (1976) ainda é o mais utilizado devido à sua simplicidade e facilidade de aplicação prática. No entanto, Pollen e Simon (2005) mostram que, para plantas com raízes laterais, somente uma fração das raízes cruzam a superfície potencial de ruptura e destas apenas algumas alcançam a resistência máxima à tração em uma solicitação, fazendo com que as equações 10 e 11 superestimem o valor de  $\Delta S$ . O  $\Delta S$  resulta de um valor determinado em teste de cisalhamento direto *in situ* ou em laboratório (Figura 8b), que corresponde a um valor observado de aumento de resistência ao cisalhamento proporcionado pelas raízes. Esse valor pode ser estimado com o modelo de raiz perpendicular de Wu (1976). Assim, apenas para raízes perpendiculares, a equação 10 fornece resultados semelhantes de  $\Delta S$ . Na correção de situações onde a posição inicial das raízes é desconhecida, a abordagem mais prática é a redução empírica da resistência ao cisalhamento estimada a partir da resistência à tração, utilizando um fator de 0,3 a 0,5 (WU, 2013).

## 2.4 ENSAIOS PARA DETERMINAR O REFORÇO DOS SOLOS PELAS RAÍZES

A determinação do efeito mecânico das raízes sobre o reforço do solo é uma necessidade básica para a inclusão das plantas em cálculos de estabilidade de taludes. Principalmente por questões de representatividade, ensaios *in situ* são preferíveis para as determinações. Dois tipos de ensaio têm figurado na literatura como preferenciais para quantificar incrementos em resistência do solo devido à presença de raízes.

### 2.4.1 Arranquio *in situ*

O arranquio *in situ* pode ser conduzido de duas formas distintas: arranquio de planta inteira ou arranquio de raízes individuais por classes de diâmetro (KARRENBERG et al., 2003; LIU et al., 2014; NORRIS et al., 2008). Em ambos se aplica uma força de tração para a extração total ou parcial das raízes do solo. A variável resposta, neste caso, é a maior carga suportada pelo sistema radicular, a qual pode ser representada em termos de força (N ou kN) (LIU et al., 2014) ou de tensão (kPa) (WU et al., 2014), caso a área transversal das raízes seja medida.

O arranquio de planta inteira pode proporcionar a obtenção de informações mais representativas da contribuição total do sistema radicular para a resistência do solo. Por outro

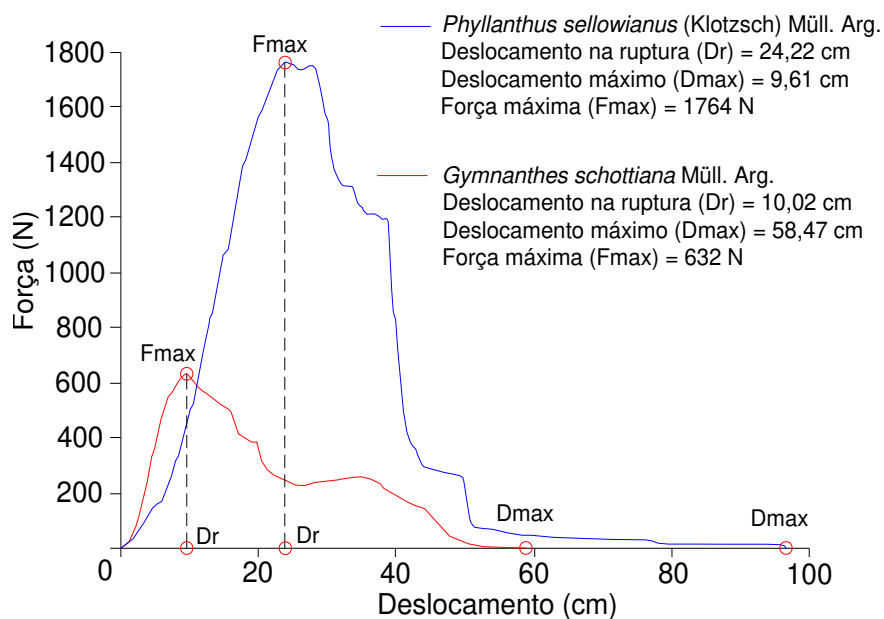
lado, elimina-se a possibilidade de identificar a contribuição de resistência de cada classe diamétrica das raízes. Isso porque a resistência total, na ausência de valores de diâmetro e resistência à tração individual de cada raiz, deve ser distribuída entre todas as classes de diâmetro (área total de raízes) encontradas na planta arrancada.

Nos testes de arranquio, durante a aplicação da força de tração, as raízes podem falhar por ruptura ou deslizamento (SCHWARZ et al., 2010b). Na ruptura, a resistência das raízes é, em alguma parte de seus segmentos, superada pelo atrito entre solo e raízes (os segmentos que permanecem no solo). Essa é uma ação direta da área superficial específica das raízes de menor diâmetro. No deslizamento, a resistência das fibras supera o atrito entre solo e raízes e o segmento principal e suas ramificações são inteiramente extraídos do solo.

Nesses ensaios, a grande maioria das raízes rompe, enquanto que a extração de raízes inteiras é menos provável, mas pode acontecer em condições de solo saturado (COPPIN e RICHARDS, 2007).

A Figura 9 mostra um gráfico típico da relação força-deslocamento, obtido no arranquio de plantas inteiras de duas espécies reófitas nativas da Mata Atlântica, *Phyllanthus sellowianus* (Klotzsch) Müll. Arg. e *Gymnanthes schottiana* Müll. Arg., que são comumente utilizadas em obras de Engenharia Natural no Sul do Brasil.

Figura 9 – Arranquio de plantas inteiras. Relação típica entre força e deslocamento



Fonte: (HÖRBINGER, 2013).

A primeira fase do ensaio é caracterizada pela ascensão dos valores de força, que inicia com o alongamento das raízes e termina quando a máxima resistência das fibras é mobilizada (máxima resistência à tração) (SCHWARZ et al., 2010b).

A segunda fase é a de declínio ou deslizamento, onde existe uma resistência residual pelo atrito entre raízes rompidas e solo, ou pelo rompimento de raízes remanescentes (SCHWARZ et al., 2013). A principal característica dessa fase é o decréscimo em resistência até o sistema radicular ser completamente extraído do solo.

No gráfico (Figura 9), cada pequeno pico, tanto na fase de ascensão quanto na fase de decréscimo, representa a falha de um ou mais segmentos de raiz. Os valores de resistência das raízes ao arranquio, caso sejam provenientes de plantas propagadas a partir de estacas vivas, podem ser facilmente convertidos em  $c_R$  (kPa), usando a equação 12 (WU et al., 2014).

$$c_R = \frac{F_{m\acute{a}x}}{\pi \cdot d \cdot L} \cdot 0,5 \quad (12)$$

Onde:  $F_{m\acute{a}x}$  é a resistência máxima ao arranquio (kN),  $d$  é o diâmetro da estaca (m) e  $L$  é o comprimento da estaca (m). A multiplicação por 0,5 é uma medida conservadora, pois assume que as raízes estão presentes apenas em 50% da superfície de ruptura. Esse fator de redução é arbitrado, uma vez que o autor não apresenta bases empíricas que o corroborem.

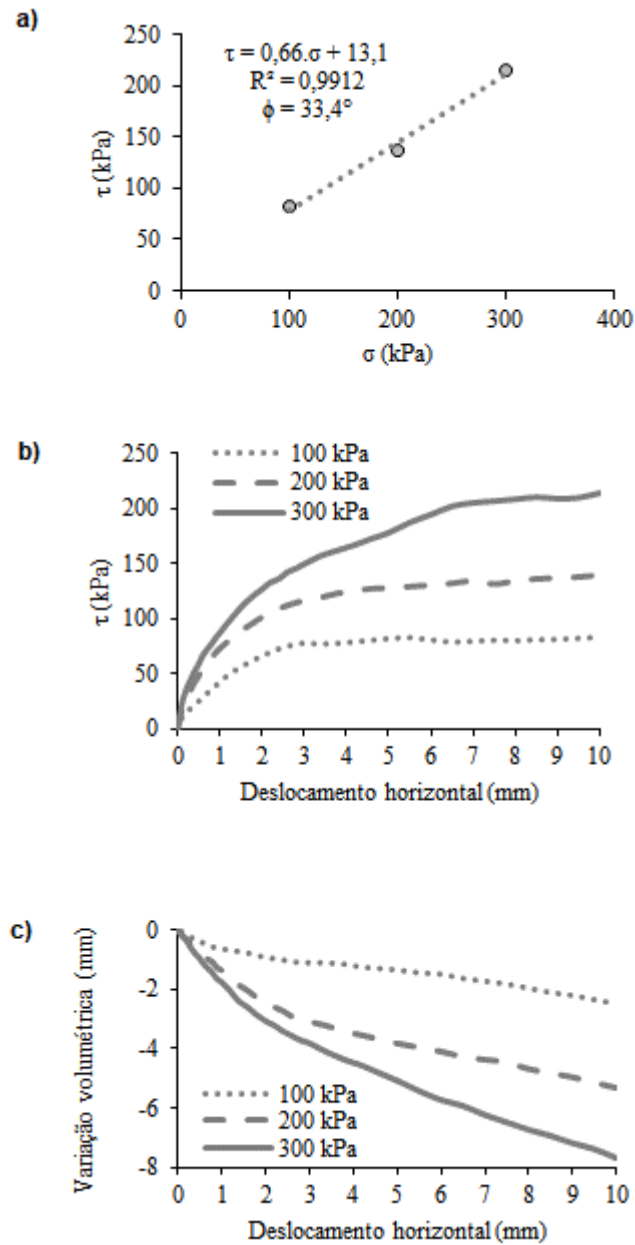
É importante destacar que o método de arranquio é capaz de determinar apenas a resistência à tração das raízes. Nesse teste, a interação solo-raízes não é avaliada integralmente, ou seja, de modo a fornecer valores observados de contribuição para a resistência ao cisalhamento do solo ( $c'_R$ ), variável que é utilizada no cálculo de estabilidade de taludes com vegetação. A obtenção dessa variável pode ser realizada através de teste de cisalhamento direto *in situ*.

#### **2.4.2 Cisalhamento direto *in situ***

O cisalhamento direto *in situ* segue o mesmo princípio dos testes de cisalhamento direto realizados em laboratório (LAMBE e WHITMAN, 1969). O objetivo é a obtenção de uma envoltória de resistência, determinando-se o intercepto coesivo e o ângulo de atrito interno do solo, além da obtenção da relação entre tensão cisalhante e deslocamento ou deformação

horizontal, e da relação entre deslocamento ou deformação vertical e deslocamento ou deformação horizontal. Esses exemplos são apresentados na Figura 10.

Figura 10 – Informações obtidas em ensaios de cisalhamento direto em solo arenoso. a) Representação da envoltória de Mohr-Coulomb; b) Relação entre tensão cisalhante aplicada e deslocamento horizontal; c) Relação entre variação volumétrica e deslocamento horizontal;  $\tau$ , tensão cisalhante (kPa);  $\phi$ , ângulo de atrito interno ( $^{\circ}$ ).



Fonte: Próprio autor.

O esquema de um sistema para cisalhamento direto *in situ*, desenvolvido por Endo (1980), é apresentado na Figura 11. Esse sistema foi desenvolvido para incluir plantas inteiras em testes de cisalhamento e por isso utiliza corpos de prova de grandes dimensões



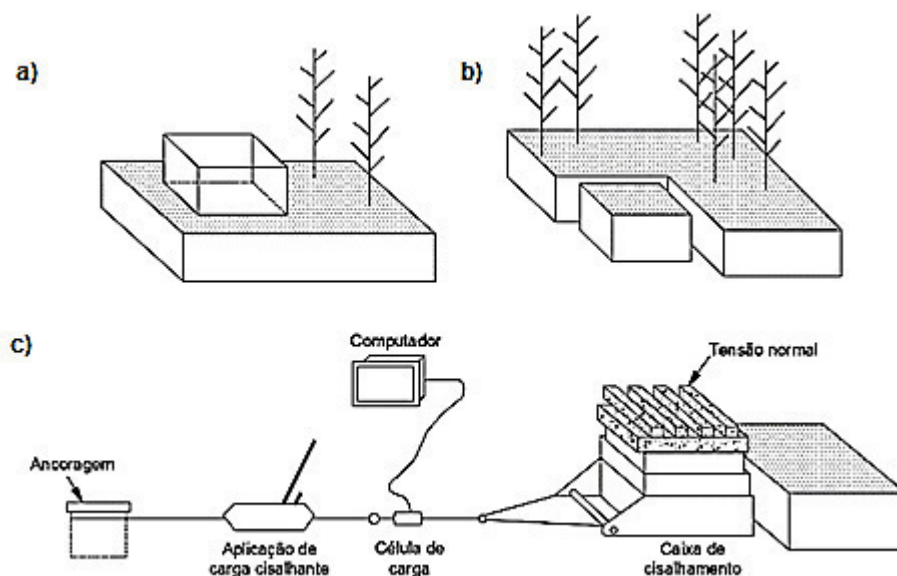
(normalmente maiores que 20×20×20 cm) (FAN e SU, 2008; ABDULLAH et al., 2011; PRETI e GIADROSSICH, 2009; GHESTEM et al., 2014). A Tabela 1 apresenta uma coletânea de dimensões de caixas utilizadas em testes de cisalhamento direto *in situ*.

Tabela 1 – Dimensões de caixas utilizadas em ensaios de cisalhamento direto *in situ*.

<b>Autor</b>	<b>Dimensões (m) (Comprimento; Largura; Altura)</b>
Veylon et al. (2015)	0,50; 0,50; 0,30
Ghestem et al. (2014)	0,50; 0,50; 0,30
Abdullah et al. (2011)	0,30; 0,30; 0,16
Comino et al. (2010)	0,30; 0,30; 0,10
Mickovski e Van Beek (2009)	0,32; 0,32; 0,20
Fan e Su (2008)	0,30; 0,30; 0,20
Cammeraat et al. (2005)	0,60; 0,60; 0,40
Lawrence et al. (1996)	0,25; 0,25; 0,10
Tobias (1995)	0,50; 0,50; 0,15
Endo (1980)	0,60; 0,12; 0,12
<b>Média</b>	<b>0,42; 0,37; 0,20</b>

Em laboratório, os corpos de prova de cisalhamento direto normalmente têm dimensões de 5×5×2 cm ou 10×10×2 cm (BRAJA, 2013).

Figura 11 – Representação esquemática de um equipamento para realização de testes de cisalhamento direto *in situ*, em blocos de solo com raízes. a) Caixa para moldar o bloco de solo com raízes; b) Caixa com bloco de solo e raízes; c) Sistema de cisalhamento preparado para a realização do teste



Fonte: (ENDO, 1980).

Os princípios de realização do ensaio são bem definidos. Como observado na Figura 11, o corpo de prova é moldado diretamente no solo e pode incluir ou não plantas. Na aplicação da tensão cisalhante ( $\tau$ ), apenas o bloco moldado é movimentado sobre a superfície de solo. Na posição vertical, a tensão normal constante ( $\sigma$ ) é aplicada. No caso representado na Figura 11, o carregamento vertical é realizado com blocos de concreto de peso conhecido. As tensões normais aplicadas são normalmente condizentes com a profundidade de atuação das raízes, comumente menor que 3 m. A Tabela 2 apresenta uma coletânea de tensões normais aplicadas em testes de cisalhamento direto *in situ*.

Tabela 2 – Valores de tensão normal utilizados em ensaios de cisalhamento direto *in situ*.

Autor	Tensão normal (kPa)
Veylon et al. (2015)	3,5; 4,7; 6,8
Ghestem et al. (2014)	3,5; 4,7; 6,8
Abdullah et al. (2011)	13,3; 24,3
Mickovski e Van Beek (2009)	1,5; 3
Fan e Su (2008)	2,6; 5,4; 10,5; 21,3
Ali e Osman (2008)	10; 20; 30
Cammeraat et al. (2005)	3,3; 4,1
Lawrance et al. (1996)	4,7; 7,8; 10,9; 14,1
Tobias (1995)	20

Destaca-se que, contrariamente ao que alguns valores apresentados na Tabela 2 podem indicar, para se obter os parâmetros de resistência do solo (coesão e ângulo de atrito interno), é necessário que ao menos três blocos de solo com propriedades físicas semelhantes sejam cisalhados sob tensões normais diferentes. Esse tipo de condução possibilita a obtenção de uma equação linear, com intercepto (coesão) e coeficiente angular (ângulo de atrito interno).

A partir do ensaio de cisalhamento direto *in situ*, a contribuição das raízes para o aumento da coesão do solo é encontrada pela diferença entre os parâmetros de resistência de blocos com e sem raízes, desde que estejam com mesma umidade (sucção mátrica).

Ao cisalhar blocos de solo com raízes, as raízes podem romper, alongar ou deslizar (GRAY e SOTIR, 1996; SCHWARZ et al., 2010a). Esses comportamentos podem ocorrer de modo individual ou conjunto no sistema radicular. O rompimento e o deslizamento ocorrem da mesma maneira que no teste de arranquio, enquanto o alongamento depende do módulo de elasticidade das raízes (elasticidade e plasticidade). Na prática, o alongamento tem contribuição intermediária para a resistência. A contribuição total de uma raiz para o aumento da resistência do solo ocorre com sua ruptura (WU, 1995). Por essa razão, caso a ruptura das raízes não ocorra

durante os testes de cisalhamento direto, a determinação da resistência à tração das raízes (WU, 2013) torna-se uma necessidade.

## 2.5 AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE DE TALUDES CONSIDERANDO A VEGETAÇÃO

O conceito de fator de segurança é amplamente utilizado para avaliar a estabilidade de taludes e vertentes, e também de estruturas de contenção (HUBBLE, 2010). Trata-se de um valor adimensional que resulta da razão entre as forças resistentes e forças solicitantes que ocorrem ao longo de uma superfície potencial de ruptura (GUIDICINI e NIEBLE, 1983; BRAJA, 2013). As rupturas ocorrem quando esse valor atinge a unidade. Essa é a condição conhecida como equilíbrio limite, na qual as forças solicitantes igualam as forças resistentes.

Análises de estabilidade de taludes, considerando a influência das plantas, têm sido conduzidas tanto para taludes com ruptura translacional (taludes infinitos) como para taludes com ruptura rotacional (taludes circulares) (HUBBLE, 2010). Os primeiros ocorrem, normalmente, sobre superfícies de deslizamento preexistentes (rocha ou material pouco alterado e diferentes horizontes do solo, por exemplo), enquanto, nos segundos, não é possível fazer uma distinção entre a massa que deslizou e a que ficou estável (CLAGUE e STEAD, 2012).

Matematicamente, as rupturas translacionais e rotacionais são analisadas considerando fatias de solo submetidas a três campos de força distintos: (i) as forças devidas ao peso dos materiais; (ii) ao escoamento da água; e (iii) ao cisalhamento (FIORI e CARMIGNANI, 2009). A análise de estabilidade consiste em considerar o equilíbrio dessas forças, uma vez que as duas primeiras se somam, e tendem a movimentar a massa de solo, enquanto a última atua contra essa movimentação (GERSCOVICH, 2016).

No talude de ruptura translacional, que tende a ter profundidade de ruptura semelhante ao longo de toda a sua extensão (superfície de ruptura plana), a análise de estabilidade é conduzida para uma única fatia de solo (GUIDICINI e NIEBLE, 1983), enquanto no talude de ruptura circular, que tem profundidades variáveis, a análise é conduzida utilizando o método de várias fatias de solo (FIORI e CARMIGNANI, 2009). No deslizamento translacional a superfície potencial de ruptura tende a ser a interface entre solo e rocha (ou entre camadas de solo com estruturas físicas diferentes), ao passo que no rotacional, a superfície de ruptura é totalmente desconhecida, sendo encontrada por meio de cálculos iterativos, considerando-se aquela que apresentar o menor fator de segurança (BRAJA, 2013).

Na natureza, rupturas translacionais ocorrem principalmente em vertentes com inclinações acentuadas, sob influência de chuvas de longa duração. Nas encostas da Serra do Mar, no Sudeste do Brasil, por exemplo, onde a estabilidade dos solos é em grande parte mantida devido às pressões de sucção, vulgarmente conhecida como “coesão aparente”, o avanço de frentes de saturação é um dos principais mecanismos de perda de resistência e estabilidade de vertentes (WOLLE e CARVALHO, 1989). Rupturas rotacionais, além de outros ambientes, são comuns nas margens de cursos de água, principalmente em zonas de transporte e deposição, onde as camadas de solo tendem a ser mais espessas. Nesses locais, a elevação do nível de água até o estágio de *bankfull*, ou vazão em que o canal é mais efetivo no transporte de sedimentos (DUNNE e LEOPOLD, 1978), atua favorecendo a saturação da massa e a competência do fluxo em transportar partículas de solo, ambos desfavoráveis à manutenção da estabilidade.

No uso de métodos para contabilizar a influência da vegetação, é importante que se considere o alcance do sistema radicular dentro do solo (WU, 1995), visto que raízes de gramíneas, arbustos e árvores atuam em diferentes profundidades. Mesmo plantas que têm potencial para desenvolver raízes profundas, também podem ser limitadas de acordo com as condições físicas, químicas e biológicas dos solos (BENGOUGH et al., 2011). Normalmente as influências mais significativas de incrementos na resistência ao cisalhamento dos solos ocorrem nas camadas mais superficiais (ABERNETHY e RUTHERFORD, 2001), devido à maior densidade de área superficial e comprimento total das raízes.

A análise de estabilidade para determinar o fator de segurança de um talude vegetado pode incorporar cinco grandes efeitos da vegetação (COPPIN e RICHARDS, 2007): (i) Aumento da coesão efetiva do solo devido ao reforço da matriz de raízes ( $c'_R$ ); (ii) Aumento da coesão efetiva do solo como resultado da sucção proporcionada pela transpiração ( $c'_s$ ), ou um decréscimo na poro-pressão da água ( $u$ ); (iii) Aumento da sobrecarga devido ao peso da vegetação ( $S_w$ ); (iv) Aumento da força de perturbação devido ao vento ( $D$ ), agindo paralelamente à encosta; (v) Aumento da força de tração ( $T$ ), devido às raízes inclinadas de grande diâmetro atuando como elementos de tração.

A influência da vegetação na estabilidade de taludes é representada esquematicamente nas Figuras 12 e 13. Dos cinco efeitos possíveis da vegetação em taludes, alguns deles podem ter menor importância de acordo com o tipo de planta utilizada e também das condições do solo. Por exemplo, a sobrecarga pelo peso da vegetação ( $S_w$ ), a força de perturbação devido ao vento ( $D$ ) e a força de tração ( $T$ ) somente são significativas para árvores de grande porte, sendo, portanto, negligenciáveis no uso de gramíneas, ervas e arbustos. Em condições de solo saturado,

que são as mais desfavoráveis, o efeito da sucção tende a zero, e por isso pode ser negligenciada a favor da segurança. Por fim, o efeito restante, e por isso o de maior importância, é o aumento da coesão efetiva do solo devido ao reforço da matriz do solo pelas raízes.

Os métodos de análise de estabilidade de taludes podem ser modificados para incluir o efeito da vegetação. O método mais usado na abordagem de estabilidade de um talude de terra é o de equilíbrio limite, no qual se assume que o critério de ruptura linear (Mohr-Coulomb) é satisfeito ao longo de toda a superfície de deslizamento e que existe um fator de segurança constante ao longo desta superfície (MASSAD, 2010). Como descrito no início da seção, as análises podem ser realizadas para taludes de ruptura translacional e rotacional.

No uso de análise de tensões efetivas pelo método de talude infinito, o fator de segurança sem a vegetação pode ser definido pela equação 13 (STYCZEN e MORGAN, 1995).

$$FS = \frac{c' + (\gamma \cdot z - \gamma_w \cdot h_w) \cdot \cos^2 \beta \cdot \tan \phi'}{\gamma \cdot z \cdot \sin \beta \cdot \cos \beta} \quad (13)$$

Onde: FS, fator de segurança (adimensional);  $\gamma$ , peso específico do solo (kN/m<sup>3</sup>); z, altura do solo acima da superfície de ruptura (m);  $\beta$ , ângulo do talude (°);  $\gamma_w$ , peso específico da água (kN/m<sup>3</sup>);  $h_w$ , altura da superfície freática acima da superfície de deslizamento (m);  $\phi'$ , ângulo de atrito interno do solo (°).

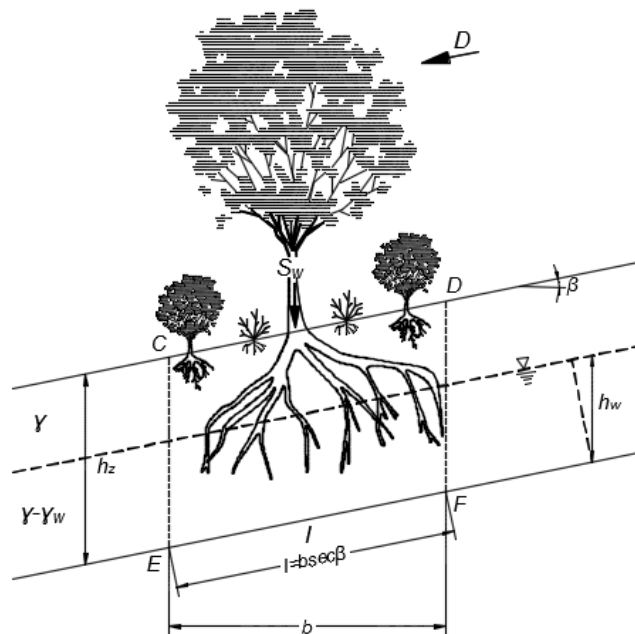
Assim, para um talude infinito com influência da vegetação (Figura 12), o cálculo do fator de segurança é descrito pela equação 14 (COPPIN e RICHARDS, 2007).

$$FS = \frac{(c' + c'_R) + \left\{ [(\gamma \cdot z - \gamma_w \cdot h_w) + S_W] \cdot \cos^2 \beta + T \cdot \sin \theta \right\} \cdot \tan \phi' + T \cdot \cos \theta}{[(\gamma \cdot z + S_W) \cdot \sin \beta + D] \cdot \cos \beta} \quad (14)$$

Onde: FS, fator de segurança (adimensional);  $c'_R$ , coesão efetiva do solo acentuada devido ao reforço da matriz radicular da vegetação ao longo da superfície de deslizamento (kPa);  $S_W$ , sobrecarga devido ao peso da vegetação (kPa);  $h_w$ , altura vertical do lençol freático acima do plano de deslizamento com a vegetação (m); T, força de tensão das raízes atuando na base da superfície de deslizamento (kN/m);  $\theta$ , ângulo entre as raízes e o plano de ruptura (°); e D, força de carga do vento paralela ao talude (kN/m).

Na Equação 15, verifica-se que o aumento da coesão efetiva do solo como resultado da sucção proporcionada pela transpiração das plantas ( $c's$ ), foi negligenciado. Essa variável, por vezes, também é expressa como diminuição da poro-pressão devido à transpiração das plantas ( $u_v$ ).

Figura 12 – Forças atuantes na fatia de solo de um talude infinito com vegetação. Onde:  $D$ , carga do vento paralela ao talude;  $S_w$ , sobrecarga devido ao peso da vegetação;  $C$ ,  $D$ ,  $E$  e  $F$  são as posições que delimitam a fatia de solo analisada;  $\beta$ , ângulo de inclinação do talude;  $\gamma$ , peso específico do solo;  $\gamma_w$ , peso específico da água;  $h_z$ , altura de solo acima da superfície de ruptura;  $h_w$ , altura da água acima da superfície de ruptura;  $\theta$ , ângulo entre raízes e superfície de ruptura;  $b$ , largura da fatia;  $l$ , comprimento da base da fatia ( $b \cdot \sec \beta$ ).



Fonte: (COPPIN e RICHARDS, 2007).

O método de fatias de Fellenius (1936), usado para a análise de estabilidade de rupturas circulares, também pode ser adaptado para incluir os efeitos da vegetação (GREENWOOD, 1983). Na prática, o método de Fellenius tende a ser bastante conservador. Isso ocorre devido à pressuposição de que a infiltração e fluxos de água no interior do talude ocorrem paralelas à superfície de deslizamento, o que não é apropriado quando a superfície inicia no topo e emerge na base (pé) do talude (COPPIN e RICHARDS, 2007). Greenwood (1983), considerando essa observação, propôs uma simplificação do método, assumindo uma superfície de ruptura horizontal em cada fatia, sendo o fator de segurança obtido por meio da equação 15.

$$FS = \frac{\sum c'.b.\sec\alpha + (W - u.b).\cos\alpha.\tan\phi'}{\sum W.\sin\alpha} \quad (15)$$

Onde: FS, fator de segurança (adimensional); b, largura da fatia; W, peso total da fatia de solo (kPa); u, poro-pressão causada pela água na superfície de ruptura ( $\gamma_w \cdot h_w$ ) (kPa);  $\alpha$ , ângulo de inclinação da base da fatia com a horizontal (°);  $\phi'$ , ângulo de atrito interno do solo (°).

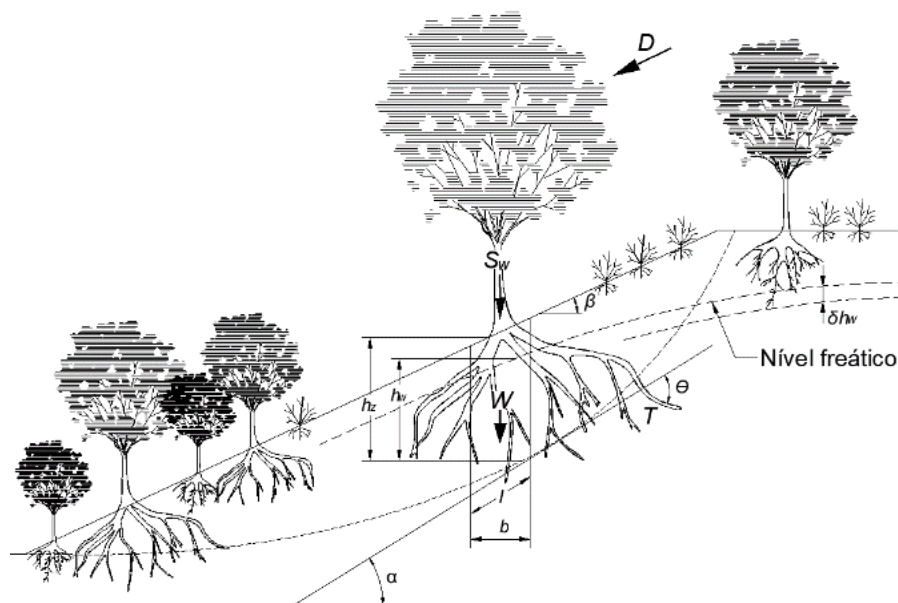
Considerando os parâmetros da vegetação a equação fica (COPPIN e RICHARDS, 2007):

$$FS = \frac{\sum \{ (c' + c'_R).b.\sec\alpha + [ ((W + S_W) - (u - u_v).b).\cos\alpha - D.\sen(\alpha - \beta) + T.\sen\theta ] .\tan\phi' + T.\cos\theta \}}{\sum [ (W + S_W).\sen\alpha + D.\cos(\alpha - \beta) ]} \quad (16)$$

Onde: FS, fator de segurança (adimensional);  $u_v$  é a redução da poro-pressão da água devido à transpiração proporcionada pelas plantas (kPa).

A Figura 13 representa esquematicamente a situação em que a Equação 16 é empregada.

Figura 13 – Talude com ruptura rotacional, mostrando as principais influências da vegetação e os parâmetros aplicados na análise de estabilidade. D, carga do vento paralela ao talude;  $S_w$ , sobrecarga devido a massa da vegetação;  $h_z$ , altura de solo acima da superfície de ruptura;  $h_w$ : altura da água acima da superfície de ruptura;  $\delta h_w$ , variação no nível do lençol freático;  $\beta$ , ângulo de inclinação do talude;  $\theta$ , ângulo entre raízes e superfície de ruptura;  $\alpha$ , ângulo de inclinação da base da fatia com a horizontal; l, comprimento da base da fatia ( $b.\sec\alpha$ ); T, força de tração das raízes atuando na base da superfície de ruptura; W, peso total da fatia de solo; b, largura da fatia.



Fonte: (COPPIN e RICHARDS, 2007).

A inclusão de valores de coesão efetiva do solo devido ao reforço da matriz por raízes ( $c'_R$ ) em análises de estabilidade de taludes tem influência considerável no aumento dos fatores de segurança (COPPIN e RICHARDS, 2007; NORRIS et al., 2008). Pequenos aumentos na ordem de 1 a 5 kPa na resistência ao cisalhamento, principalmente no caso de solos granulares, são suficientes para proporcionar grandes melhorias na estabilidade de taludes (GREENWAY, 1987).

Assim, o principal efeito técnico buscado pelo uso de plantas em taludes é o de aumentar valores de fator de segurança com o intuito de melhorar sua estabilidade. De um ponto de vista conservador, a condição de estabilidade é atingida quando o valor do fator de segurança for igual ou maior que 1,5 (ABNT-NBR 11682, 2009). A título de exemplo, em estudo realizado por Wu et al. (2014), o uso de estacas vivas de *Salix* sp., com até 1,0 m de comprimento, entre 13 e 25 meses após o plantio, favoreceu incrementos na ordem de 33 a 68 kPa na resistência ao cisalhamento do solo de um talude, proporcionando valores elevados de fator de segurança ( $>5$ ). Contudo, é importante considerar que cada espécie vegetal, por razões já destacadas anteriormente, tem potenciais diferentes de contribuição à resistência ao cisalhamento dos solos.

## 2.6 PROPAGAÇÃO POR ESTACAS

A propagação de plantas por meio de estacas vivas consiste na simples inserção no solo de partes do caule ou dos ramos de uma planta previamente selecionada (SCHIECHTL, 1973).

Em obras de Engenharia Natural, espécies lenhosas arbustivas são plantadas principalmente por meio de propagação vegetativa. Esse método tem se justificado devido à maior velocidade de desenvolvimento da parte aérea e raízes (se comparada à propagação seminal) e por proporcionar, dependendo da técnica em que é utilizada, proteção e reforço imediato ao solo (SCHIECHTL e STERN 1996). Outros motivos são a facilidade de obtenção do material vegetativo (muitas vezes podendo ser coletado no local da obra), robustez (resistentes a injúrias mecânicas), bem como à versatilidade de aplicação em inúmeras técnicas, como por exemplo, estacaria viva, siltação, banquetas vegetadas, feixes vivos, grade viva e parede krainer (SCHIECHTL, 1973; GRAY e LEISER, 1982; GRAY e SOTIR 1996; SCHIECHTL e STERN 1996; COPPIN e RICHARDS 2007; GOLDSMITH et al., 2014).

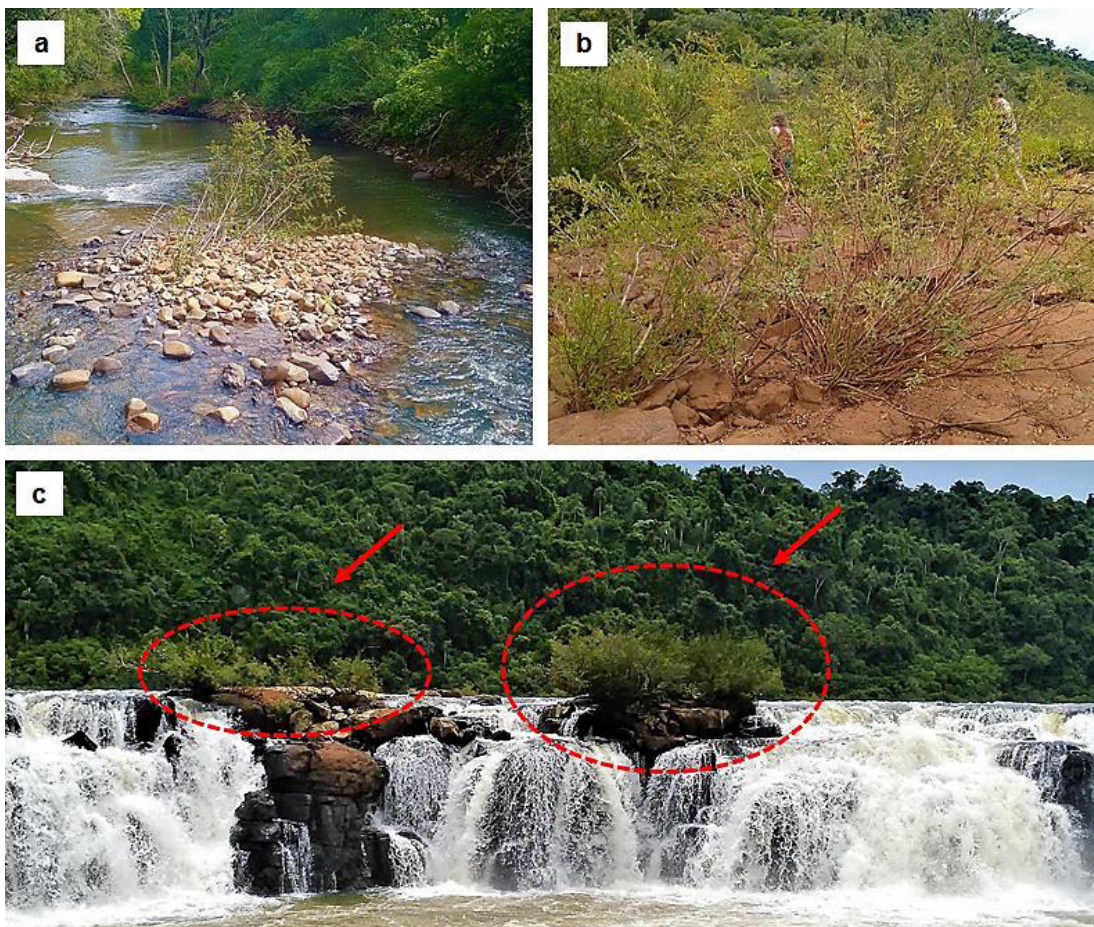


## 2.7 A ESPÉCIE EM ESTUDO

*Phyllanthus sellowianus* (Klotzsch) Müll.Arg. (Phyllanthaceae), popularmente conhecida como sarandi, é uma planta reófito nativa da América do Sul, que cresce espontaneamente em margens e leitos de cursos de água na região Sul do Brasil, Uruguai e Noroeste da Argentina (CABRERA et al., 1965).

A espécie alcança entre 2 e 3 m de altura, apresenta fácil propagação vegetativa (SUTILI, 2004), alta densidade e flexibilidade de ramos (DENARDI, 2007; SUTILI et al., 2012), alta densidade de raízes (SUTILI, 2007), grande resiliência e bom crescimento em solos pobres. Pode ser encontrada em todo o estado do Rio Grande do Sul, ocupando, por exemplo, o leito de pequenos rios em torrentes de montanha (Figura 14a), planícies de alagamento (Figura 14b) e leito de rios de grande porte (Figura 14c).

Figura 14 – Áreas de ocorrência natural de *Phyllanthus sellowianus*. (a) exemplar em torrente de montanha, na região de Itaara, RS; (b) exemplares em leito rochoso, em planície de alagamento no Rio Uruguai, RS; (c) exemplares fixados no leito rochoso do Salto do Yucumã, Rio Uruguai, RS.



Fonte: Próprio autor.

Locais como os apresentados na Figura 14, fornecem condições precárias à ocupação e desenvolvimento de plantas. As condições adversas podem ser representadas pela escassez de solo para a fixação das raízes, alta velocidade de fluxo de água que provoca danos (quebra, torce e/ou esfolia) raízes, caules e ramos, submersão prolongada ou mesmo soterramento por sedimentos, que podem reduzir ou evitar as trocas gasosas e a fotossíntese (FERREIRA et al., 2009; GONÇALVES et al., 2012; GONÇALVES et al., 2013). Todas essas condições restritivas são toleradas pela espécie *P. sellowianus*.

As características supracitadas, associadas ao crescente emprego de espécies vegetais em técnicas de controle de processos erosivos e estabilização de solos e à necessidade de melhor compreender os mecanismos pelos quais as plantas podem influenciar a resistência do solo e a estabilidade de taludes, contribuíram para a escolha e uso da espécie *P. sellowianus* para o desenvolvimento do presente estudo.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Para investigar o efeito de plantas da espécie lenhosa *P. sellowianus* na resistência ao cisalhamento do solo o presente estudo foi dividido em duas partes.

A primeira corresponde à determinação de uma variável biométrica da parte aérea das plantas que possa ser utilizada na estimativa da resistência à tração das raízes (seção 3.3).

A segunda trata de ensaios de cisalhamento direto *in situ* com plantas inteiras, utilizando um equipamento especialmente projetado e fabricado para a tarefa (seção 3.4).

#### 3.2 CARACTERIZAÇÃO DA REGIÃO DO ESTUDO

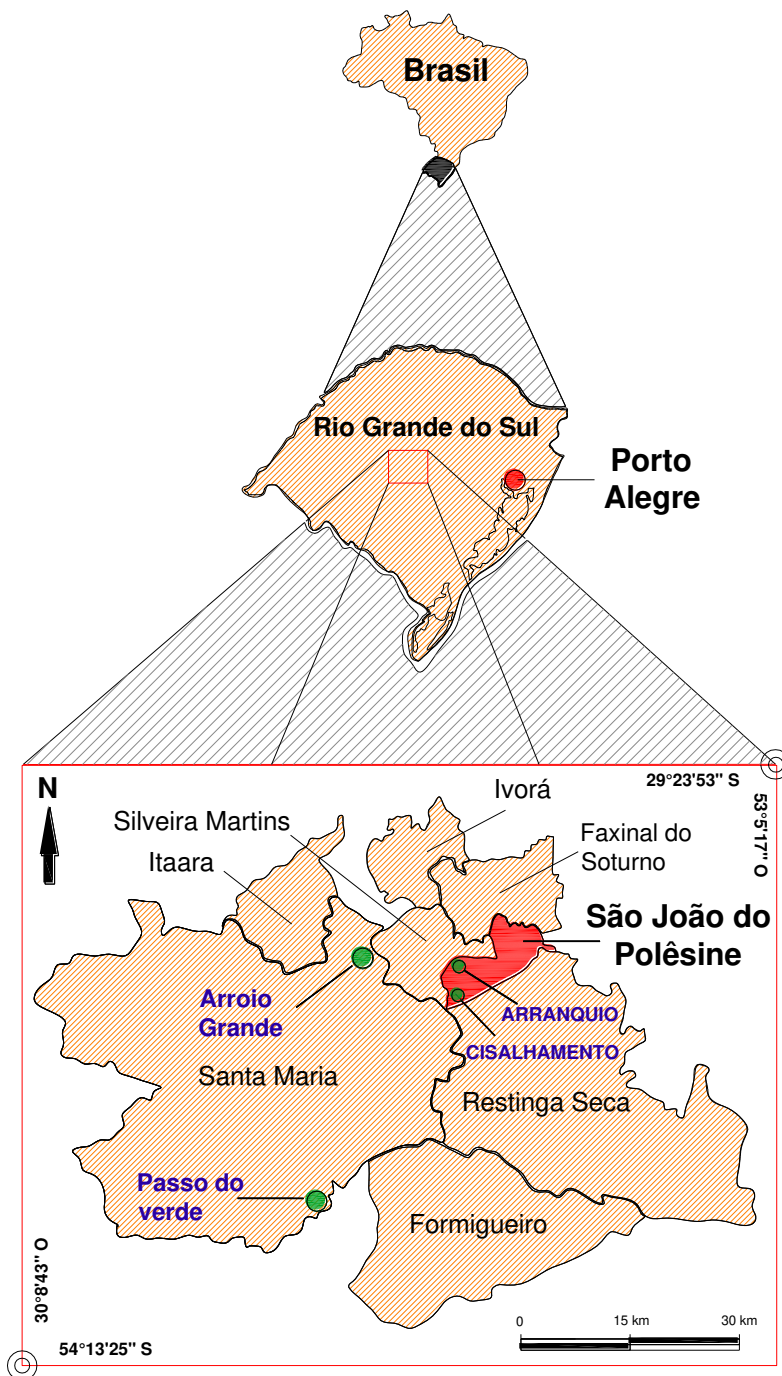
O estudo foi desenvolvido sob condições de campo em São João do Polêsine (29°39' S; 53°31' W), município localizado na região fisiográfica da Depressão Central, no centro do estado do Rio Grande do Sul, Brasil (Figura 15).

A coleta de material vegetal da espécie *Phyllanthus sellowianus* foi realizada na localidade de Passo do Verde (nas margens do rio Vacacaí) e no distrito de Arroio Grande (nas margens do rio de mesmo nome), ambas no município de Santa Maria (Figura 15).

Esta região fisiográfica é caracterizada pela predominância de sedimentos arenosos e argilosos do Permiano e do Triássico (LEMOS et al., 1973). O relevo, levemente ondulado, varia de 10 a 100 m de altitude, tendo como excessão os tabuleiros de arenito, que variam de 250 a 300 m (RAMBO, 2005). De acordo com a classificação climática de Köppen (1948), o clima da região é do tipo Cfa (subtropical úmido).

No município de São João do Polêsine, as médias anuais de precipitação e temperatura são respectivamente 1578 mm e 19,7 °C. A chuva é bem distribuída ao longo de todo o ano, de modo que entre o mês mais chuvoso (janeiro, 147 mm) e o menos chuvoso (maio, 118 mm), a diferença de precipitação é de apenas 29 mm. O mês de janeiro, com temperatura média de 25,1° C, é o mês mais quente, enquanto o mês de junho, com temperatura média de 15° C, é o mais frio (CLIMATE-DATA, 2017).

Figura 15 – Localização das áreas onde foram conduzidos os experimentos de arranquio e cisalhamento direto *in situ*, bem como dos pontos de coleta de estacas vivas de *Phyllanthus sellowianus* utilizadas nos plantios experimentais

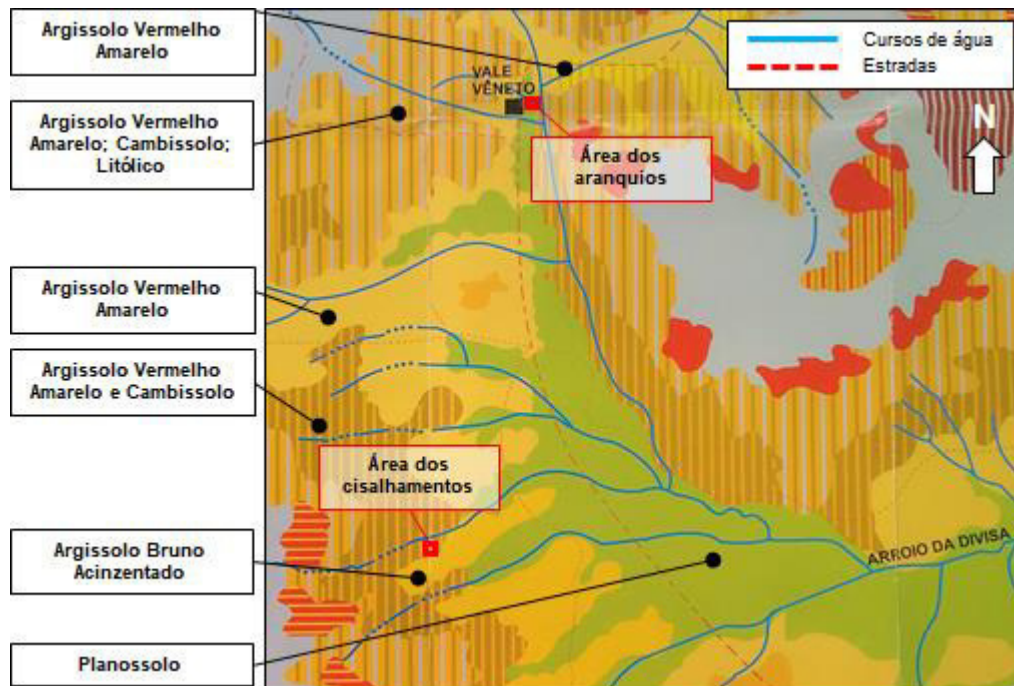


Fonte: Próprio autor.

A vegetação nativa do município faz parte do bioma Mata Atlântica e é classificada como Floresta Estacional Decidual. Atualmente distribui-se de maneira fragmentada ao longo do município, estando mais preservada em áreas íngremes, principalmente no sopé e encostas da Serra Geral.

De acordo com Klamt et al. (1997), no município de São João do Polêsine podem ser encontrados pelo menos 11 tipos de solo e 9 tipos de associações entre solos. Na Figura 16 podem ser observados os tipos de solos que ocorrem nas áreas em que foram conduzidos os experimentos de arranquio e cisalhamento direto *in situ*, distantes cerca de 3 km entre si.

Figura 16 – Solos das áreas em que foram realizados os experimentos de arranquio e cisalhamento direto *in situ*



Fonte: (KLAMT et al., 1997).

A área em que se implantou o experimento de arranquio é circundada por diferentes tipos de solo e associações, a saber: Planossolo, Argissolo Vermelho Amarelo, Cambissolo e solo Litólico. Como a área fica no sopé de uma encosta que sofre frequente erosão e transporte de solo, o material tem características de um colúvio arenoso.

A área em que foram conduzidos os ensaios de cisalhamento direto *in situ* está localizada em uma associação entre Argissolo Vermelho Amarelo e Cambissolo. Próximo da área de estudo também ocorrem Planossolo e Argissolo Bruno Acinzentado.

Em linhas gerais, os solos das duas áreas são caracterizados como problemáticos do ponto de vista agrícola, uma vez que tendem a ter valores baixos de pH (solos ácidos), teores de alumínio trocável altos (crescentes com a profundidade), fósforo assimilável e potássio baixos (KLAMT et al., 1997). De acordo com esses indicativos, tanto na área de arranquio quanto na área dos cisalhamentos, a garantia de produtividade de um determinado cultivo

agrícola somente seria assegurada com a correção da acidez e adição adequada de nutrientes ao solo.

### 3.3 EXPERIMENTO DE RESISTÊNCIA AO ARRANQUIO VERTICAL

A relação entre crescimento de plantas e resistência ao arranquio teve por objetivo principal identificar a variável biométrica com maior capacidade de descrever variações na resistência à tração do sistema radicial da espécie *P. sellowianus*.

Partiu-se do pressuposto, corroborado por diversos autores (ver seção 2.3, página 39), de que a resistência à tração do sistema radicial influi na resistência ao cisalhamento do solo.

A variável selecionada será usada na seção 4.2 (página 101), no processo de amostragem das plantas utilizadas nos ensaios de cisalhamento direto *in situ*.

#### 3.3.1 Características gerais do experimento

O experimento foi conduzido sob condições de campo por 14 meses, entre setembro de 2013 e novembro de 2014.

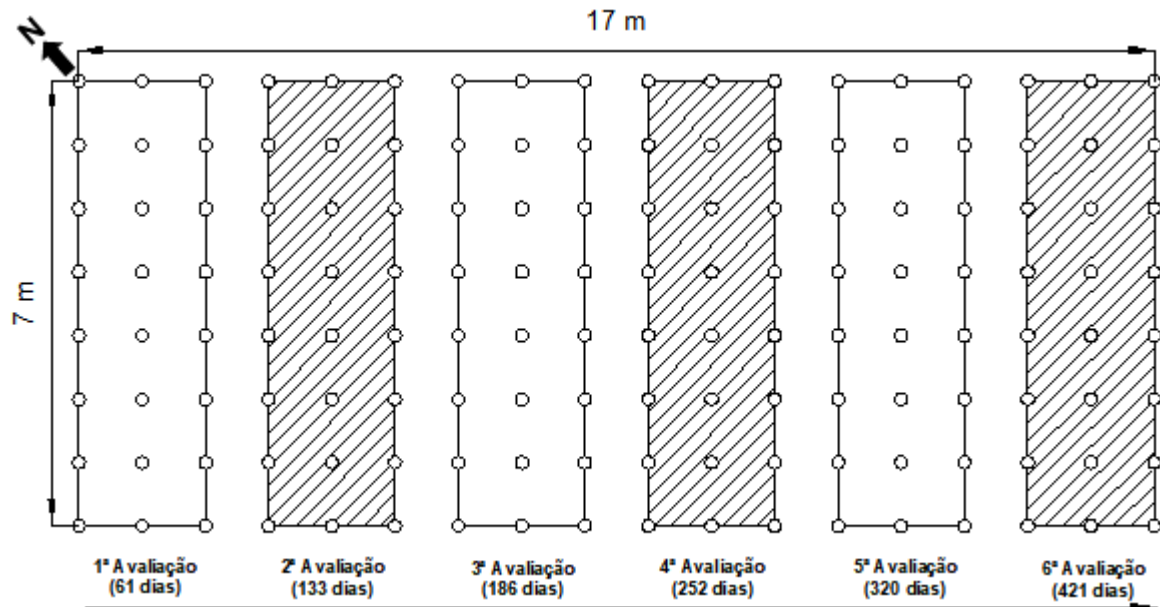
O método de plantio adotado foi o de plantio direto. A área com solo homogêneo, levemente inclinada ( $<5^\circ$ ) e a pleno sol, inicialmente com vegetação herbácea, foi roçada e os pontos de aberturas de covas foram coroados por meio de capina manual (0,5 m de diâmetro). Trinta dias antes do plantio, o controle de formigas foi realizado com aplicação de formicida à base de Fipronil.

As estacas de *P. sellowianus* usadas no plantio foram coletadas a partir do caule de diversos indivíduos nas margens do rio Vacacaí, na localidade de Passo do Verde, município de Santa Maria. Na coleta, tomou-se cuidado para obter estacas retilíneas, com diâmetros semelhantes e localizadas em posições similares das plantas matrizes. Para evitar a danificação da casca ou do lenho, o corte das estacas foi realizado com auxílio de tesouras de poda devidamente afiadas e com abertura maior que 5 cm. As estacas de *P. sellowianus* com o padrão morfológico desejado foram obtidas nos segmentos distantes cerca de 30 cm da base das plantas. A coleta das estacas se mostrou relativamente fácil dada a grande quantidade de ramificações partindo da base das plantas de *P. sellowianus* (Figura 14b).

Na área, de 17,0×7,0 m (Figura 17), foram preparadas 144 covas (40 cm de profundidade e 15 cm de diâmetro) com auxílio de cavadeira manual, em espaçamento de 1,0×1,0 m. Em

cada cova foi plantada uma estaca de *P. sellowianus* com diâmetro médio de 2,0 cm e comprimento de 50 cm. As estacas foram cuidadosamente plantadas na posição vertical.

Figura 17 – Representação esquemática da distribuição das estacas nos blocos de arranquio e época de realização dos ensaios. Cada um dos retângulos representa um conjunto de 24 plantas, que foram avaliadas em períodos diferentes (61, 133, 186, 252, 320 e 421 dias após o plantio). O espaçamento entre plantas é de 1,0 m.



Fonte: Próprio autor.

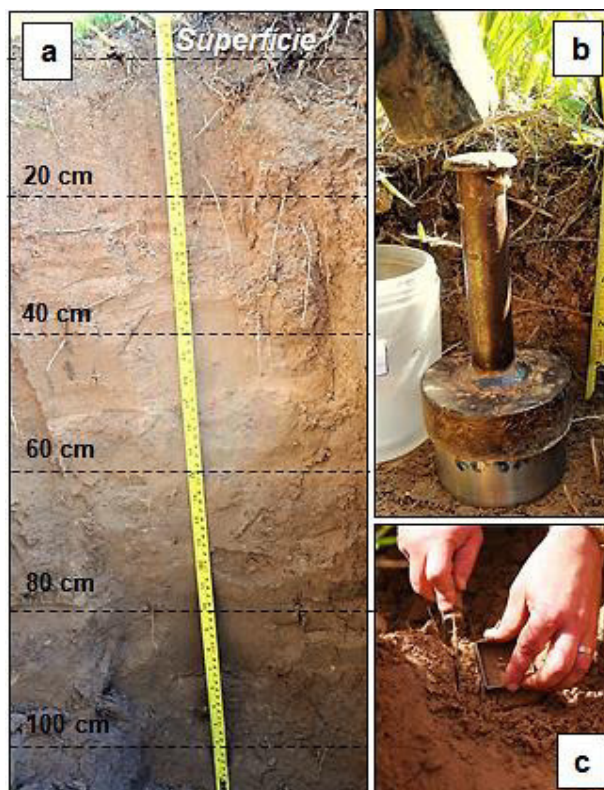
O experimento foi organizado em 6 blocos (cada um contendo 24 estacas), de modo que cada um foi avaliado em uma época diferente (Figura 17). Assim, os dados de crescimento das plantas, bem como de resistência ao arranquio vertical foram coletados aos 61, 133, 186, 252, 320, 421 dias após o plantio.

A manutenção da área do plantio foi realizada mensalmente por meio de roçada e capina, ao passo que o controle de formigas cortadeiras foi realizado sempre que necessário.

### 3.3.2 Caracterização do solo

Após o preparo inicial, amostras de solo deformadas e indeformadas foram coletadas em cinco profundidades (0-20, 20-40, 40-60, 60-80 e 80-100 cm) (Figura 18), em três pontos diferentes da área. Com essas amostras, análises físicas e químicas foram realizadas nos laboratórios do Centro de Ciências Rurais da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), enquanto os ensaios de resistência ao cisalhamento foram conduzidos no laboratório de Geotecnia da mesma instituição.

Figura 18 – Aspecto geral do solo até 100 cm de profundidade (a), coleta de amostras indeformadas para determinação da densidade do solo (b) e para determinação da resistência ao cisalhamento direto em laboratório (c)



Fonte: Próprio autor.

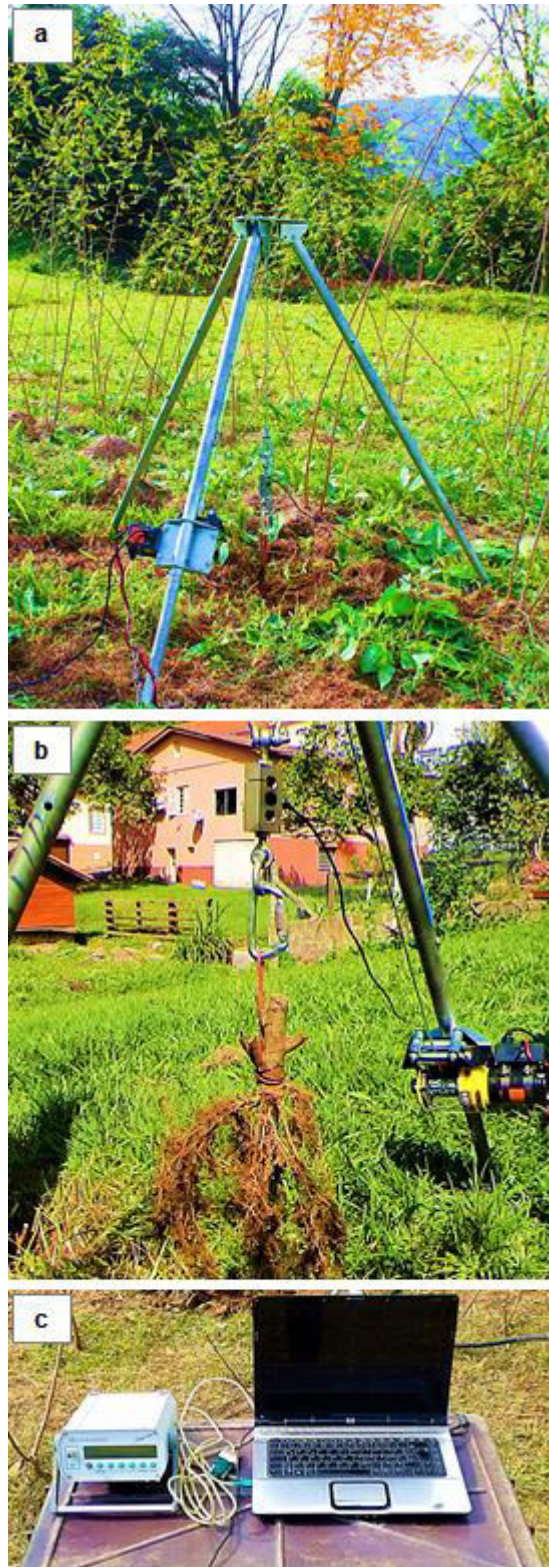
As características físicas analisadas foram a composição granulométrica (teores de areia, silte e argila), densidade do solo, densidade de partícula e porosidade. Nas características químicas, realizou-se a determinação de macronutrientes (nitrogênio, fósforo e potássio), matéria orgânica e pH do solo. Os parâmetros de resistência do solo (coesão e ângulo de atrito interno) foram obtidos em ensaios de resistência ao cisalhamento direto adensado rápido, realizados em 12 amostras de solo de  $5 \times 5 \times 2$  mm, sob tensões normais de 100, 200 e 300 kPa. As amostras foram coletadas a 20 cm de profundidade.

### 3.3.3 Arranquio vertical

Os testes de resistência à tração do sistema radicial foram realizados *in situ* utilizando uma equipamento desenvolvido especificamente para o arranquio vertical de plantas (Figura 19). O equipamento é constituída por um tripé metálico fabricado em aço e foi projetada e produzida pelo Laboratório de Engenharia Natural da UFSM.

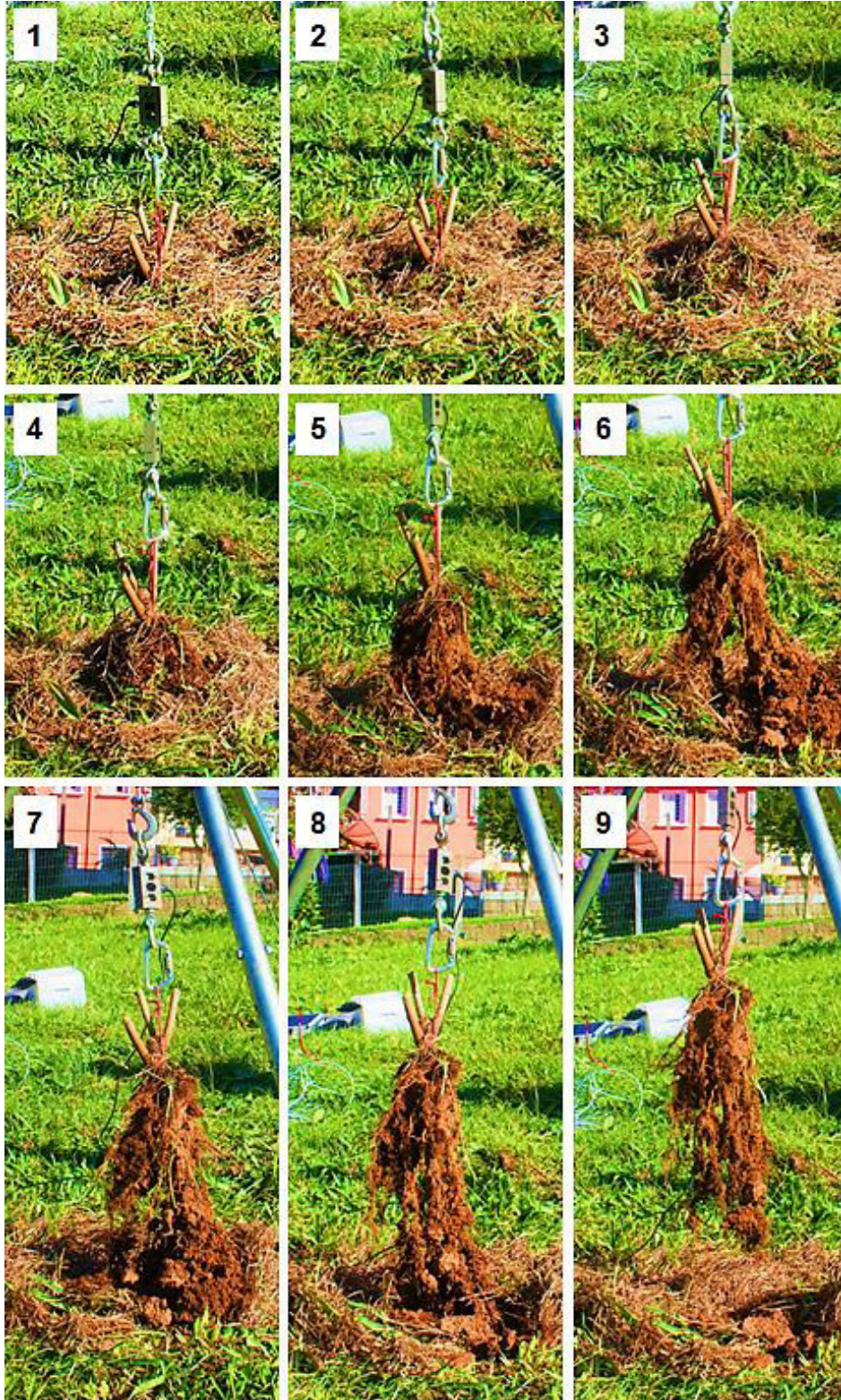


Figura 19 – Aspecto geral do equipamento utilizado no arranquio vertical das plantas de *Phyllanthus sellowianus*. a) tripé metálico que dá suporte ao motor elétrico, espia de aço e célula de carga, e mantém as forças verticais perpendicularmente alinhadas à superfície do solo até a completa extração do sistema radicial; b) aspectos da célula de carga (parte superior), planta arrancada (centro) e motor elétrico para aplicação das tensões (direita); c) aspectos do amplificador de frequências (Scout 55, à esquerda), que faz a conexão entre a célula de carga e o software instalado no notebook (à direita).



Fonte: Próprio autor.

Figura 20 – Imagens mostrando a sequência do processo de arranquio de uma planta de *Phyllanthus sellowianus* 252 dias (8 meses) após o plantio. A imagem 1 representa o início do ensaio por acionamento do comando que liga o motor elétrico e início das leituras no software das forças aplicadas (N) a cada instante (segundos); Entre as imagens 2 e 8, o ensaio encontra-se em andamento, o sistema radicial da planta encontra-se em contínua remoção do interior do solo; a imagem 9 corresponde ao encerramento do ensaio, onde o sistema radicial foi extraído, a leitura de força cai a 0 N, o motor é desligado e as leituras no software são encerradas



O tripé metálico, portátil e ajustável a superfícies irregulares (Figura 19a), foi preparado para suportar um guincho elétrico com torque contínuo e deslocamento constante. Para manter as forças aplicadas na posição vertical, o cabo de aço do guincho passa por uma roldana metálica no topo do tripé. Na ponta do cabo de aço está acoplada uma célula de carga com capacidade máxima de 10 kN (Figura 19b), que foi conectada a um amplificador de frequência para leitura e envio dos sinais a um computador para armazenamento instantâneo dos dados (Figura 19c).

Os dados de resistência ao arranquio forneceram a resistência máxima do sistema radicial de cada planta de *P. sellowianus*. Os dados dessa variável são apresentados em quilonewton (kN).

Durante o processo de instalação do equipamento foi tomado o devido cuidado para que o mesmo tivesse o seu eixo centralizado com o eixo da estaca a ser arrancada. Da planta selecionada foram cortados os brotos deixando-se um comprimento de aproximadamente 5 cm a partir da estaca. No entorno da estaca foi amarrada uma corda de nylon para que a célula de carga pudesse ser acoplada por meio de um mosquetão de engate rápido. Adaptou-se um mosquetão com capacidade de resistência inferior à da célula de carga, de modo que a mesma não fosse danificada durante a eventual ocorrência de tensões muito elevadas.

Na Figura 20 são apresentadas fases que caracterizam a sequência do ensaio de arraquio<sup>4</sup> de plantas de *P. sellowianus*.

A fase inicial do processo (Figura 20, imagem 1), é caracterizada pelo acionamento do motor elétrico e consequente aplicação da força vertical que deve extrair a planta. Nessa mesma etapa, dá-se o comando ao software para que inicie a leitura e registro automático dos dados de força (kN) e tempo (duração). Das fases 2 a 8, observa-se o sistema radicial da planta sendo extraído do solo à velocidade aproximada de 2 cm/s, e os dados de resistência ao arranquio são gravados automaticamente no software instalado no notebook. A fase 9 caracteriza o encerramento do ensaio, onde o motor é desligado e dá-se o comando para o software encerrar as leituras.

### 3.3.4 Medição das variáveis da parte aérea e sistema radicial

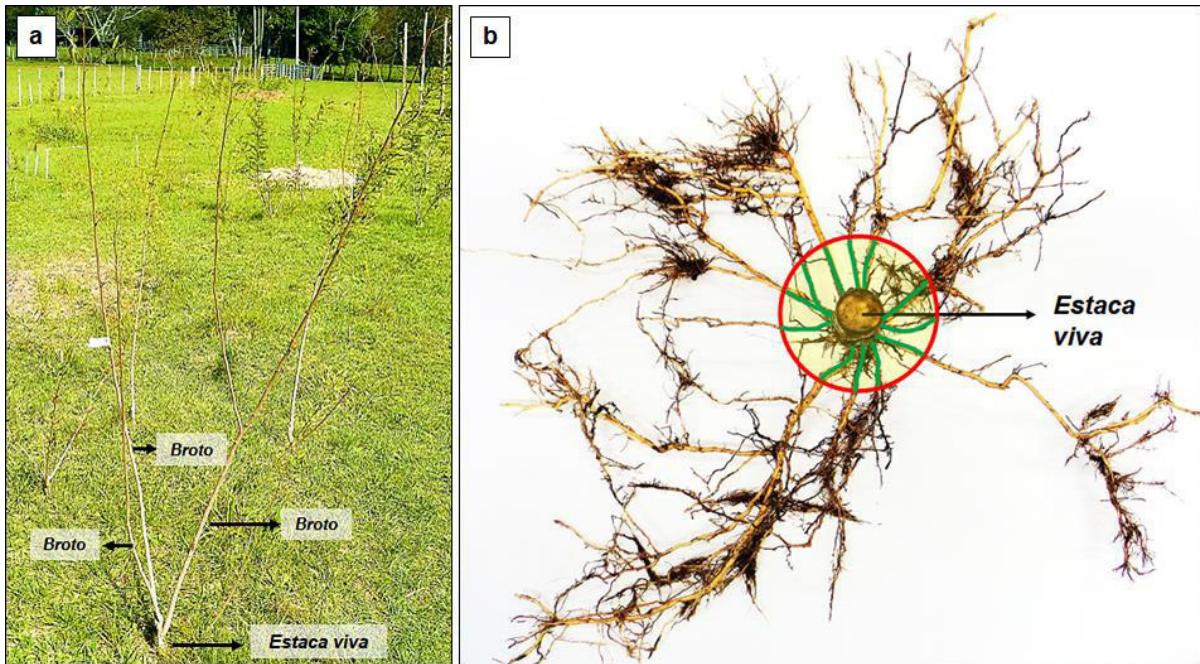
As variáveis de crescimento da parte aérea e do sistema radicial foram medidas no momento e após dos testes de arranquio com auxílio de paquímetro digital e régua. Da parte aérea foram obtidos o número, diâmetro (mm) e comprimento (cm) de brotos. Do sistema

---

<sup>4</sup> Com o intuito de minimizar variações devido ao excesso de umidade dos solos, os testes de arranquio vertical foram realizados pelo menos 4 dias após a ocorrência de uma precipitação intensa.

radicial foram obtidos o diâmetro das raízes no ponto de ruptura (mm) e o comprimento (cm) das raízes principais remanescentes nas plantas após o arranquio. Conforme indicado na Figura 21, raízes principais são aquelas diretamente ligadas à estaca.

Figura 21 – Parte aérea e sistema radicial de *Phyllanthus sellowianus* propagado a partir de estacas. (a) Indicação da estaca viva e de sua brotação; (b) Vista superior de uma estaca viva com diversas raízes. As linhas verdes indicam as raízes principais, ou seja, aquelas ligadas diretamente à estaca.



Fonte: Próprio autor.

### 3.3.5 Análise dos dados

As variações de resistência ao arranquio e também de desenvolvimento da parte aérea e sistema radicial foram investigadas através da análise de variância (ANOVA) e comparativo de médias (teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro). Todas as análises foram realizadas usando o MS Excel e o software Statistical Analysis System 9.2 (SAS).

## 3.4 EXPERIMENTO DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DIRETO *IN SITU*

Para o estudo do efeito das plantas de *P. sellowianus* na resistência do solo ao cisalhamento direto *in situ*, um equipamento especial foi projetado e desenvolvido. A principal característica desse equipamento é o tamanho da caixa de cisalhamento, com dimensão suficiente para envolver o sistema radicial das plantas estudadas.

Por meio do equipamento de cisalhamento foram realizados ensaios em solo com e sem raízes. As análises comparativas entre as duas condições foram realizadas por observação dos parâmetros de resistência do solo (coesão e ângulo de atrito interno) e das deformações volumétricas das amostras.

### 3.4.1 Características gerais do experimento

O experimento foi conduzido sob condições de campo, no período de setembro de 2016 a setembro de 2017. Para a realização dos ensaios de cisalhamento direto *in situ* optou-se pelo período de inverno, entre os meses de junho e setembro. Essa decisão foi tomada tendo-se em vista que no inverno as plantas entram em dormência e o crescimento fica estagnado. Além disso, devido à maior umidade do solo, o efeito da sucção matricial sobre a resistência ao cisalhamento é menor, o que possibilita isolar com maior facilidade o efeito das plantas (raízes).

A área do experimento, plana, a pleno sol, e com solo homogêneo, foi previamente preparada por meio de roçada e capina manual da vegetação herbácea existente. Trinta dias antes do plantio, o controle de formigas cortadeiras foi realizado com formicida à base de Fipronil. Com a intenção de manter ao máximo a estrutura física do solo, o método de plantio adotado foi o de plantio direto<sup>5</sup>.

As estacas usadas no plantio foram coletadas a partir do caule de diversas plantas de *P. sellowianus* nas margens e leito do rio Arroio Grande, no distrito de Arroio Grande, município de Santa Maria. Tanto o padrão morfológico das estacas quanto a forma de coleta foram idênticos aos utilizados no experimento de arranquio (seção 3.3.1, página 60).

Na área, de 12,0×14,0 m (168 m<sup>2</sup>), foram implantadas, no total, 240 estacas vivas (60 cm de comprimento e cerca de 1,8 cm de diâmetro) das espécies *Phyllanthus sellowianus* (n = 120) e *Salix humboldtiana*<sup>6</sup> (n = 120), em espaçamento 0,7×0,7 m (Figura 22). A distribuição de plantas e de locais vazios, onde não foram inseridas plantas, foi realizada por aleatorização de pequenos blocos (2,1×1,4 m). Vinte blocos de cada espécie, compostos por 6 plantas cada, foram aleatorizados na área. O mesmo procedimento foi realizado com os blocos vazios.

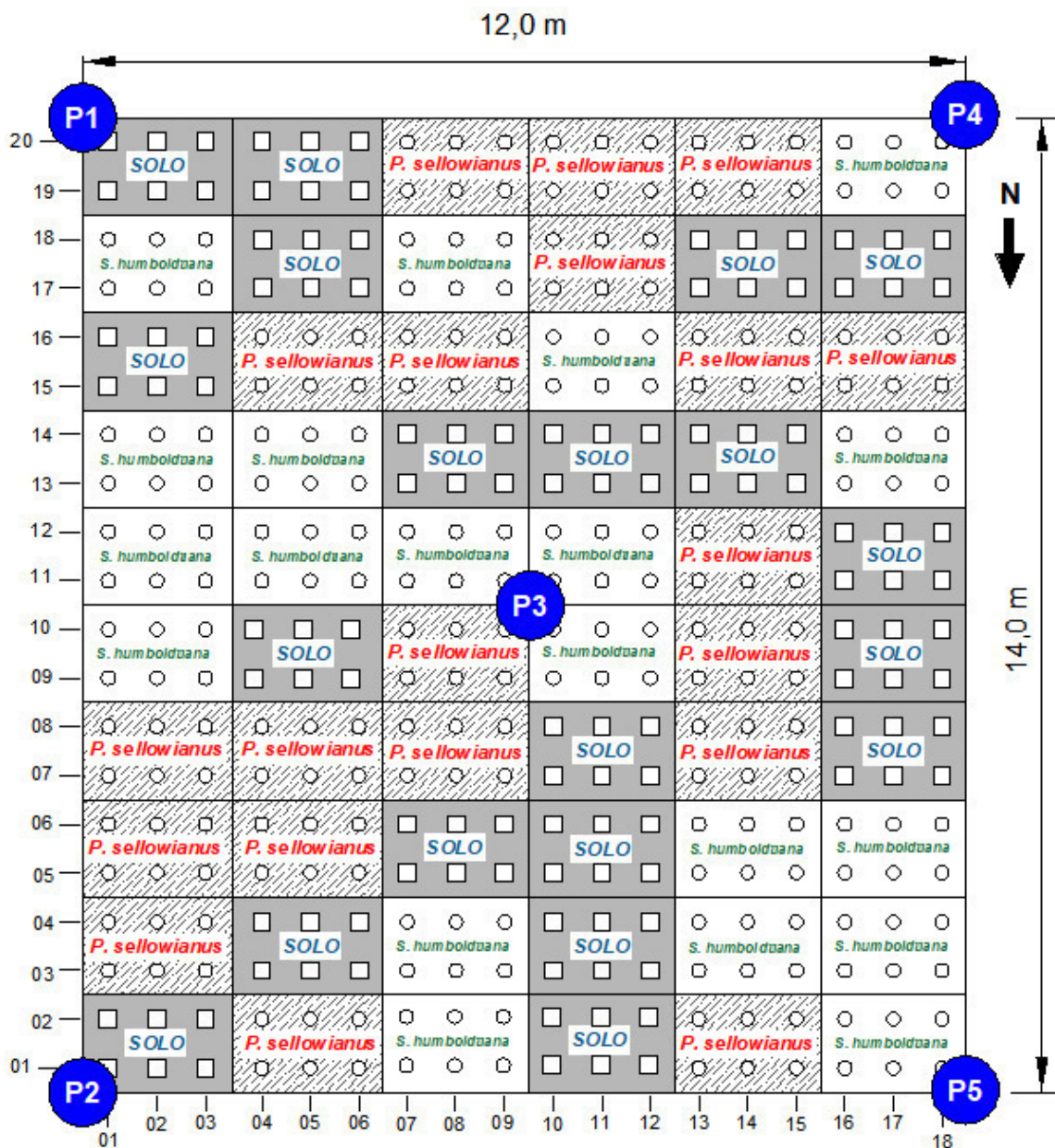
---

<sup>5</sup> Optou-se por manter a estrutura do solo pela seguinte razão: se plantas conseguem aumentar a resistência de um solo bem estruturado, é possível que seu efeito positivo seja ainda maior em solos desestruturados, como é, por exemplo, o caso de solos usados em aterros ou em preenchimentos de estruturas (por exemplo, parede krainer, parede loricata e grade viva). Entenda-se por solo bem estruturado a não aplicação de medidas mecânicas (aração, gradagem ou subsolagem) para melhoria de suas propriedades físicas do ponto de vista agrícola.

<sup>6</sup> A espécie *Salix humboldtiana*, apesar de inserida na área do experimento, não foi utilizada no presente trabalho.

É importante destacar que o uso de de pequenos blocos (2,1×1,4 m) foi realizado para que na ocorrência de qualquer problema com uma amostra (corpo de prova) a mesma pudesse ser facilmente substituída por uma amostra próxima e semelhante. Já com relação à aleatorização, considerou-se que cada um dos pequenos blocos deveria ter a mesma possibilidade de ocupar a área, na tentativa de reduzir tendências associadas à escolha intencional de localização das plantas ou amostras sem plantas.

Figura 22 – Representação esquemática da área do experimento. É possível observar a distribuição das espécies *Phyllanthus sellowianus* e *Salix humboldtiana* e dos espaços vazios, não plantados (solo). O espaçamento entre plantas é de 0,7×0,7 m. P1, P2, P3, P4 e P5 são pontos onde foram coletadas amostras para caracterização física, química e mecânica do solo

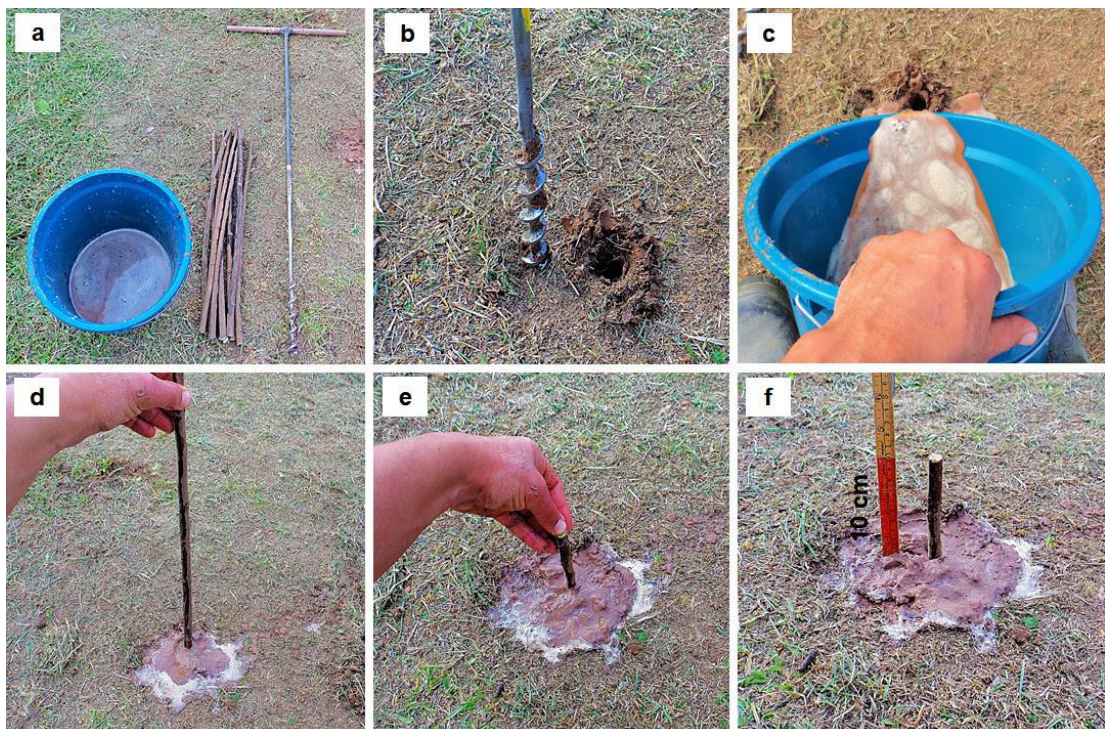


Fonte: Próprio autor.

Na Figura 22 é possível observar a indicação dos cinco pontos da área do experimento em que foram coletadas amostras de solo para as caracterizações química, física e de resistência mecânica do solo. Os pontos foram definidos pela realização prévia de diversas tradagens (trado holandês) na área, buscando-se verificar eventuais diferenças na textura e na coloração do solo. Nessas tradagens iniciais, verificou-se a homogeneidade do solo, e, portanto, considerou-se que cinco pontos de amostragem seriam suficientes para uma caracterização representativa da área.

A primeira etapa do plantio foi caracterizada pela marcação dos pontos de perfuração, buscando-se atender à distribuição apresentada na Figura 22. Após as marcações, as perfurações com auxílio de trado helicoidal de 2,5 cm de diâmetro foram realizadas até à profundidade de 50 cm (Figura 23b). Cada furo foi preenchido com a calda de solo e água até aproximadamente metade de sua capacidade (cerca de 25 cm de profundidade) (Figura 23c). Feito isso, foi iniciado o plantio das estacas (Figura 23d,e). Para possibilitar a brotação da parte aérea, 10 cm de comprimento de cada estaca foram mantidos acima da superfície do solo (Figura 23f). Durante todo o processo foi tomado o devido cuidado para que cada estaca fosse plantada na posição correta, ou seja, com a parte basal direcionada para baixo.

Figura 23 – Procedimento de plantio das estacas vivas de *Phyllanthus sellowianus*. (a) utensílios e materiais utilizados no plantio: calda composta com água e solo local, estacas vivas e trado com diâmetro de 2,5 cm para perfuração do solo; (b) perfuração do solo até 50 cm de profundidade com auxílio de trado; (c) preenchimento do furo com a calda de solo e água previamente preparada; (d) e (e) inserção da estaca no solo; (f) estaca plantada, permanecendo 10 cm de comprimento acima da superfície solo.



Após a realização do plantio, em toda a área do experimento e principalmente no entorno das estacas, foi adicionada uma camada de aproximadamente 5 cm de grama seca, oriunda da roçada (Figura 24a), de modo a proteger a base das estacas do excesso de calor e de perdas excessivas de umidade do solo.

Os ensaios de cisalhamento direto *in situ* foram iniciados 10 meses após o plantio, utilizando apenas a espécie *P. sellowianus*, que se destaca na Figura 24b por apresentar maior altura da parte aérea. É importante destacar que as plantas de *S. humboldtiana*, apesar de terem sido plantadas na área do experimento, não fizeram parte das avaliações de resistência ao cisalhamento direto *in situ* do presente trabalho.

A manutenção da área do plantio foi realizada mensalmente por meio de roçada e capina. Além disso, o controle de formigas cortadeiras foi realizado sempre que necessário.

Figura 24 – Área do experimento. (a) aspecto da área logo após o plantio; (b) aspecto da área no período de inverno, 10 meses após o plantio, início dos ensaios de cisalhamento direto *in situ*.

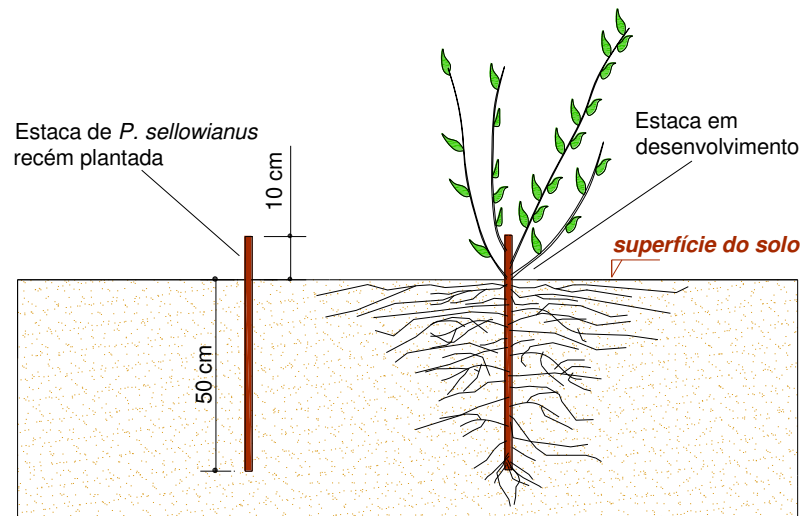


Fonte: Próprio autor.

O aspecto geral das estacas imediatamente após o plantio e em pleno desenvolvimento é representado esquematicamente na Figura 25.



Figura 25 – Representação esquemática de uma estaca imediatamente após o plantio (esquerda) e após alguns meses (direita)



Fonte: Próprio autor.

### 3.4.2 Caracterização do solo

Para realizar as caracterizações física, química e de resistência ao cisalhamento, amostras de solo foram coletadas em pontos diferentes da área (Figura 22).

A caracterização física do solo foi realizada para as profundidades de 0-10, 10-20, 20-30, 30-40 e 40-50 cm. As análises granulométricas, para a determinação das porcentagens de areia, silte e argila, assim como a determinação da densidade de partículas foram realizadas no Laboratório de Física do Solo do Centro de Ciências Rurais da UFSM. As análises granulométricas foram realizadas seguindo a NBR 7181 (ABNT, 2016) e as de densidade de partículas por meio do método do balão volumétrico, descrito na NBR 6458 (ABNT, 2016).

Para a determinação do peso específico natural do solo<sup>7</sup> e da densidade do solo<sup>8</sup>, três amostras indeformadas foram coletadas de cada profundidade com cilindros de 3 cm de altura e 5 cm de diâmetro. Os procedimentos gerais de coleta e preparo das amostras são mostrados na Figura 26. Além disso, também foram determinados a umidade volumétrica, a porosidade total, o índice de vazios e o grau de saturação. As seguintes relações foram utilizadas para a obtenção dos índices físicos mencionados (FIORI e CARMIGNANI, 2009; KLEIN, 2014):

<sup>7</sup> Índice físico utilizado em Engenharia Geotécnica no cálculo de estabilidade de taludes.

<sup>8</sup> Multiplicada por 9,81 m/s<sup>2</sup>, transforma-se em peso específico aparente seco do solo ( $\gamma_d$ , kN/m<sup>3</sup>), termo usual em Engenharia Geotécnica. Tal índice físico é utilizado para caracterizar a compactação de um solo de acordo com seu teor de umidade. Essa relação é muito utilizada em práticas agrícolas de conservação do solo (regular o tráfego de máquinas na lavoura) e também na construção de estradas.

a) Densidade natural

$$\gamma_{\text{nat}} = \frac{W}{V} \quad (17)$$

Onde:  $\gamma_{\text{nat}}$ , peso específico aparente natural do solo ( $\text{kN/m}^3$  ou  $\text{g/cm}^3$ );  $W$ , peso total ( $\text{kN}$ );  $V$ , volume total da amostra ( $\text{m}^3$ ).

b) Densidade do solo

$$D_s = \frac{M_s}{V} \quad (18)$$

Onde:  $D_s$ , densidade do solo ( $\text{g/cm}^3$ );  $M_s$ , massa seca ( $\text{g}$ );  $V$ , volume total da amostra ( $\text{cm}^3$ ).

c) Umidade volumétrica

$$u_v = u_g \cdot \left( \frac{D_s}{D_{\text{ag}}} \right) \quad (19)$$

Onde:  $u_v$ , umidade volumétrica ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ); umidade gravimétrica (decimal);  $D_s$ , densidade do solo ( $\text{g/cm}^3$ );  $D_{\text{ag}}$ , densidade da água ( $1 \text{ g/cm}^3$ ).

d) Porosidade total

$$P_t = 1 - \left( \frac{D_s}{D_p} \right) \quad (20)$$

Onde:  $P_t$ , porosidade total ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ );  $D_s$ , densidade do solo ( $\text{g/cm}^3$ );  $D_p$ , densidade de partícula ( $\text{g/cm}^3$ ).

e) Índice de vazios

$$I_v = \left( \frac{D_p}{D_s} \right) - 1 \quad (21)$$

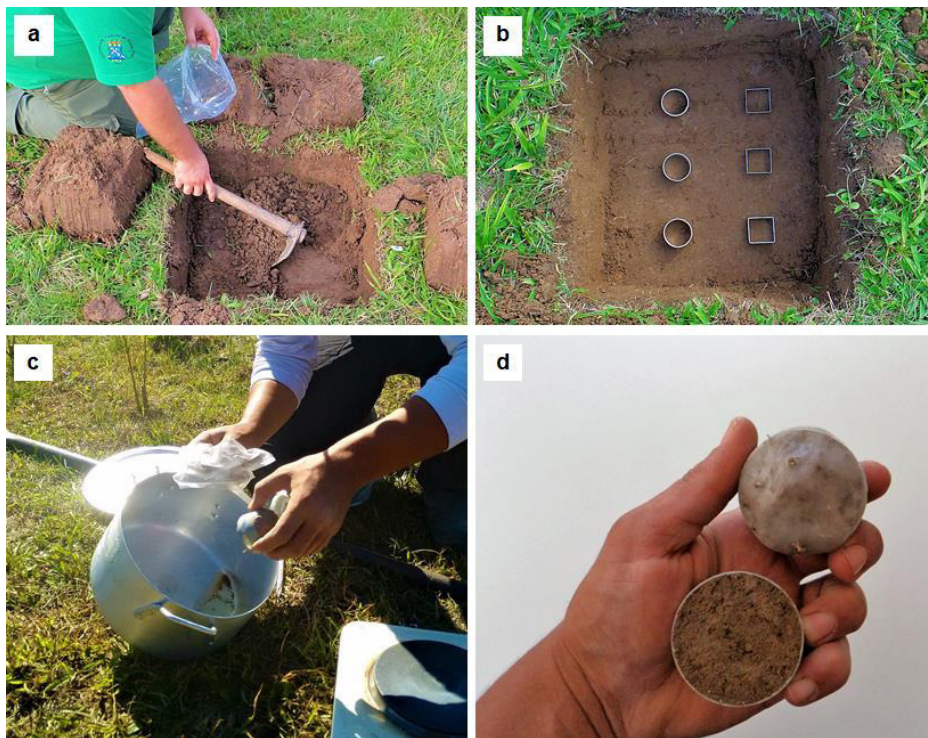
Onde:  $I_v$ , índice de vazios;  $D_p$ , densidade de partícula ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );  $D_s$ , densidade do solo ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ).

f) Grau de saturação

$$S = \left( \frac{uv}{Pt} \right) \cdot 100 \quad (22)$$

Onde:  $S$ , grau de saturação (%);  $uv$ , umidade volumétrica ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ );  $Pt$ , porosidade total ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ).

Figura 26 – Coleta de amostras deformadas e indeformadas para as caracterizações química, física e de resistência ao cisalhamento do solo na área do experimento. (a) coleta de amostras deformadas para análises físico-químicas; (b) coleta de amostras indeformadas para caracterização da estrutura e da resistência ao cisalhamento direto em laboratório; (c) e (d) aplicação de parafina nos corpos de prova indeformados para minimizar a perda de umidade



Fonte: Próprio autor.

Ainda na caracterização física solo foram determinados os limites de Atterberg para as profundidades 0-10, 10-20, 20-30, 30-40 e 40-50 cm. O limite de liquidez<sup>9</sup> foi realizado usando

<sup>9</sup> O limite de liquidez (LL) corresponde ao teor de umidade do solo que representa a sua transição entre estado plástico (por perda da umidade) e estado líquido (por aumento da umidade). No estado líquido, a mistura solo-água é tal que sua resistência ao cisalhamento é nula. Na prática, o limite de liquidez corresponde ao teor de umidade de um solo quando são necessários 25 golpes no aparelho de Casagrande para fechar uma ranhura padrão, aberta na superfície da amostra (FIORI e CARMIGNANI, 2009).

o aparelho de Casagrande, conforme definido na NBR-6459 (ABNT, 2016), enquanto o limite de plasticidade<sup>10</sup> foi realizado por meio da modelagem de um cilindro de solo de 3 mm de diâmetro e, aproximadamente, 10 cm de comprimento, conforme definido na NBR-7180 (ABNT, 2016).

Para obter o efeito do sistema radicial na resistência ao cisalhamento do solo não saturado foi necessário descontar o efeito da sucção matricial de acordo com a umidade da superfície de cisalhamento. Para isso foi elaborada a curva característica de retenção de umidade para a profundidade de 20 cm, superfície objeto dos ensaios de cisalhamento direto *in situ* com e sem raízes.

A curva característica de retenção de umidade foi elaborada em laboratório a partir de 24 amostras de solo coletadas em cilindros de 3 cm de altura e 5 cm de diâmetro. Após a saturação, as amostras foram submetidas às tensões matriciais de 1, 6 e 10 kPa em coluna de areia, 33, 100 e 500 kPa em aparelho extrator de Richards e 1500 kPa em psicrômetro de termopar, modelo WP4-T (DECAGON DEVICES, 2000). As curvas em logaritmo foram obtidas por meio da equação de Van Genuchten (1980), apresentada a seguir.

$$U_v = U_r + \frac{U_{sat} - U_r}{\left[1 + (\alpha \psi)^n\right]^m}, \quad m = 1 - \left(\frac{1}{n}\right) \quad (23)$$

Onde:  $U_v$ , umidade volumétrica ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ );  $U_r$ , umidade residual ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ );  $U_{sat}$ , umidade de saturação;  $\psi$ , sucção mátrica ou potencial matricial (kPa);  $\alpha$ ,  $n$  e  $m$  são os parâmetros de ajuste da equação obtidos por regressão<sup>11</sup>.

O critério de ruptura para solo com raízes foi representado da seguinte forma (VEYLON et al., 2015):

$$\tau = \tau_s + \tau_\psi + \tau_r \quad (24)$$

---

<sup>10</sup> O limite de plasticidade (LP) corresponde ao teor de umidade do solo que representa a sua transição entre estado semissólido (por perda de umidade) e estado plástico (por aumento da umidade). Define-se como plasticidade de um solo a sua propriedade de se deformar sem sofrer rupturas ou fissuramentos. Na prática, o limite de plasticidade é determinado pela porcentagem de umidade para o qual o solo começa a se fraturar ao se tentar modelar um cilindro de 3 mm de diâmetro e com cerca de 10 cm de comprimento (FIORI e CARMIGNANI, 2009).

<sup>11</sup> Regressão, em estatística, um processo para determinar a linha ou curva que melhor representa a tendência geral de um conjunto de dados (ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA, 2014).

Onde:  $\tau$ , resistência ao cisalhamento na ruptura (kPa);  $\tau_s$ , resistência ao cisalhamento do solo – equação de Mohr-Coulomb (kPa);  $\tau_\psi$ , representa a parcela de resistência ao cisalhamento devido à sucção mátrica (kPa);  $\tau_r$ , representa a parcela de resistência ao cisalhamento devido ao sistema radicial (kPa).

A parcela de resistência ao cisalhamento devido à sucção mátrica ( $\tau_\psi$ , kPa), conhecida por ser não linear (VANAPALLI et al., 1996; SHENG et al., 2008), foi determinada pela equação proposta por Öberg e Sällfors (1997).

$$\tau_\psi = S \cdot \psi \cdot \tan \phi' \quad (25)$$

Onde: S, grau de saturação (decimal);  $\psi$ , sucção mátrica ou potencial matricial (kPa);  $\phi'$ , ângulo de atrito interno efetivo do solo.

A caracterização química foi realizada para amostras de solo coletadas nas camadas de 0-10, 10-20, 20-30 e 30-50 cm. Deu-se preferência à realização do diagnóstico químico convencional, normalmente tomado por base na correção da acidez do solo e na recomendação de adubação com NPK.

A determinação dos parâmetros de resistência do solo foi realizada em corpos de prova de 5×5×2 mm (Figura 26b, coletores à direita), coletados a campo na profundidade de 20 cm, e mantidos em umidade natural. Os ensaios foram realizados em laboratório, em prensa de cisalhamento direto, seguindo as recomendações das normas ASTM D3080 (2011) e NBR 11682 (2009). As envoltórias de resistência foram obtidas utilizando tensões normais de 9, 25 e 50 kPa. Para obtenção de cada envoltória de resistência foram utilizados 15 corpos de prova, sendo cada tensão normal repetida 5 vezes. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Geotecnia da UFSM.

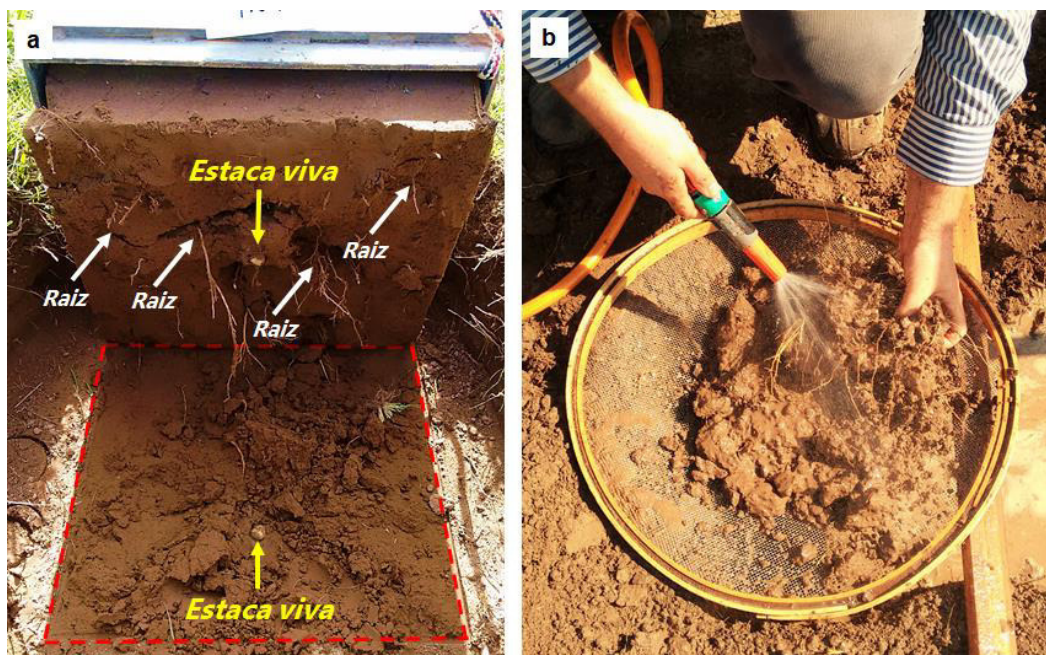
### 3.4.3 Medidas biométricas das plantas

Antes da realização dos ensaios de cisalhamento direto *in situ*, todas as plantas de *P. sellowianus* tiveram o diâmetro da estaca (mm) e o diâmetro de brotos (mm) medidos com auxílio de paquímetro digital e o comprimento de brotos com auxílio de trena metálica flexível.

Após os ensaios, os blocos de solo foram erguidos para a verificação de raízes atravessando a superfície de ruptura, as quais, quando existentes, tiveram o diâmetro medido com auxílio de um paquímetro digital (Figura 27a).

A obtenção do diâmetro das raízes que eventualmente atravessaram a superfície de ruptura possibilitou a obtenção da taxa de raízes por área de solo ( $A_R/A$ ). Nessa taxa, também foi incluída a área das estacas que atravessaram a superfície de ruptura.

Figura 27 – Mensuração de variáveis do sistema radicial. (a) corpo de prova após o ensaio de cisalhamento direto *in situ*, onde as setas indicam a estaca viva e as raízes cruzando a superfície de ruptura; (b) lavagem e separação das raízes para posterior obtenção de sua massa seca.



Fonte: Próprio autor.

Para obtenção da massa seca de raízes, os blocos de solo foram retirados da caixa de cisalhamento e separados em pedaços menores e em seguida lavados em peneira de malha 3,0 mm (Figura 27b). Nesse processo, raízes de *P. sellowianus* e de herbáceas presentes foram separadas e colocadas em sacos de papel kraft, para em seguida serem encaminhadas à estufa de secagem à temperatura de  $70 \pm 2$  °C. Após 7 dias, com a estabilização do peso, as amostras foram retiradas da estufa para determinação da massa seca (g). O mesmo procedimento de secagem foi utilizado para determinação da massa seca da parte aérea de *P. sellowianus*.

### 3.4.4 O equipamento de cisalhamento direto *in situ*<sup>12</sup>

A inexistência de equipamentos específicos para determinar *in situ* o efeito de plantas na resistência ao cisalhamento do solo constituiu um dos maiores desafios à realização do presente estudo. Tal condição, em última análise, tornou obrigatória a necessidade de projetar e desenvolver um equipamento para obter informações representativas da resistência ao cisalhamento do compósito solo-raiz, para assim viabilizar a obtenção de resposta aos objetivos previamente estabelecidos.

Como será demonstrado ao longo desta seção, a construção de um equipamento de cisalhamento direto *in situ* foi delineada principalmente com base nas seguintes questões: (i) dimensões da caixa de cisalhamento; (ii) sistema de aplicação de forças cisalhantes; (iii) sistema de aplicação de tensões normais e (iv) sistema de aquisição de dados. Além disso, diversos detalhes tanto no equipamento como nos procedimentos de realização dos ensaios tiveram de ser adaptados e corrigidos diversas vezes até a observação da congruência entre processos, de modo que a configuração final resultasse na obtenção de informações normalmente esperadas de um ensaio de cisalhamento direto, ou seja, a coesão ou intercepto coesivo e o coeficiente angular ou ângulo de atrito interno.

#### *Aspecto geral e composição*

O equipamento de cisalhamento direto *in situ* foi projetado e desenvolvido para a tarefa de cisalhar um corpo de prova com dimensões suficientes para englobar o sistema radicular de uma planta arbustiva, além de herbáceas e árvores jovens ou de pequeno porte.

O aspecto geral do equipamento é apresentado na Figura 28, onde a seguinte composição pode ser observada:

1. Caixa de cisalhamento fabricada em aço com espessura de 6,4 mm. Para o sistema foram fabricadas duas dimensões de caixa, uma com 40 cm de comprimento, 40 cm de largura e 40 cm de altura e outra com 40 cm de comprimento, 40 de largura e 20 de altura<sup>13</sup>.

---

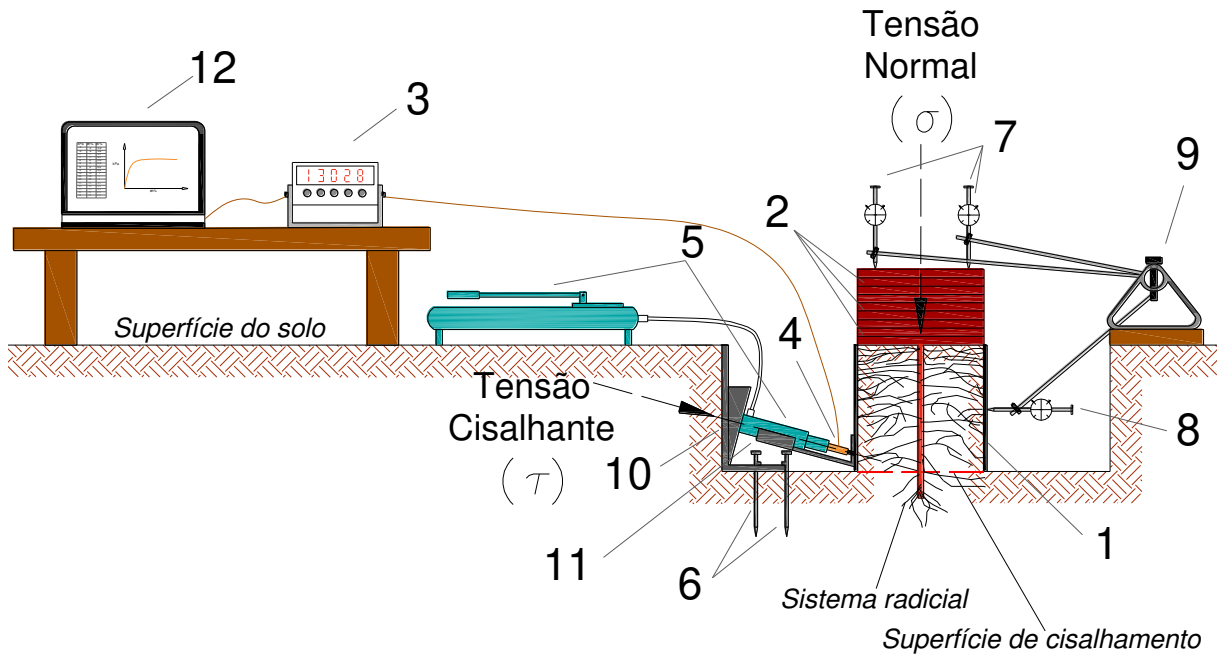
<sup>12</sup> Por se tratar de uma inovação tecnológica que fornecerá bases para a inclusão de plantas em cálculos de estabilidade de taludes, o equipamento de ensaios de cisalhamento direto *in situ* será submetido aos trâmites legais no Instituto Nacional da Propriedade Intelectual (INPI) para obtenção de registro de patente, juntamente com os procedimentos para realização de ensaios.

<sup>13</sup> Apenas a caixa de 40×40×20 cm foi utilizada nos ensaios de cisalhamento direto *in situ*.

2. Nove chapas de ferro fundido de 39×39×2,1 cm, com 25 kg cada, para aplicação de tensão normal (carga vertical);
3. Amplificador de frequência (Scout 55) para leitura dos pulsos elétricos (força, N) provocados pelas deformações sofridas pela célula de carga;
4. Célula de carga (10 kN) para obter os valores de força aplicadas no corpo de prova pelo acionamento do macaco hidráulico;
5. Macaco hidráulico (10 t) para aplicação de tensão horizontal;
6. Oito grampos de aço de 8 mm de diâmetro e 40 cm de comprimento para fixação de cunha de reação;
7. Três defletômetros analógicos, com precisão de 0,01 mm, para leitura da deformação vertical do corpo de prova;
8. Um defletômetro analógico, com precisão de 0,01 mm, para leitura da deformação horizontal do corpo de prova;
9. Barra de aço e quatro suportes para defletômetros;
10. Chapa de aço com cunha de 15° para escora e posicionamento adequado do macaco hidráulico;
11. Suporte para o posicionamento do pistão do macaco hidráulico;
12. Notebook e software específico para leitura dos picos de força aplicadas durante o deslocamento horizontal do bloco ensaiado.



Figura 28 – Representação esquemática do equipamento de ensaio de cisalhamento direto *in situ*, em bloco de solo com raízes. Onde: 1) Caixa de cisalhamento; 2) Placas de ferro fundido; 3) Amplificador de frequência; 4) Célula de carga; 5) Conjunto hidráulico (bomba e pistão); 6) Grampos de ancoragem; 7) Defletômetros verticais; 8) Defletômetro horizontal; 9) Barra de aço e suportes para defletômetros; 10) Chapa de aço com cunha de 15° para posicionamento do pistão do macaco hidráulico; 11) Suporte para posicionamento do pistão do macaco hidráulico; 12) Notebook e software.



Fonte: Próprio autor.

#### *Detalhes e decisões de fabricação*

Para determinar a dimensão da caixa de cisalhamento, inicialmente pesquisou-se informações na literatura especializada<sup>14</sup>. Como demonstrado na seção 2.4.2 (página 45), a revisão de literatura indicou dimensões médias de aproximadamente de 40 cm de largura, 40 de comprimento e 20 cm de altura. A decisão final para construir uma caixa com tais dimensões resultou de análise específica dos sistemas radiciais a serem estudados (espécies herbáceas, arbustivas e arbóreas de pequeno porte) de modo a identificar se a maioria das raízes poderiam ser amostradas pelo volume da caixa. Além disso, observou-se que caixas com comprimento maior do que a altura têm maior estabilidade, de modo que durante a aplicação de uma tensão horizontal a sua tendência ao tombamento é menor. Nos primeiros testes prévios aos ensaios também foi verificado que a tendência ao tombamento poderia ser reduzida, ou anulada, pela aplicação de uma tensão horizontal levemente inclinada. Isso resultou no posicionamento do

<sup>14</sup> Cabe aqui ressaltar que a análise dos estudos de Coulon e Gusso (1977), Endo (1980), Tobias (1995), Lawrence et al. (1996), Gray e Sotir (1996), Fan e Su (2008) e Comino et al. (2010), dentre os diversos analisados, se destacaram em importância no projeto e desenvolvimento do equipamento de cisalhamento direto *in situ*.

parafuso de acoplagem da célula de carga a uma inclinação de 15° com a horizontal. Essa inclinação, após os ensaios, foi corrigida para componente horizontal.

Na determinação das dimensões das placas metálicas para aplicação de tensão normal sobre o corpo de prova foram levadas em consideração as profundidades em que as raízes das plantas normalmente estão mais presentes, assim como a praticidade para aplicação das tensões normais. Além disso, considerou-se a importância da distribuição homogênea das tensões normais sobre a superfície do corpo de prova. Uma vez que foi definida a construção de uma caixa de cisalhamento de 40×40 cm de lado, optou-se pela fabricação de chapas metálicas ligeiramente menores, ou seja, 39×39 cm. Quanto à espessura, como observado na Tabela 2 (página 48), ensaios de cisalhamento direto *in situ* têm sido normalmente conduzidos sob tensões normais menores que 30 kPa. Sendo assim, e também considerando as características físicas do solo da área em estudo (tensões proporcionadas pelo solo), optou-se pela aplicação de tensões normais de 4,6, 9,2 e 13,8 kPa. Para que isso fosse atendido, as chapas foram fabricadas em ferro fundido, com espessura de 2,1 cm, resultando no total de 9 chapas de 25 kg cada. Portanto, foram utilizadas 3 chapas de ferro fundido para a aplicação de cada uma das tensões normais desejadas.

Para a aplicação das tensões cisalhantes nos corpos de prova, optou-se por um macaco hidráulico, aparelho portátil, de fácil manuseio e com a capacidade de aplicar tensões elevadas com pouco esforço.

Na leitura das deformações verticais e horizontais, optou-se por defletômetros analógicos, instrumentos resistentes às condições de campo, de grande praticidade e precisão, tendo a capacidade de determinar deformações a partir de 0,01 mm. O posicionamento de três defletômetros na parte superior da caixa de cisalhamento e apenas 1 na parte posterior foi determinado por observações de campo, uma vez que maiores variações foram percebidas na parte superior da caixa (expansão e compressão do corpo de prova).

Para determinar as forças cisalhantes aplicadas no corpo de prova, optou-se pelo uso de uma célula de carga com capacidade de 10 kN e um amplificador de frequência, instrumentos relativamente sensíveis para as condições de campo, mas que possibilitam a obtenção de informações mais precisas.

### *Funcionamento e peculiaridades*

O funcionamento é similar ao de uma prensa de cisalhamento direto de laboratório, em que um corpo de prova recebe tensões normais e tensões cisalhantes, e os ensaios podem ser de

deformação controlada (ensaios em mais de uma amostra para obter a envoltória de resistência) ou de tensão controlada (ensaios na mesma amostra). O mesmo é verdadeiro para as informações geradas, visto que por meio do equipamento elaborado também é possível obter relações entre a tensão cisalhante (kPa) e a tensão normal (kPa), tensão cisalhante (kPa) e deformação horizontal (%) e deformação vertical (%) e deformação horizontal (%).

O principal diferencial do equipamento está relacionado ao grande tamanho da caixa de cisalhamento (40×40×20 cm), que permite realizar ensaios com todo ou grande parte do sistema radicular de plantas arbóreas, arbustivas e herbáceas. Em linhas gerais, o equipamento permite obter informações sobre a interação entre solo e o sistema radicular de plantas inteiras, o que é bastante limitado em laboratório, onde as amostras normalmente tem dimensões de 10×10×2 cm ou 5×5×2 cm.

Quanto à aquisição de informações, o equipamento permite a obtenção de dados de forma semiautomatizada. As deformações verticais e horizontais do corpo de prova são coletadas pela leitura de defletômetros, enquanto a força aplicada horizontalmente é obtida por meio de software e armazenada automaticamente em arquivo de texto no computador.

### **3.4.5 Procedimentos para realização dos ensaios**

Nos ensaios de cisalhamento direto *in situ* foram utilizados dois tipos de corpos de prova, nomeadamente corpos de prova de solo com e sem plantas de *P. sellowianus* (Figura 29).

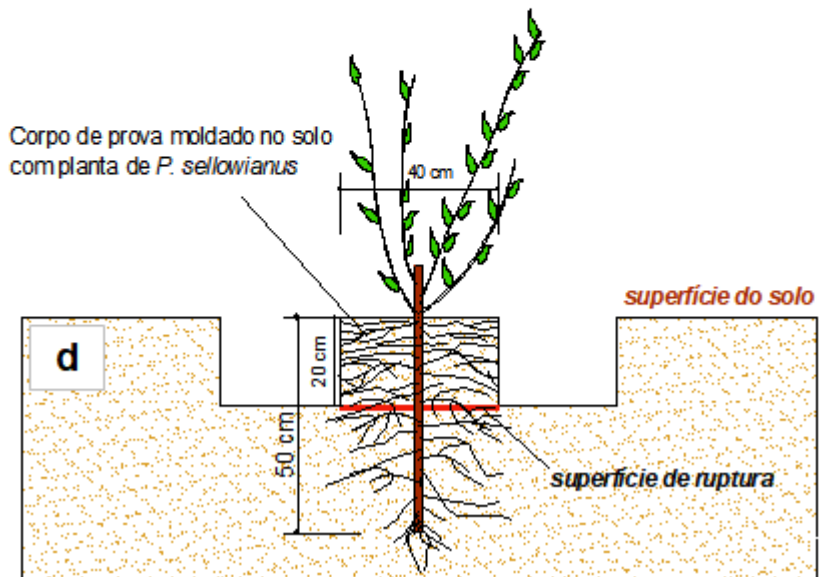
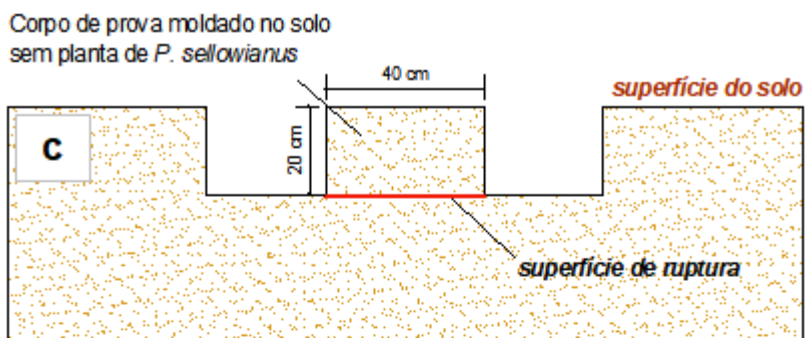
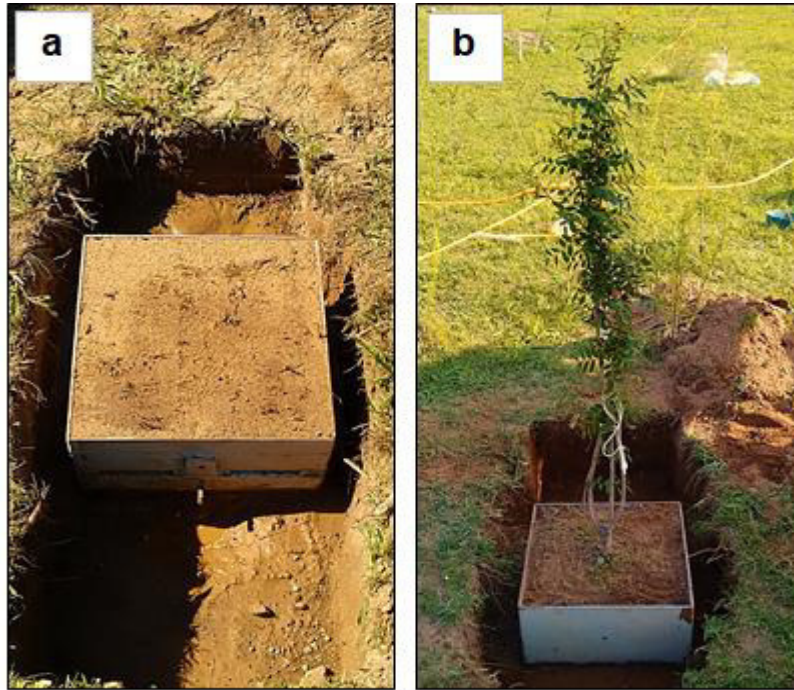
Como mencionado na seção anterior, devido à pequena profundidade da superfície de ruptura, as tensões normais aplicadas foram relativamente baixas.

As tensões aplicadas por meio de chapas de ferro fundido foram 4,6, 9,2 e 13,8 kPa. É importante destacar que essas tensões normais foram aplicadas externamente, uma vez que o próprio corpo de prova também conferiu uma tensão normal sobre a superfície de cisalhamento.

A tensão normal aplicada pelo corpo de prova foi obtida medindo-se seu peso ao término de cada ensaio (Figura 32a).

As tensões normais aplicadas sobre as superfícies de ruptura foram compostas pela soma entre tensão normal de cada corpo de prova e a tensão normal externa, aplicada pelas chapas de ferro fundido.

Figura 29 – Tipos de corpos de prova cisalhados: a) solo sem raízes; b) solo com plantas de *Phyllanthus sellowianus* de entre 10 e 12 meses após o plantio (período de inverno); c) representação esquemática do corpo de prova de 40×40×20 cm sem raízes; d) representação esquemática do corpo de prova de 40×40×20 cm com raízes de *Phyllanthus sellowianus*.



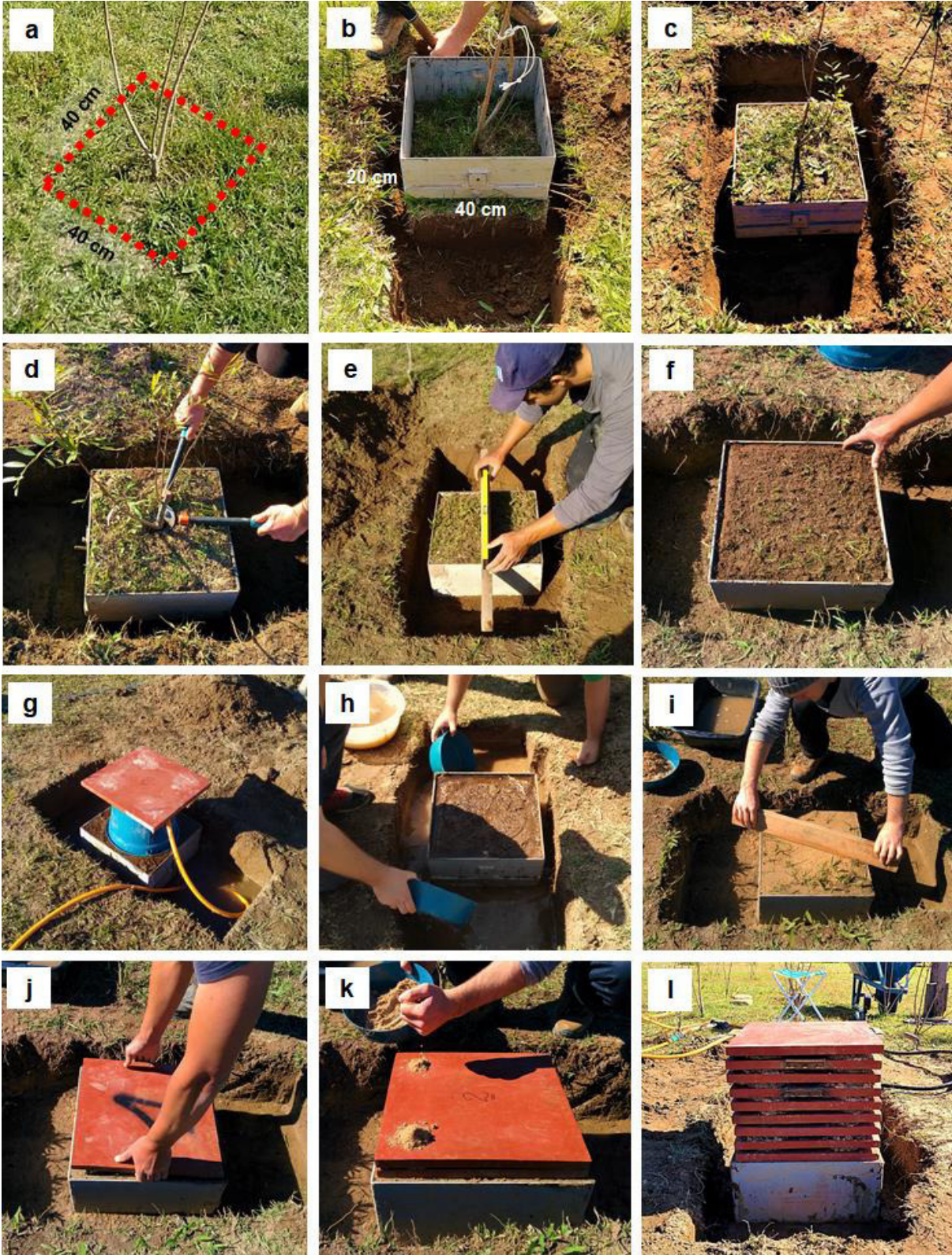
A seguir são descritos os procedimentos que foram utilizados em todos os ensaios de cisalhamento direto *in situ*. É importante destacar que os detalhes inerentes às condições de cada tipo de corpo de prova não afetaram a condução dos ensaios, para os quais sempre foram utilizados os mesmos procedimentos.

A execução dos ensaios envolveu duas fases principais. A primeira foi a preparação do corpo de prova e envolveu cerca 2 horas. A segunda foi a instalação dos instrumentos de medição e a condução do ensaio, envolvendo cerca 1 hora. Assim, descontando tempo gasto no transporte e acomodação de equipamentos, cada ensaio teve duração aproximada de 3 horas. Por outro lado, ao contabilizar todos os detalhes envolvidos, o tempo total para realizar um ensaio foi de aproximadamente 5 horas.

O primeiro passo, indicado na Figura 30a, foi a demarcação, no entorno da planta, do local de instalação da caixa de cisalhamento. Após a centralização no entorno da planta, deu-se início à escavação preparatória do corpo de prova (Figura 30b). Esse procedimento foi realizado de modo a deixar o corpo de prova livre em todos os sentidos e tomando-se o cuidado para manter a integridade da superfície de cisalhamento. Na escavação foram consideradas as medidas necessárias para a instalação da placa de posicionamento do macaco hidráulico (Figura 28, n° 10) e do defletômetro horizontal (Figura 28, n° 8). Assim, na parte anterior da caixa, local de posicionamento do pistão do macaco hidráulico (Figura 28, n° 5), foi realizada a escavação de 38 cm de comprimento, 60 cm de largura e 23 cm de profundidade. Na parte posterior da caixa, local de posicionamento do defletômetro de medição do deslocamento horizontal (Figura 28, n° 8), escavou-se 30 cm de comprimento, 60 de largura e 20 cm de profundidade. Nas laterais da caixa foram escavados 10 cm de largura e 20 cm de profundidade. A caixa com as dimensões desejadas foi então inserida cuidadosamente no bloco de solo previamente moldado (Figura 30c). Ferramentas de corte foram utilizadas para aparar o solo e as raízes sobressalentes, facilitando a inserção da caixa no corpo de prova.

Para possibilitar o nivelamento da caixa de cisalhamento e também a aplicação de tensão normal, a parte aérea da planta foi removida rente ao solo com auxílio de tesoura de poda (Figura 30d). A caixa de cisalhamento foi nivelada com nível de bolha e a superfície do corpo de prova foi regularizada, removendo excessos de raízes e a parte aérea de gramíneas (Figura 30e, Figura 30f).

Figura 30 – Preparação do corpo de prova para ensaio de cisalhamento direto *in situ*. Onde: a) demarcação da amostra; b) escavação preparatória; c) escavação concluída; d) remoção da parte aérea da planta; e) nivelamento da caixa de cisalhamento; f) regularização da superfície do corpo de prova; g) homogeneização da umidade do solo; h) retirada do excesso de água; i) preenchimento e regularização da superfície do corpo de prova com areia e régua de madeira; j) Aplicação da tensão normal; k) aplicação de areia para posicionamento das placas metálicas; l) tensão normal aplicada e início do adensamento.



Fonte: Próprio autor.

Após a regularização da superfície do corpo de prova, deu-se início ao processo de homogeneização da umidade do solo (Figura 30g). Nesse processo foi utilizado um recipiente plástico com 30 cm de diâmetro e 50 de altura, além de água corrente (a uma vazão aproximada de 100 litros/hora) e duas placas metálicas de 25 kg cada. O recipiente plástico foi centralizado sobre o corpo de prova, a magueira inserida em seu interior e acionada, ao passo que as placas metálicas foram colocadas sobre o recipiente plástico para mantê-lo fixo e promover o direcionamento da água. O corpo de prova foi umedecido por 30 minutos.

Passado o período de umedecimento do solo, iniciou-se a remoção do excesso de água acumulado em seu entorno (Figura 30h). Feito isso, a superfície do corpo de prova, levemente alterada pela ação da água, foi novamente regularizada e nivelada, dessa vez utilizando areia peneirada (peneira de malha 3 mm) (Figura 30i).

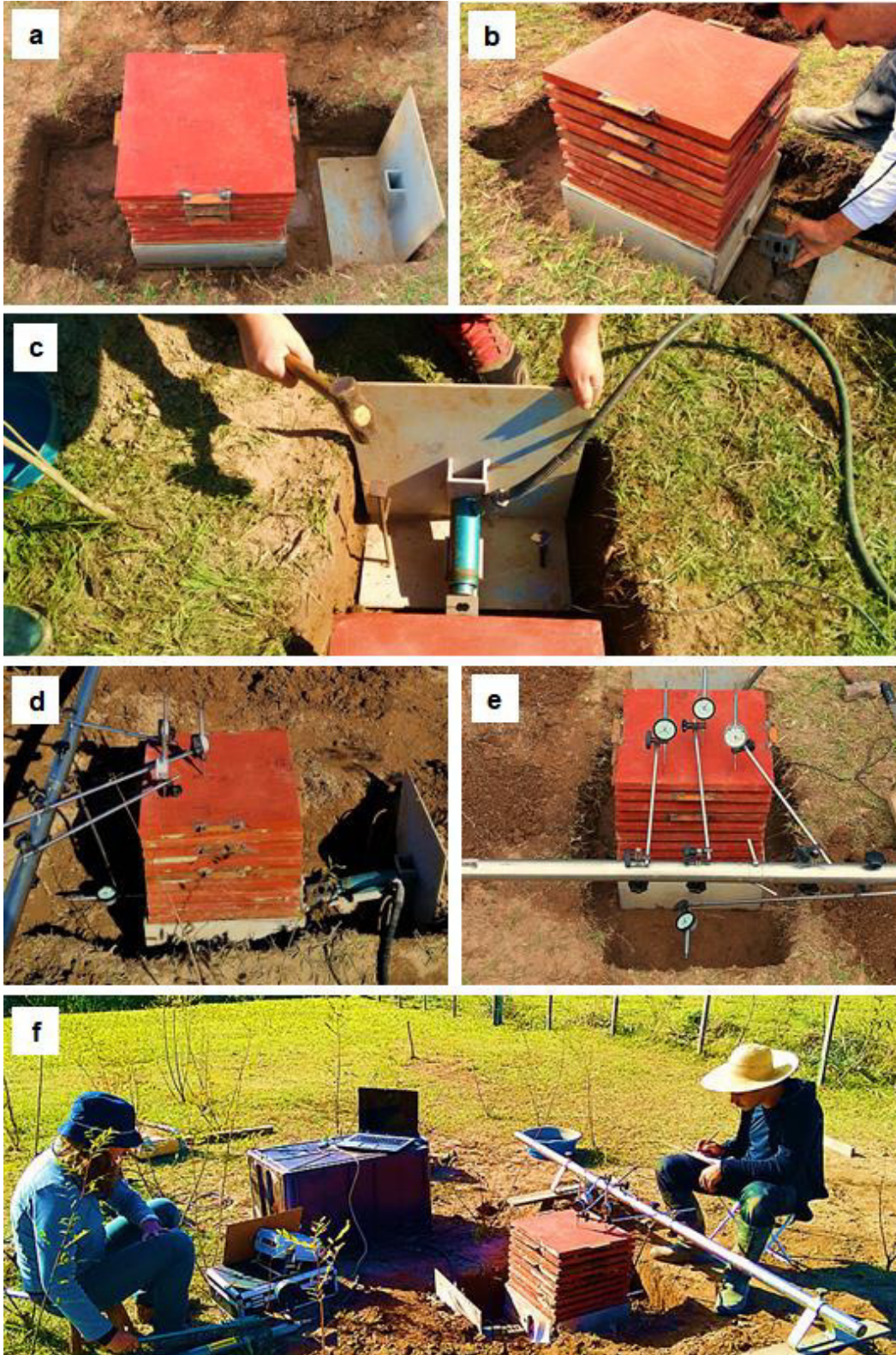
Após a regularização da superfície do corpo de prova, iniciou-se a aplicação da tensão normal escolhida (Figura 30j). Como pode ser observado na Figura 30l, a tensão externa escolhida foi de 13,8 kPa (tensão externa máxima), alcançada com o uso de 9 placas de ferro fundido de 25 kg cada, totalizando 225 kg (1,53 kPa por placa). Para possibilitar o posicionamento adequado de cada placa, em cada interstício foi adicionada uma pequena quantidade de areia (Figura 30k). Ao término de cada ensaio a quantidade de areia foi removida e pesada para posteriormente ser contabilizada na tensão normal. Para cada corpo de prova assumiu-se um período de adensamento de 30 minutos. O tempo foi cronometrado a partir da colocação e nivelamento da última placa de ferro fundido.

É importante destacar que todas as placas metálicas foram numeradas e sua aplicação sobre os corpos de prova foi realizada sempre com a mesma ordem e posição.

A instalação dos instrumentos para medição da força aplicada pelo macaco hidráulico e das deformações horizontais e verticais foi realizada durante o processo de adensamento do corpo de prova. Nesse processo, o passo inicial foi o posicionamento da placa de reação (Figura 31a) e a colocação da célula de carga (rosqueada em um parafuso) na parte anterior da caixa de cisalhamento (Figura 31b). Tanto a cunha da placa de reação, como o parafuso em que a célula de carga é rosqueada, têm inclinação de 15°.

Para manter o macaco hidráulico sempre posicionado abaixo da célula de carga foi parafusado um suporte de diâmetro ligeiramente superior (Figura 28, nº 11). Com o macaco hidráulico alocado sobre o suporte, ajustou-se a posição da placa de reação. Uma vez encontrada a posição adequada, eventuais espaços vazios na interface entre placa de reação e solo foram preenchidos com areia úmida compactada. Após isso, a placa de reação foi firmemente ancorada ao solo com auxílio de grampos aço (8 mm de diâmetro, 40 cm de comprimento) (Figura 31c).

Figura 31 – Segunda fase do ensaio de cisalhamento direto *in situ*: instalação do macaco hidráulico para aplicação da força horizontal e também dos instrumentos para medição das deformações horizontais e verticais. a) colocação da placa de aço com cunha para posicionamento do pistão do macaco hidráulico; b) acoplagem da célula de carga à caixa de cisalhamento; c) fixação da placa de posicionamento ao solo por meio de grampos de aço; d) vista lateral da máquina; e) vista da parte posterior do equipamento de cisalhamento direto *in situ* pronta para o início do ensaio; f) início do ensaio de cisalhamento direto *in situ*.





Usando a barra metálica com fixadores, três defletômetros foram instalados em disposição triangular sobre a última placa de tensão normal, enquanto um defletômetro foi instalado em posição horizontal, no centro da caixa de cisalhamento, na parte posterior (Figura 31d e Figura 31e). Os defletômetros verticais, com capacidade de 50 mm, foram pressionados contra a placa de tensão normal até a marca de 20 mm (ponteiro menor) para permitir a medição das alterações de volume do corpo de prova (compressão e/ou expansão) durante o ensaio. O defletômetro horizontal foi pressionado contra a caixa de cisalhamento até a marca de 5 mm (ponteiro menor). Antes de iniciar o ensaio, os ponteiros maiores dos defletômetros, que têm precisão de 0,01 mm, foram ajustados na posição zero.

Realizada a preparação do corpo de prova e a instalação dos equipamentos de medição, ligou-se o computador e o software para a leitura das forças aplicadas horizontalmente no corpo de prova. Também foi ligado o amplificador de frequência (Figura 28, nº3), que interpreta as deformações da célula de carga, permitindo que o software armazene as forças aplicadas durante o ensaio.

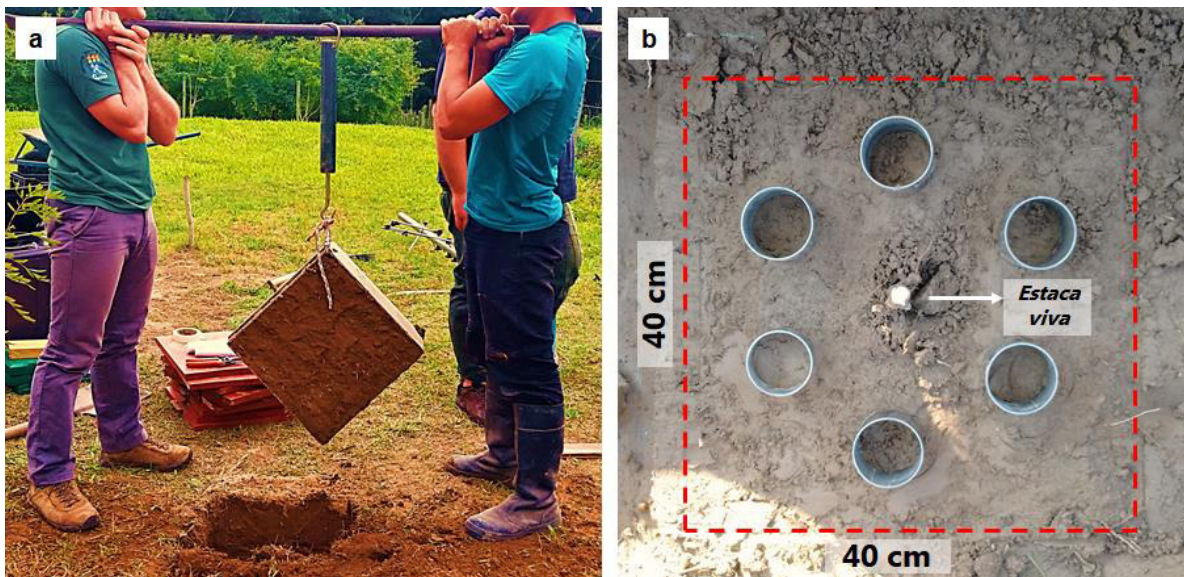
Por meio de uma opção no software, a leitura de força foi zerada. Clicou-se na opção iniciar ensaio. A partir de então, a alavanca do macaco hidráulico foi movimentada lentamente, enquanto o software realizava o registro das forças cisalhantes aplicadas no corpo de prova. Ao mesmo tempo, observando-se os defletômetros, as deformações horizontais e verticais do corpo de prova foram anotadas em uma planilha.

A obtenção dos dados de tensão cisalhante e das deformações horizontal e vertical teve duração média de 1 hora. Todos os corpos de prova foram conduzidos até a deformação horizontal de 4,8 cm ou 12% do comprimento do corpo de prova. Portanto, a velocidade média de cisalhamento utilizada nos ensaios foi de aproximadamente de 0,8 mm/min.

Imediatamente após o final de cada ensaio, os corpos de prova foram removidos e pesados com auxílio de um dinamômetro com capacidade de 100 kg e precisão de 0,5 kg (Figura 32a). As características físicas e a umidade do solo na superfície de ruptura dos corpos de prova cisalhados foram acompanhadas por meio da coleta de 6 amostras indeformadas (cilindros de 3×5cm), após a realização de cada ensaio (Figura 32b).

Foram utilizadas as indicações da Norma Brasileira de Estabilidade de Taludes - NBR 11682 (ABNT, 2009) para definir o número de amostras a serem cisalhadas. A norma indica que a envoltória de resistência de uma camada de solo deve ser composta por no mínimo 12 corpos de prova, de modo que seja possível elaborar um intervalo de confiança para o conjunto de dados. Para atender a essa indicação, de acordo com a norma, podem ser utilizadas o mínimo de 4 repetições (corpos de prova) de 3 tensões normais ou 3 repetições de 4 tensões normais.

Figura 32 – Características determinadas imediatamente após os ensaios de cisalhamento direto: a) determinação do peso dos corpos de prova de dimensões 40×40×20 cm; b) coleta de amostras indeformadas de solo na superfície de ruptura (linhas vermelhas) para determinação das características físicas e acompanhamento da umidade do solo.



Fonte: Próprio autor.

No presente estudo foi realizado o total 40 ensaios de cisalhamento direto *in situ*, sendo 20 em solo com plantas e 20 em solo sem plantas. Para a composição de cada envoltória de resistência foram utilizadas 4 tensões normais, sendo cada uma repetida 5 vezes.

As tensões normais médias aplicadas sobre a superfície de cisalhamento foram 3,5, 8,7, 14 e 19,4 kPa. A tensão normal de 3,5 kPa corresponde a tensão média do próprio solo (20 cm de altura) sobre a superfície de cisalhamento. As demais tensões normais foram obtidas pela soma entre tensão do próprio solo mais 4,6 kPa (3 placas), 9,2 kPa (6 placas) e 13,8 kPa (9 placas). É importante destacar que as tensões proporcionadas pelo próprio solo foram variáveis, pois corresponderam às condições de cada corpo de prova no momento da pesagem.

### 3.4.6 Seleção das plantas para os ensaios

A variável da parte aérea que melhor explicou as variações na resistência do sistema radicial (seção 4.1) foi utilizada para a seleção das plantas empregadas nos ensaios de cisalhamento direto *in situ*.

Para o processo de amostragem, a variável selecionada foi usada para organizar as plantas em diferentes classes de crescimento. Nessa organização, utilizou-se como base a regra de Sturges ( $1+3,3 \cdot \log n$ ) (BUSSAB e MORETTIN, 1988).

Para caracterizar o efeito conjunto de todo o plantio sobre a resistência ao cisalhamento do solo, em cada classe de crescimento foram amostradas 4 plantas, sendo cada uma submetida às tensões normais utilizadas nos ensaios de cisalhamento direto *in situ*.

### 3.4.7 Análise dos dados

O efeito das plantas na resistência ao cisalhamento do solo foi investigado pelo critério de ruptura de Mohr-Coulomb (LAMBE e WHITMAN, 1969), considerando as variações nos parâmetros coesão e ângulo de atrito interno do solo. Essa análise foi complementada pela verificação de tendências nas relações gráficas entre tensão cisalhante×deformação horizontal e deformação horizontal×deformação vertical.

A adequabilidade dos dados para as análises de regressão foi assegurada pela verificação da homogeneidade de variância e da independência e normalidade dos resíduos. Para a determinação da homogeneidade foi utilizado o teste de Bartlett, enquanto a independência dos resíduos foi verificada pelo teste de Durbin-Watson e a normalidade pelos testes de Kolmogorov-Smirnov, Anderson-Darling e Shapiro-Wilk (SCHNEIDER et al., 2009). As análises foram realizadas com auxílio do software Statistical Analysis System 9.2 (SAS), considerando 5% de probabilidade de erro.

A comparação das envoltórias de resistência do solo com e sem plantas de *P. sellowianus* foi realizada pela verificação das hipóteses de igualdade entre interceptos e de paralelismo e coincidência das curvas, usando o conceito de variável Dummy. A análise foi realizada no Action Stat (ESTATCAMP, 2014), um sistema estatístico desenvolvido em linguagem de programação R e operado pela interface MS Excel.

A avaliação da igualdade de interceptos (coesão) consistiu em testar as seguintes hipóteses:

$H_0$ : As retas têm o mesmo intercepto;

$H_1$ : As retas não possuem o mesmo intercepto.

Na avaliação de paralelismo (coeficiente angular ou ângulo de atrito interno) foram testadas as seguintes hipóteses:

$H_0$ : As retas possuem o mesmo coeficiente angular;

$H_1$ : As retas não possuem o mesmo coeficiente angular.

Para determinar coincidência das curvas, ou seja, se os interceptos e coeficientes angulares das curvas são iguais, as seguintes hipóteses foram testadas:

$H_0$ : As retas possuem o mesmo intercepto e coeficiente angular;

H<sub>1</sub>: As retas possuem intercepto e coeficiente angular distintos, ou ao menos um dos dois parâmetros distintos.

Nesses testes de comparação de retas, a hipótese H<sub>0</sub> foi aceita sempre que o P-valor foi maior que 0,05, enquanto a hipótese H<sub>1</sub> foi aceita sempre que P-valor foi menor que 0,05.

Os parâmetros empíricos da curva de retenção de umidade do solo foram obtidos por meio de análise de regressão não linear, utilizando o software Soil Water Retention Curve – SWRC (DOURADO-NETO et al., 2000).

A estatística descritiva foi utilizada como base para a seleção de plantas para os ensaios de cisalhamento direto *in situ* e para verificação da homogeneidade de características físicas dos corpos de prova e das superfícies de cisalhamento. Especificamente foram utilizadas análises de distribuição de frequências, apresentação de valores mínimos, médios e máximos, além de desvio padrão e coeficiente de variação (C.V.%).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 RESISTÊNCIA AO ARRANQUIO VERTICAL

#### 4.1.1 Características físicas do solo

Conforme pode ser observado na Tabela 3, o solo apresenta textura franco arenosa até 1,0 m de profundidade, com conteúdos médios de areia, silte e argila de 74,6, 17,8 e 7,6%, respectivamente. A densidade média do solo foi de 1,43 g/cm<sup>3</sup>, enquanto a densidade de partícula foi de 2,60 g/cm<sup>3</sup> e a porosidade total de 0,45 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>.

Devido aos elevados teores de areia, não foi possível avaliar os limites de Atterberg do solo (limite de plasticidade e limite de liquidez).

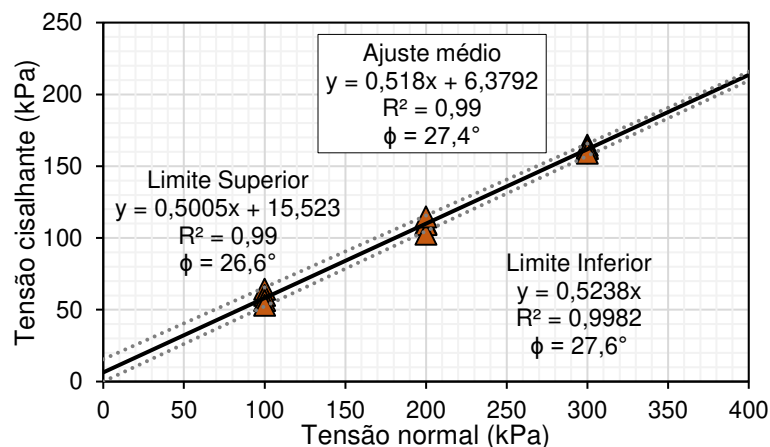
Tabela 3 – Características físicas do solo na área do experimento de arranquio vertical. Aspectos de textura (areia, silte e argila), estrutura (densidades e porosidade) e limites de Atterberg (limites de liquidez e plasticidade)

Profundidade (cm)	Granulometria (%)			Densidade do solo (g/cm <sup>3</sup> )	Densidade de partícula (g/cm <sup>3</sup> )	Porosidade (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	Limite de Liquidez (%)	Limite de Plasticidade (%)
	Areia	Silte	Argila					
0-20	78	14	8	1,36	2,60	0,47	-	-
20-40	79	15	6	1,38	2,60	0,47	-	-
40-60	75	18	7	1,47	2,60	0,43	-	-
60-80	74	20	7	1,48	2,60	0,43	-	-
80-100	68	22	10	1,47	2,60	0,43	-	-
Média	74,8	17,8	7,6	1,43	2,60	0,45	-	-

#### 4.1.2 Resistência ao cisalhamento direto do solo em laboratório

As amostras de solo, coletadas a 20 cm de profundidade para realização dos ensaios de resistência ao cisalhamento, apresentaram valores médios de grau de saturação, peso específico natural e índice de vazios de 80%, 1,68 g/cm<sup>3</sup> e 0,77, respectivamente. Para essas condições, os resultados apresentados na Figura 33 mostram que a coesão variou de 0 a 15,5 kPa, enquanto o ângulo de atrito interno variou de 26,6° a 28,2°.

Figura 33 – Envoltórias de resistência ao cisalhamento do solo. As linhas pontilhadas indicam o intervalo de confiança dos dados com 95% de confiabilidade



#### 4.1.3 Características químicas do solo

Quanto às características químicas (Tabela 4), o solo tem *P* limitante, *K* médio, %*M.O.* muito baixa, *Al* baixo e *pH* baixo (MANUAL DE CALAGEM E ADUBAÇÃO RS/SC, 2016). De acordo com Schiechl (1973; 1992), a Engenharia Natural utiliza plantas de grande rusticidade e capacidade de desenvolvimento em solos pobres em nutrientes, tornando sua adubação desnecessária ou pouco indicada. Nesse caso, especialmente para a realização de experimentos, a adubação e/ou correção do solo podem ser dispensadas.

Tabela 4 – Características químicas do solo na área do experimento de arranquio vertical

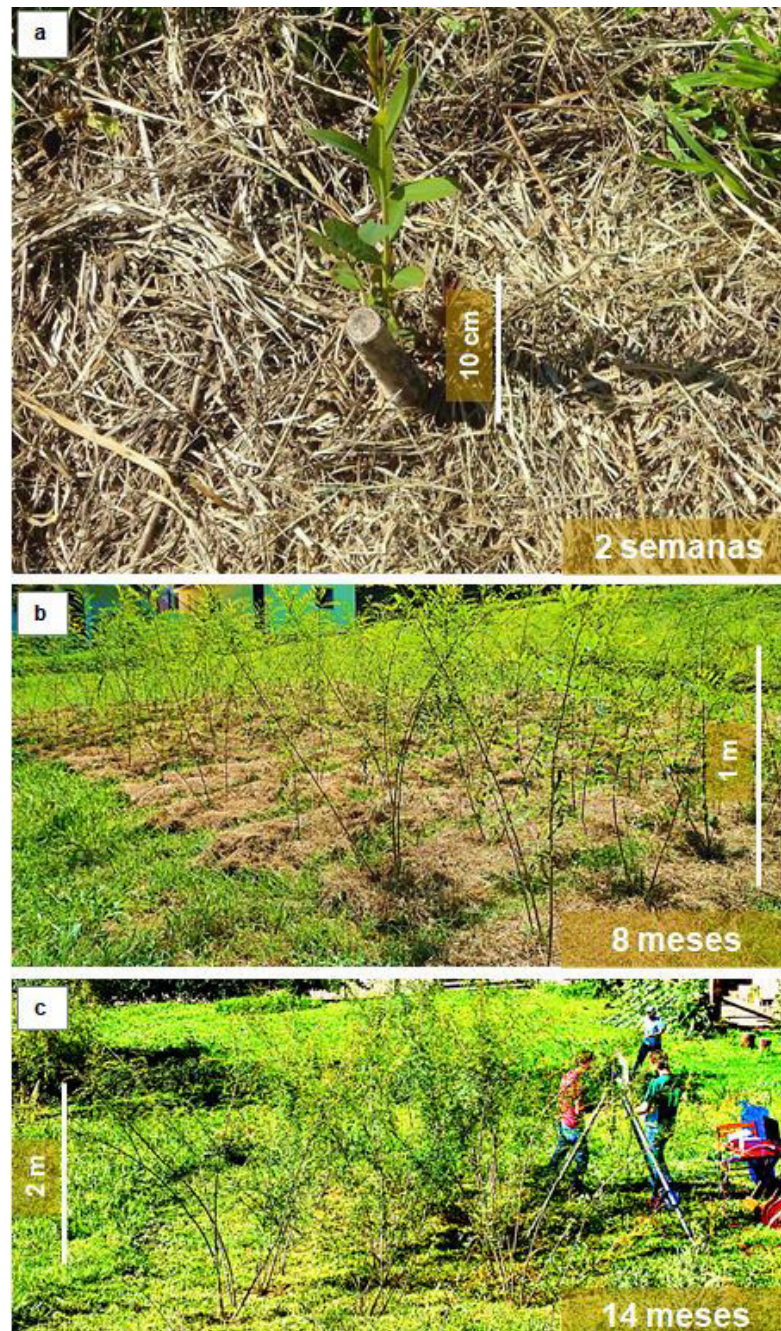
Camada (cm)	<i>P</i> (mg/dm <sup>3</sup> )	<i>K</i> (mg/dm <sup>3</sup> )	% <i>M.O.</i>	<i>Al</i> (cmolc/dm <sup>3</sup> )	<i>pH</i>
0-20	32,3	136,0	1,0	0,6	4,8
20-40	33,4	84,0	0,5	0,6	5,0
40-60	17,1	60,0	0,5	1,0	5,0
60-80	11,8	60,0	0,4	1,2	4,9
80-100	5,3	64,0	0,4	0,6	5,0
Média	20,0	80,8	0,6	0,8	4,9

*P*, fósforo disponível; *K*, potássio; *M.O.*: matéria orgânica; *Al*, alumínio

#### 4.1.4 Crescimento das estacas e resistência ao arranquio vertical

Na Figura 34 é possível observar o aspecto geral do desenvolvimento das plantas de *P. sellowianus*.

Figura 34 – Aspectos gerais do desenvolvimento das plantas de *Phyllanthus sellowianus* após a implantação do experimento. a) planta com 2 semanas; b) plantas aos 252 dias (8 meses) após o plantio, com brotações de 1,0 m de altura; c) plantas aos 421 dias (14 meses) após o plantio, com brotações passando de 2,0 m de altura

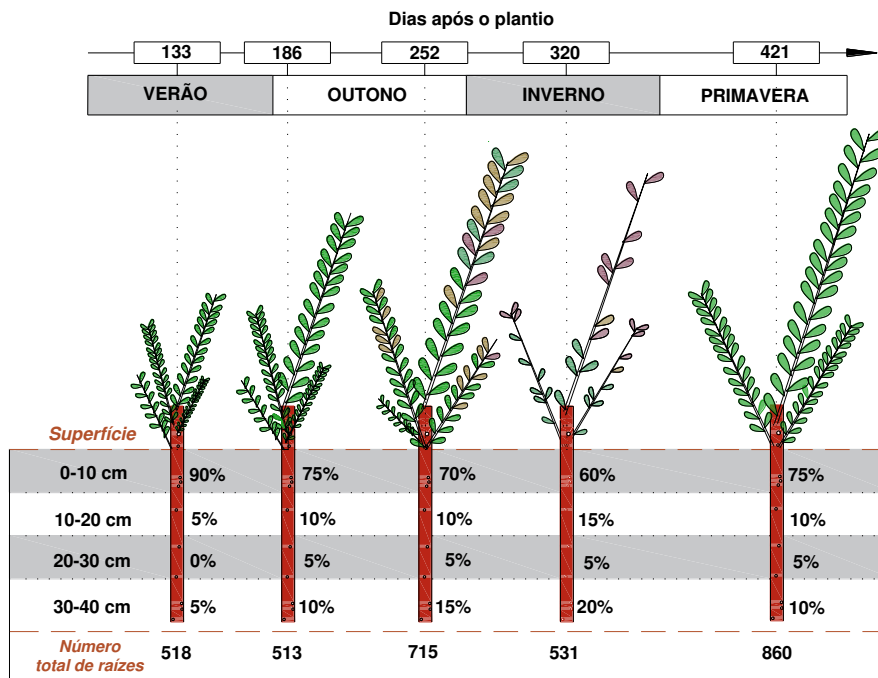


Fonte: Próprio autor.

A brotação das estacas teve início duas semanas após o plantio (Figura 34a). A taxa de sobrevivência das plantas aos 61, 133, 186, 252, 320 e 421 dias após o plantio foi de 95,8, 91,2, 87,5, 100, 75 e 91,2%, respectivamente. Neste caso, os ensaios de resistência ao arranquio sempre foram conduzidos com no mínimo 18 plantas (repetições). Na Figura 34 (a, b, c), é possível observar o aspecto geral do desenvolvimento das plantas de *P. sellowianus*.

A Figura 35 mostra a porcentagem de raízes remanescentes ao longo do comprimento de estaca enterrada após os arranquios verticais de plantas aos 133, 186, 252, 320 e 421 dias após o plantio. Aos 61 dias, a quantidade e tamanho de raízes nas estacas foi incipiente e por isso não foram incluídas na Figura 35. Para os períodos apresentados, os resultados mostraram que entre 60 e 90% das raízes permaneceram ligadas até os primeiros 10 cm de comprimento de estaca enterrada, e menos de 40% das raízes permaneceram ligadas entre 10-40 cm de comprimento de estaca enterrada. Essa maior concentração de raízes próximas à superfície do solo é uma característica bem definida dos sistemas radiculares e tem sido confirmada por diversos autores para inúmeras espécies de plantas e formas de propagação (GRAY e SOTIR 1996; ABERNETHY e RUTHERFORD 2001; BISCHETTI et al., 2005; MATTIA et al. 2005; DE BAETS et al., 2008; ABDI et al., 2009; DOUGLAS et al., 2010; BURYLO et al. 2011). Esse comportamento tem sido usualmente explicado pelos conteúdos de água, oxigênio e nutrientes estarem mais prontamente disponíveis próximos à superfície do solo (GRAY e SOTIR, 1996; ATWELL, 1999).

Figura 35 – Porcentagem média e total de raízes que permaneceram ligadas ao longo do comprimento de estaca enterrada após o arranquio vertical. Os dados incluem plantas com 133, 186, 252, 320 e 421 dias após o plantio



Com relação à soma total, mais raízes permaneceram ligadas às estacas na primavera (860 raízes aos 421 dias após o plantio) e no outono (715 raízes aos 252 dias após o plantio) do que nos demais períodos (518, 513 e 531 raízes aos 133, 186 e 320 dias após o plantio,

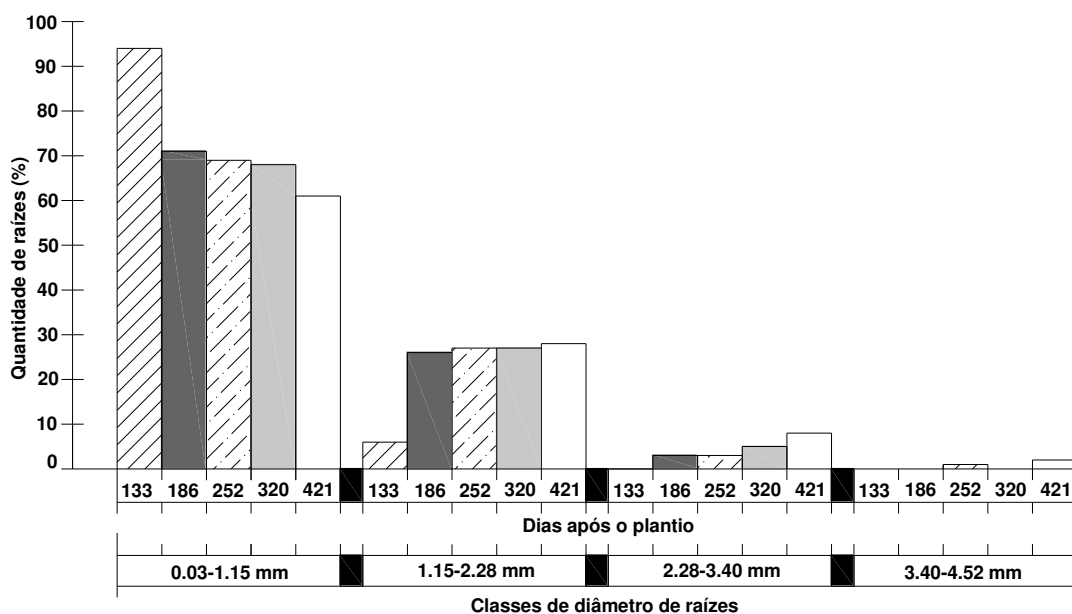


respectivamente). É importante notar que, no inverno, para plantas aos 320 dias após o plantio, a quantidade de raízes decresceu consideravelmente comparada ao outono (plantas aos 252 após o plantio). Essa característica sugere redução no reforço de ancoramento das plantas pelas raízes durante o período de dormência.

A Figura 36 mostra que o diâmetro das raízes no ponto de ruptura variou de 0,03 mm a 4,52 mm. Em todos períodos de crescimento, a maior parte das raízes concentrou-se nas menores classes de diâmetro, ou seja, entre 0,03-1,15 mm (60-94%) e entre 1,15-2,28 mm (6-28%). De acordo com a classificação de diâmetro de Böhm (1979), a maior parte dos sistemas radiciais foram representados por raízes finas. Essa é uma tendência comum e tem sido relatada por diversos autores (GRAY e SOTIR 1996; OPERSTEIN e FRYDMAN 2000; BISCHETTI et al. 2005; MATTIA et al., 2005).

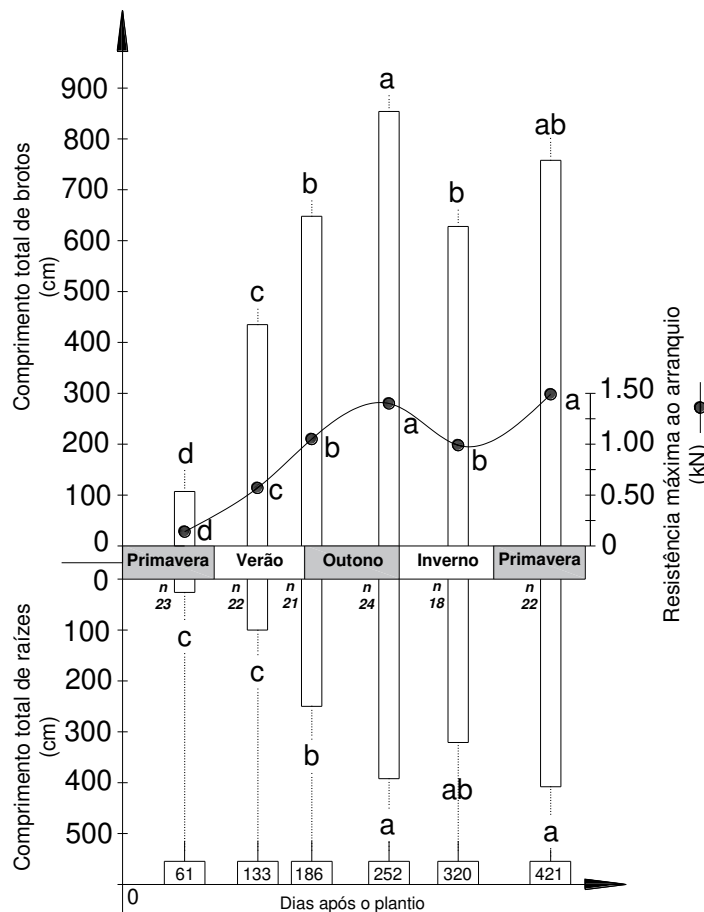
Como pode ser observado na Figura 36, aos 133 dias após o plantio, as plantas apresentaram 25% a mais de raízes com diâmetro entre 0,03-1,15 mm que os demais períodos de crescimento. Diversos autores têm indicado que a maior presença de raízes finas pode melhorar a resistência de um solo ao cisalhamento, uma vez que essas raízes têm sido consideradas mais resistentes em tensão do que as raízes grossas (GRAY e SOTIR 1996; OPERSTEIN e FRYDMAN 2000; BISCHETTI et al., 2005; MATTIA et al., 2005; GENET et al., 2005; ABDI, 2014).

Figura 36 – Distribuição diamétrica das raízes que permaneceram ligadas ao longo do comprimento das estacas enterradas após o arranquio vertical. Os dados incluem plantas com 133, 186, 252, 320 e 421 dias após o plantio



A resistência ao arranquio de *P. sellowianus* acompanhou o desenvolvimento da parte aérea e do sistema radicial (Figura 37). Essas três variáveis aumentaram linearmente até o final do outono (252 dias). No inverno, as três variáveis tiveram reduções consideráveis em seus valores, de modo que foram estatisticamente iguais aos encontrados no início do outono, quase 5 meses antes. Isso pode ter sido resultado do frio intenso, geadas frequentes e umidade do solo que é normalmente maior no inverno.

Figura 37 – Relação entre a resistência ao arranquio vertical e o comprimento total de brotos e raízes remanescentes de *Phyllanthus sellowianus*. Os dados incluem plantas de 61, 133, 186, 252, 320 e 421 dias após o plantio. Médias com as mesmas letras não são estatisticamente diferentes entre si de acordo com o teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro; *n* é o número de plantas avaliadas em cada período



As variações similares entre comprimento total de brotos, comprimento total de raízes e resistência ao arranquio indicam que essas variáveis apresentam forte correlação. Também sugerem que o comportamento não linear de crescimento das plantas, que aumenta e decresce de acordo com a estação, poderia ser melhor representado com o arranjo dos dados em classes. As diferenças significativas entre valores médios de crescimento e resistência ao arranquio foram confirmadas por meio do teste de Tukey. Esse teste mostrou que os valores médios

estatisticamente mais elevados de comprimento total de brotos (875 cm), comprimento total de raízes (405 cm) e resistência ao arranquio (1,5 kN) ocorreram entre o final do outono e a metade da primavera, ou seja, com plantas entre 252 e 421 dias. Durante esse período, a única exceção ocorreu no inverno, aos 320 dias, onde os valores de comprimento total de brotos e resistência ao arranquio foram estatisticamente menores. Quanto ao comprimento total de raízes, o mesmo não mostrou diferença significativa entre plantas com 252, 320 e 421 dias.

O incremento médio em resistência ao arranquio nas épocas mais favoráveis ao desenvolvimento das plantas (primavera, verão e início do outono) foi de aproximadamente 0,20 kN/mês, sendo amparado por incrementos médios no comprimento total de brotos e raízes de 118,4 e 57,1 cm/mês, respectivamente. No período de inverno, a resistência decresceu à taxa de 0,18 kN/mês, seguida de perdas no comprimento de brotos e raízes de 100 e 30 cm/mês, respectivamente. Os valores de resistência ao arranquio variaram de 0,028 a 2,170 kN/planta, e se equipararam aos relatados em trabalhos anteriores para diferentes espécies e formas de propagação (KARRENBERG et al., 2003; BURYLO et al., 2009; LIU et al., 2014).

#### 4.1.5 Relação entre desenvolvimento das plantas e resistência do sistema radicial

A Tabela 5 apresenta o coeficiente de determinação ( $r^2$ )<sup>15</sup> para as equações lineares. Esses coeficientes descrevem a relação entre variáveis da parte aérea e sistema radicial e a resistência ao arranquio vertical de 130 plantas de *P. sellowianus*. Tais relações foram estabelecidas para valores observados e valores observados médios organizados em classes de soma da área transversal de brotos (mm<sup>2</sup>), variável da parte aérea que apresentou a melhor correlação com a resistência das plantas ao arranquio.

No presente estudo, sete variáveis da parte aérea das plantas tiveram a relação com a resistência ao arranquio testada. Considerando somente valores observados, a soma de área transversal de brotos descreveu 55% das variações na resistência máxima ao arranquio. Por outro lado, os mesmos valores observados organizados em classes de soma de área transversal de brotos, com amplitudes de 100 mm<sup>2</sup>, descreveram 95% das variações na resistência máxima ao arranquio.

---

<sup>15</sup> O coeficiente de determinação ( $r^2$  ou  $R^2$ ), em estatística, é a medida que avalia a habilidade de um modelo em prever ou explicar um resultado na configuração de uma regressão linear. Especificamente, o  $r^2$  indica a proporção da variância na variável dependente (Y) que é predita ou explicada pela regressão linear e a variável preditora (X, também conhecida como variável independente) (ECYCLOPAEDIA BRITANNICA, 2017). Os valores de  $r^2$  variam sempre de 0% a 100%. O valor de 0% indica que o modelo não explica nenhuma variabilidade dos dados de resposta no entorno de sua média, enquanto o valor de 100% indica que o modelo explica toda a variabilidade dos dados de resposta no entorno de sua média (MINITAB, 2018).

Cinco variáveis biométricas das raízes tiveram a correlação com a resistência ao arranquio vertical testada. O diâmetro total de raízes descreveu, considerando valores observados e valores observados organizados em classes de soma de área transversal de brotos, 53% e 95% das variações na resistência máxima ao arranquio vertical, respectivamente.

Tabela 5 – Coeficientes de determinação ( $r^2$ ) de equações lineares obtidas da relação entre variáveis biométricas e resistência ao arranquio de plantas de *Phyllanthus sellowianus*. As análises foram realizadas para 107 plantas com 133 a 421 dias de desenvolvimento a campo

Variáveis Biométricas	Resistência Máxima ao Arranquio (kN)		
	$r^2$ (y=a+bx)	$r^2$ (y=a+bx)	
	Valores observados	Valores observados organizados em classes de SATB*	
Parte Aérea	Soma da área transversal de brotos (mm <sup>2</sup> )	0,55	0,95
	Diâmetro das estacas (cm)	0,29	0,91
	Comprimento total de brotos (cm)	0,41	0,90
	Diâmetro total de brotos (mm)	0,39	0,89
	Diâmetro médio de brotos (mm)	0,47	0,85
	Área transversal média de brotos (mm <sup>2</sup> )	0,47	0,85
	Comprimento médio de brotos (cm)	0,48	0,85
Sistema radicial	Diâmetro total de raízes (mm)	0,53	0,95
	Comprimento total de raízes (cm)	0,48	0,94
	Número total de raízes	0,31	0,88
	Diâmetro médio de raízes (mm)	0,35	0,84
	Soma da área transversal de raízes (mm <sup>2</sup> )	0,44	0,84

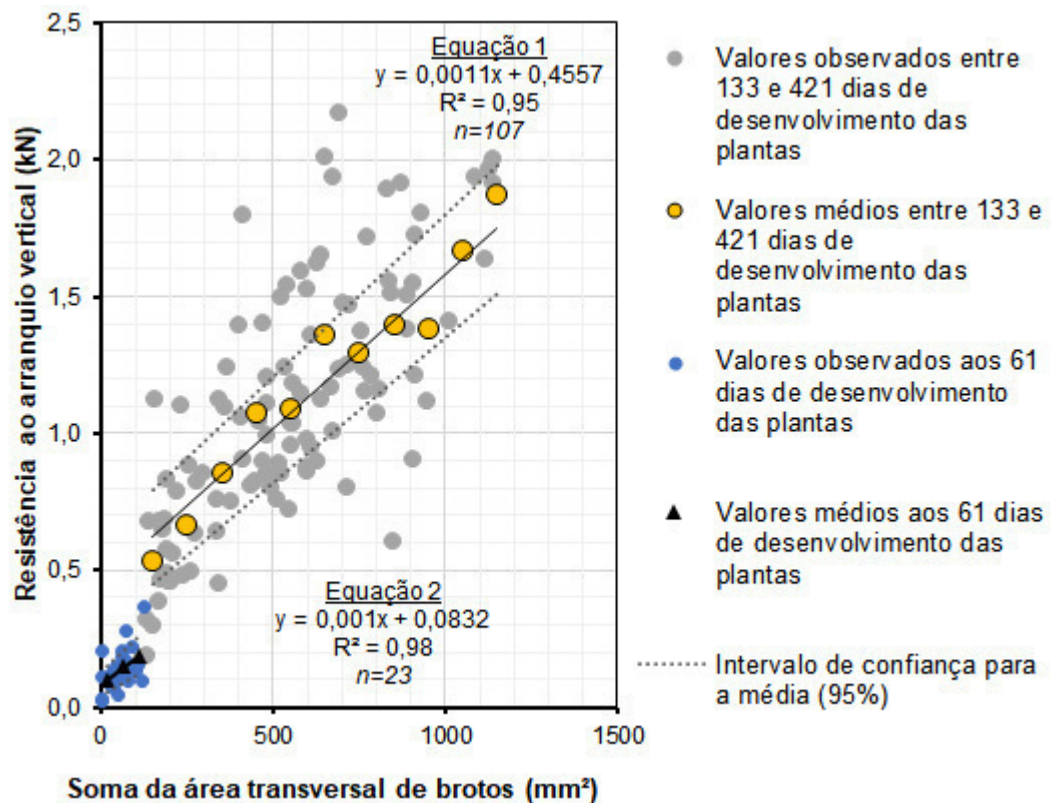
\* SATB – soma de área transversal de brotos (mm<sup>2</sup>)

Conforme observado na Tabela 5, a resistência máxima ao arranquio vertical teve 95% de suas variações explicadas pela soma da área transversal de brotos organizadas em classes, mas também apresentou boa relação com as demais variáveis da parte aérea e do sistema radicial organizados em classes, visto que tiveram valores de  $r^2$  variando de 0,84 a 0,95.

Das variáveis do sistema radicial, a obtenção de boas relações com a resistência máxima ao arranquio era esperada. Isso era especialmente esperado para as variáveis diâmetro total e comprimento total de raízes, a primeira por estar diretamente ligada à resistência à tração (NILAWEERA e NUTALAYA, 1999) e a segunda por estar relacionada com a resistência ao atrito (solo-raízes) (SCHWARZ et al., 2010a). Apesar das altas correlações, variáveis biométricas do sistema radicial foram obtidas a partir de um processo moroso e implicaram, obrigatoriamente, na destruição da planta.

Ao longo das épocas de avaliação, a resistência ao arranquio foi influenciada por diferentes fatores. Na Figura 38, onde a resistência máxima ao arranquio é apresentada como uma função de SATB, é possível observar duas tendências. Uma acontece com plantas aos 61 dias após o plantio e outra acontece dos 133 aos 421 dias após o plantio. Aos 61 dias, período em que as plantas apresentaram poucas e pequenas raízes, a resistência ao arranquio ocorreu principalmente devido à adesão entre solo e a superfície enterrada das estacas. Por outro lado, durante o período entre 133 e 421 dias, as raízes das estacas apresentaram diâmetros e comprimentos expressivos, de modo que a resistência ao arranquio vertical ocorreu também como resposta à resistência à tração das raízes. Essas duas tendências resultaram na Equação 2 ( $y=0,001 \cdot x+0,0832$ ,  $r^2=0,98$ ), que representa plantas 61 dias após o plantio, e a Equação 1 ( $y=0,0011 \cdot x+0,4557$ ,  $r^2=0,95$ ), que representa o crescimento entre 133 e 421 dias após o plantio.

Figura 38 – Relação entre resistência máxima ao arranquio vertical e a soma da área transversal de brotos de *Phyllanthus sellowianus*. As linhas tracejadas representam o intervalo de confiança com 95% de confiabilidade



Como visto na Figura 38, a organização de valores de resistência ao arranquio em classes de soma da área transversal de brotos revelou uma tendência linear com elevado valor de coeficiente de determinação (0,95). Esse resultado é corroborado por Sutili (2007) e por Hörbinger (2013), o primeiro estudando a resistência ao arranquio vertical de *P. sellowianus*

também em São João do Polêsine (mesma região do presente estudo) e o segundo estudando esta espécie em um Latossolo, em Frederico Westphalen, região norte do Rio Grande do Sul. Ambos os autores encontraram relações entre resistência ao arranquio e soma da área transversal de brotos com valores de  $r^2$  maiores que 0,7.

Esse tipo de relação pode ser bastante útil, por exemplo, para estimar a melhoria da resistência do solo proporcionada pelas plantas, ou mesmo servir como indicativo do potencial das plantas para melhorar a resistência ao cisalhamento do solo (KARRENBORG et al., 2003), visto que muitas vezes a distribuição das raízes, tanto lateralmente quanto em profundidade, não ocorre de forma simétrica, o que é comprovado pela variação dos valores observados.

Características da parte aérea, como comprimento e diâmetro de brotos, são de fácil mensuração e seu uso como variáveis explicativas pode reduzir, ou mesmo eliminar, testes que envolvem a destruição de plantas, bem como os procedimentos lentos e caros normalmente envolvidos na mensuração de variáveis biométricas das raízes.

Em linhas gerais, a análise das características biométricas das plantas revelou que existe interdependência entre crescimento e resistência do sistema radicial ao arranquio. Sendo a contribuição de uma planta para a resistência ao cisalhamento do solo dependente da resistência à tração de suas raízes, é plausível assumir que relações similares possam ocorrer entre o desenvolvimento da parte aérea e a contribuição para a resistência ao cisalhamento do solo.

#### **4.1.6 Conclusões**

Os parâmetros morfológicos da parte aérea das plantas se mostram úteis para prever a capacidade de ancoragem de estacas vivas devido à sua forte correlação com a resistência ao arranquio vertical do sistema radicial.

Os parâmetros morfológicos do sistema radicial, apesar de mostrarem boa correlação com a resistência das raízes, envolvem necessariamente a destruição das plantas e a alteração da estrutura do solo, o que não é viável para o caso de ensaios de cisalhamento direto *in situ*, pois neste caso as amostras devem ter a estrutura preservada.

A comprovação da correlação entre as características biométricas da parte aérea e a resistência do sistema radicial no presente estudo pode ser útil para assegurar a qualidade técnica de práticas de controle de erosão e estabilização de taludes, uma vez que serve como indicativo de contribuição das plantas para a resistência do solo.

A predição da capacidade de ancoragem das plantas por meio da medição de variáveis biométricas da parte aérea resulta em uma maneira simples, rápida, econômica e não destrutiva de obter informação sobre o reforço do solo pelas raízes.

A soma da área transversal de brotos ( $\text{mm}^2$ ) foi a variável da parte aérea que melhor explicou as variações na resistência ao arranquio das plantas de *P. sellowianus*. Sendo assim, essa variável será empregada para a seleção das plantas utilizadas nos ensaios de cisalhamento direto *in situ*.

## 4.2 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DIRETO *IN SITU*

### 4.2.1 Características físicas do solo

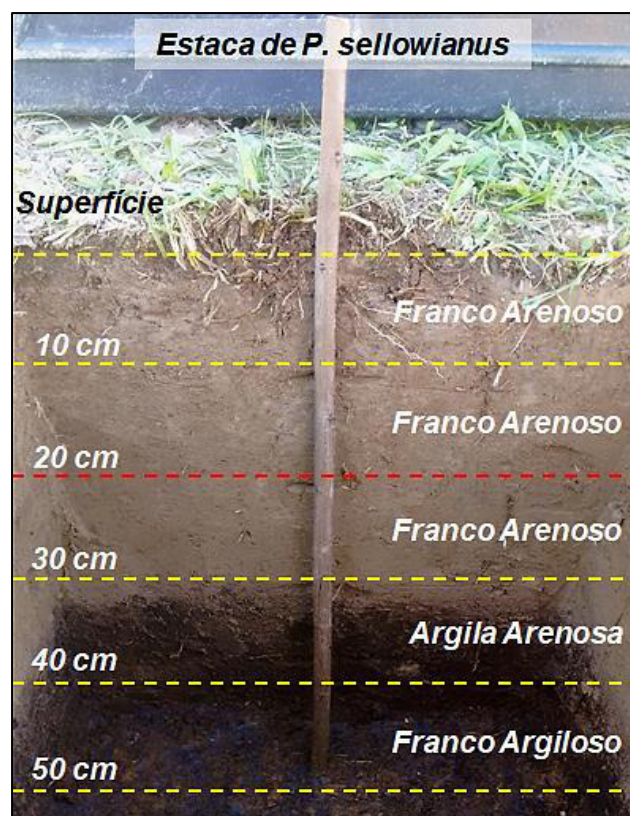
O solo na área do experimento apresentou textura franco arenosa entre 0 e 30 cm de profundidade. Para essa camada, os conteúdos médios de areia, silte e argila encontrados foram de 67,1, 23,2 e 9,6%, respectivamente (Tabela 6). O peso específico natural médio do solo foi de  $1,94 \text{ g/cm}^3$ , enquanto a densidade média do solo foi de  $1,65 \text{ g/cm}^3$  e a densidade média de partícula  $2,55 \text{ g/cm}^3$ . A porosidade total foi de  $0,35 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  e o índice de vazios 0,55, ambos considerados médios segundo a International Association for Engineering Geology (IAEG, 1979). O valor médio de grau de saturação, indicando a porcentagem de vazios do solo ocupada por água no momento da coleta das amostras, foi de 81,7%. A grande porcentagem de areia não permitiu a caracterização da camada quanto aos limites de Atterberg, indicando que a camada avaliada é constituída por solo não plástico (FIORI e CARMIGNANI, 2009).

Tabela 6 – Características físicas do solo na área de estudo. Aspectos de textura, estrutura e limites de Atterberg (liquidez, plasticidade e índice de plasticidade) ao longo do alcance em profundidade das estacas plantadas. Os valores destacados em negrito indicam a profundidade que foi trabalhada nos ensaios de cisalhamento direto *in situ*

Camada (cm)	Granulometria			Peso específico natural [ $\text{g/cm}^3$ ]	Densidade do Solo [ $\text{g/cm}^3$ ]	Densidade de Partícula [%]	Porosidade total [ $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ]	e	S [%]	LL [%]	LP [%]	IP
	Areia [%]	Silte [%]	Argila [%]									
0-10	67,6	24,8	7,6	1,91	1,61	2,54	0,37	0,58	81,8	.	.	.
<b>10-20</b>	<b>69,3</b>	<b>21,8</b>	<b>8,8</b>	<b>1,96</b>	<b>1,69</b>	<b>2,54</b>	<b>0,33</b>	<b>0,50</b>	<b>80,8</b>	.	.	.
20-30	64,3	23,0	12,6	1,94	1,65	2,57	0,36	0,56	82,4	.	.	.
30-40	47,6	17,0	35,4	1,93	1,59	2,57	0,38	0,61	89,3	41	22	19
40-50	44,4	17,2	38,4	1,83	1,48	2,57	0,46	0,87	98,2	48	28	20

Na Figura 39, observa-se que próximo à profundidade de 30 cm inicia-se uma transição na característica textural do solo, que fica evidente pela mudança de cor (mais escura). Essa mudança fica bem destacada entre 40 e 50 cm de profundidade, em que os teores médios de areia (46,0%) e silte (17,1%) reduziram e o teor médio de argila aumentou (36,9%) (Tabela 6). A densidade do solo, na camada de 40-50 cm foi de  $1,48 \text{ g/cm}^3$ , enquanto densidade de partícula aumentou para  $2,57 \text{ g/cm}^3$ . Aumentos também foram observados nos valores médios de porosidade total ( $0,42 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ) e de índice de vazios (0,74), os quais estão associados ao aumento do teor de argila. A porosidade total e índice de vazios verificados são considerados médios segundo a classificação da IAEG (1979). Os limites médios de liquidez e plasticidade foram de 44,5% e 25%, resultando em um índice médio de plasticidade de 19,5%, caracterizando um solo muito plástico (FIORI e CARMIGNANI, 2009).

Figura 39 – Características texturais do solo de 0 a 50 cm de profundidade. A linha vermelha pontilhada indica a profundidade que foi trabalhada nos ensaios de cisalhamento direto *in situ*



A camada de 10-20 cm apresentou teores de areia, silte e argila de 69,3%, 21,8% e 8,8%, respectivamente. É importante destacar que estas características representam a profundidade de 20 cm, que foi objeto dos ensaios de cisalhamento direto *in situ*. Ainda na mesma camada, a densidade natural do solo foi de  $1,96 \text{ g/cm}^3$ , a densidade do solo foi de  $1,69 \text{ g/cm}^3$  e a densidade



de partícula  $2,54 \text{ g/cm}^3$ . A porosidade total ( $0,33 \text{ g/cm}^3$ ) e o índice de vazios (0,50) são considerados baixos (IAEG, 1979). No dia de coleta das amostras, o grau de saturação foi de 80,8%. O solo a 20 cm de profundidade foi classificado como não plástico.

As características granulométricas indicadas na Tabela 6 podem ser observadas na Figura 39, onde são mostradas as classificações texturais de cada profundidade avaliada. Na área do experimento, até 30 cm de profundidade, o solo é classificado como franco arenoso. A partir de 30 a 35 cm de profundidade o solo apresenta maior teor de argila, passando a ser classificado como argila arenosa (30-40 cm) ou franco argiloso (40-50 cm).

#### 4.2.2 Características químicas do solo

Quanto às características químicas (Tabela 7), o solo tem *P* médio, *K* alto, %*M.O.* muito baixa, *Al* baixo e *pH* muito baixo (MANUAL DE CALAGEM E ADUBAÇÃO RS/SC, 2016). Se considerados os níveis de alumínio e de *pH*, as condições se mostraram ainda mais limitantes ao desenvolvimento das plantas que as observadas na área utilizada para os ensaios de arranquio (seção 4.1.1, página 91).

Tabela 7 – Propriedades químicas do solo na área destinada aos ensaios de cisalhamento direto *in situ*

Profundidade (cm)	<i>P</i> (mg/dm <sup>3</sup> )	<i>K</i> (mg/dm <sup>3</sup> )	% <i>M.O.</i>	<i>Al</i> (cmolc/dm <sup>3</sup> )	<i>pH</i>
0 - 10	21,3	112,0	1,3	0,5	4,4
10 - 20	14,1	72,0	0,5	0,4	4,9
20 - 30	2,0	132,0	1,1	8,9	4,4
30 - 50	1,2	108,0	0,7	11,0	4,4
Média	9,7	106,0	0,9	5,2	4,5

P, fósforo disponível; K, potássio; M.O.: matéria orgânica; Al, alumínio

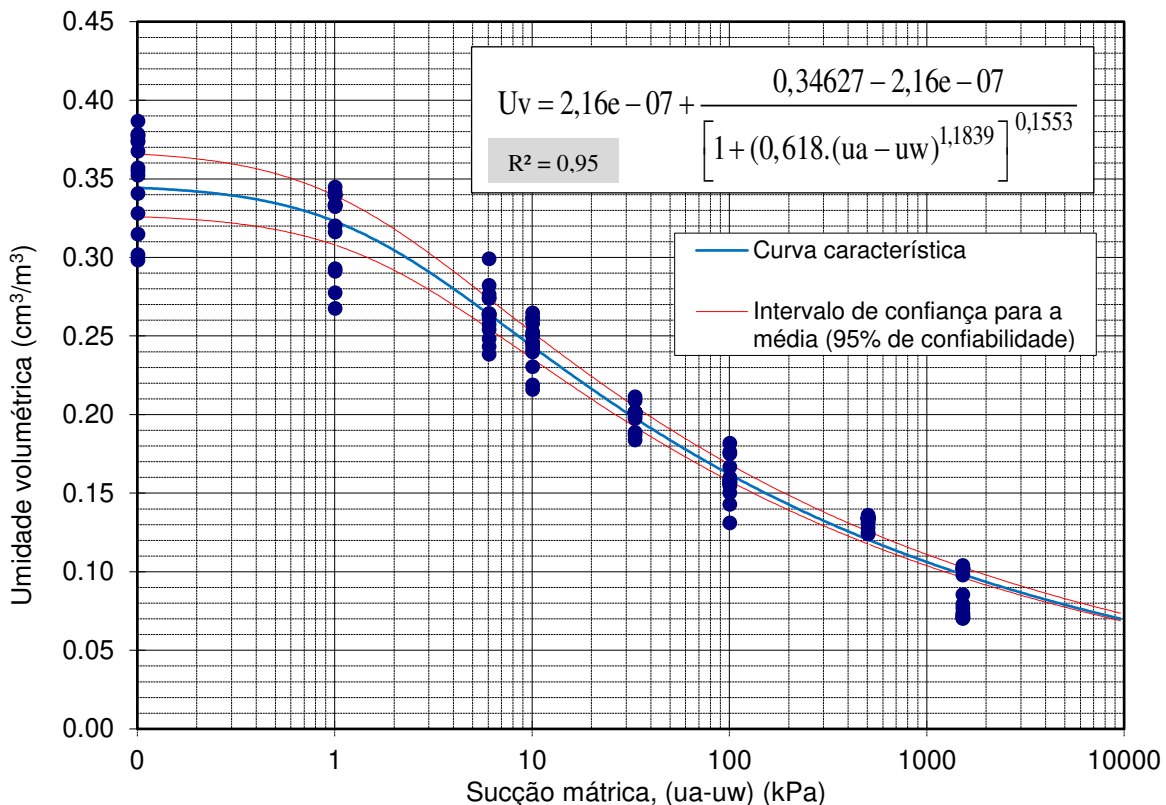
O plantio sob condições químicas desfavoráveis foi opcional, pois partiu-se do pressuposto de que, se as plantas da espécie testada, devido à sua rusticidade, podem manter alta taxa de sobrevivência e apresentar desenvolvimento considerável. É bastante provável que em solos com acidez corrigida e adubação adequada, as plantas devam ter resultados ainda mais expressivos de desenvolvimento e por consequência maiores efeitos sobre o reforço do solo. Portanto, o plantio sob as condições apresentadas deve ser observado como um fator que trabalha a favor da segurança.

### 4.2.3 Curva característica de retenção de água no solo

Na Figura 40 é apresentada a curva característica de retenção de umidade no solo para a profundidade de 20 cm. A elaboração da curva teve por intuito a obtenção de valores de sucção mátrica na mesma profundidade da superfície de ruptura dos corpos de prova utilizados nos ensaios de cisalhamento direto *in situ*.

Como esperado, a curva de retenção revelou que o aumento da umidade volumétrica diminui o efeito da sucção matricial sobre a resistência do solo. Isso deixa claro que, além da imprescindível homogeneização da umidade, o umedecimento dos corpos de prova antes dos ensaios de cisalhamento direto *in situ* teve por objetivo reduzir a sucção matricial de modo que o efeito das plantas pudesse ser avaliado próximo da condição mais desfavorável à estabilidade de um talude.

Figura 40 – Curva característica de retenção de umidade para o solo do experimento para a profundidade de 20 cm



A título de exemplo, ao plotar na Figura 40 os valores de umidade volumétrica do solo de 0,15, 0,20, 0,25, 0,30 e 0,35 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>, que correspondem respectivamente aos graus de saturação de 43, 58, 72, 86 e 100%, obtem-se, na mesma ordem, valores de sucção matricial de

150, 30,3, 8,5, 2,2 e 0 kPa. Para essas observações, nota-se que, entre as umidades volumétricas de 0,20 e 0,35 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>, os efeitos da sucção matricial são relativamente pequenos (de 0 a 12,3 kPa) se comparados aos efeitos proporcionados a partir da umidade volumétrica de 0,15 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>(na ordem de 150 kPa).

Para Norris et al. (2008), dependendo do tipo de solo e vegetação, a contribuição das plantas para a resistência ao cisalhamento do solo pode chegar a 25 kPa. Comparativamente, considerando os efeitos da perda de umidade do solo mencionados anteriormente, é possível inferir que a sucção mátrica, que tem influência direta sobre a coesão aparente do solo, pode superar em termos relativos o reforço do solo proporcionado pelas plantas.

Em linhas gerais, a taxa de contribuição das plantas para a resistência ao cisalhamento de um solo aumenta conforme aumenta a sua umidade (COPPIN e RICHARDS, 2007), visto que o solo perde gradativamente o efeito da sucção matricial, enquanto as raízes mantêm os efeitos mecânicos intrínsecos à sua resistência à tração.

As informações destacadas resumem a importância de que a avaliação do efeito de plantas sobre a resistência ao cisalhamento de um solo seja conduzida em condições próximas à saturação (pior condição de resistência ao cisalhamento).

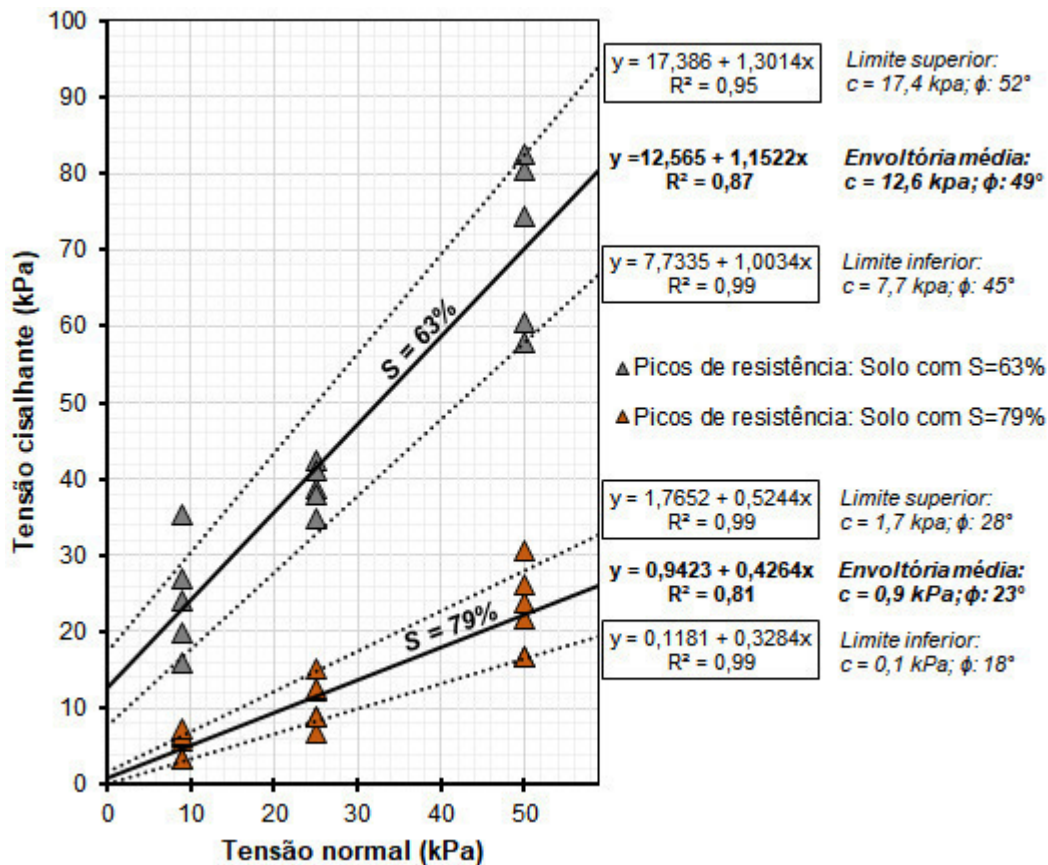
#### **4.2.4 Resistência ao cisalhamento direto do solo em laboratório**

Na Figura 41 são observadas as características de resistência ao cisalhamento direto do solo, obtidas em laboratório para amostra de 5×5×2 cm, para a profundidade de 20 cm e duas condições distintas de grau de saturação, uma com S=63% (antes do umedecimento do solo) e outra com S=79% (após o umedecimento do solo em campo). A distribuição dos picos de resistência nas duas condições de umidade indica que o objetivo de tornar mais homogêneo o comportamento do solo foi atendido. Observa-se ainda que os picos de resistência da envoltória para S=79% estão mais próximos entre si, ou seja, apresentam menor variância que os picos de resistência da envoltória do solo com S=63%, claramente mais dispersos nas tensões normais de 9 e 50 kPa.

As envoltórias ajustadas (médias) para o solo com graus de saturação de 63% e 79%, apresentaram diferenças consideráveis nos valores de coesão e ângulo de atrito interno. O valor da coesão para o solo com S=63% foi de 12,6 kPa, enquanto para o solo com S=79% o valor foi de 0,9 kPa, uma diferença de 11,7 kPa. Quanto ao ângulo de atrito interno, para o solo com S=63% foi obtido o valor de 49° enquanto para S=79% foi obtido o valor de 23°, uma diferença

de 26°. Em linhas gerais, as diferenças encontradas para os dois graus de saturação exemplificam os efeitos da sucção matricial na resistência ao cisalhamento do solo.

Figura 41 – Envolvórias de resistência do solo obtidas em ensaios de cisalhamento direto em laboratório para a profundidade de 20 cm, para solo com graus de saturação de S=63% e S=79%. O grau de saturação de 63% foi obtido antes do umedecimento do solo, enquanto o grau de saturação de 79% foi obtido após o umedimento do solo

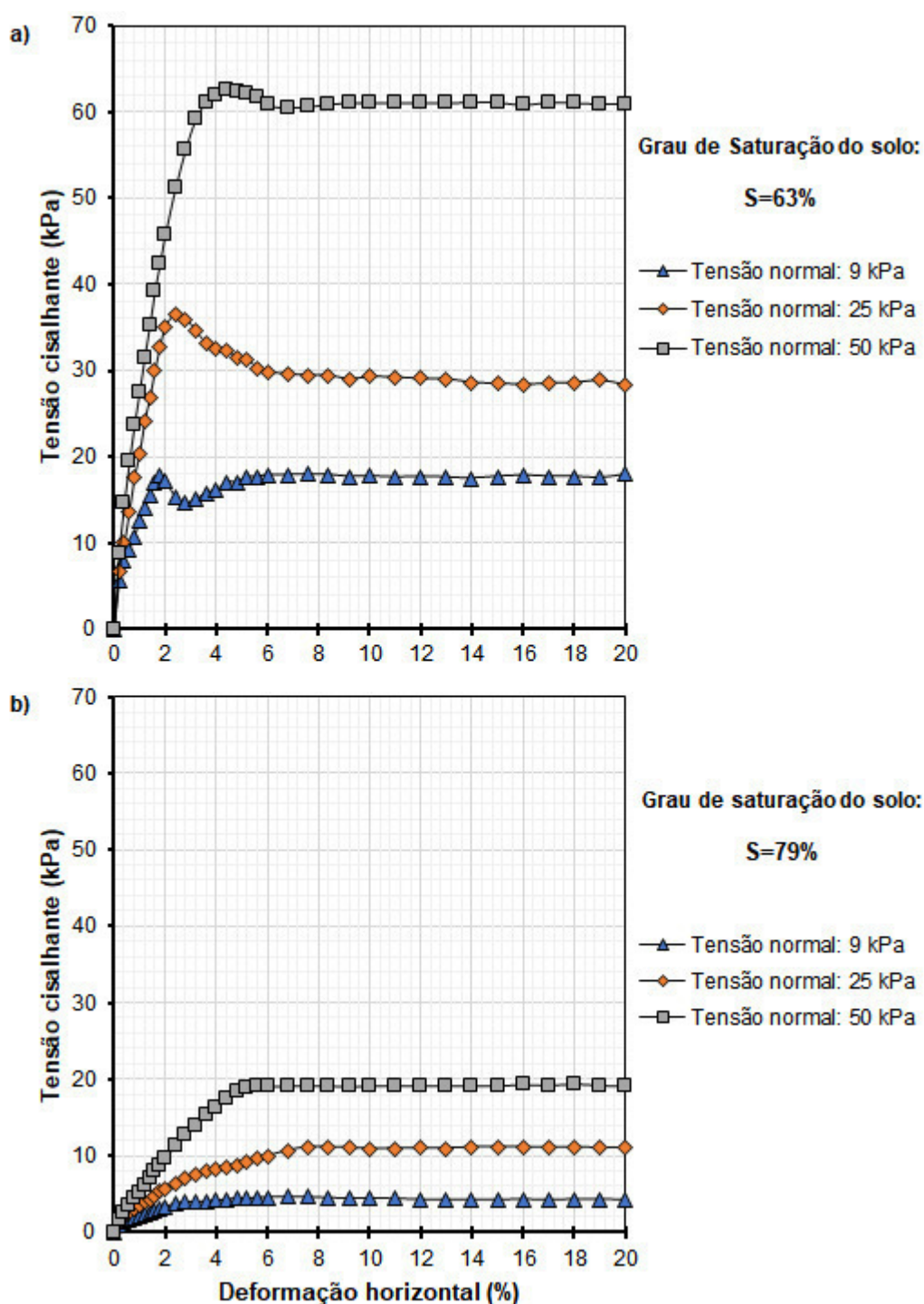


Na Figura 42 são apresentadas relações entre tensões cisalhantes e a deformação horizontal dos corpos de prova.

No solo com menor conteúdo de água, com grau de saturação de 63%, as curvas médias para as tensões normais de 9, 25 e 50 kPa apresentaram picos de resistência, acompanhados por decréscimo e estabilização das tensões cisalhantes. Com essas características, as curvas de tensão x deformação mostram um comportamento análogo a um solo denso, que tem como um dos mecanismos de resistência o imbricamento<sup>16</sup> (interlocking) (GERSCOVICH, 2016).

<sup>16</sup> Define-se imbricamento o trabalho adicional necessário para movimentar uma partícula de solo ascendentemente, quando se provoca um deslizamento horizontal nas partículas (GERSCOVICH, 2016).

Figura 42 – Relação entre tensão cisalhante e deformação horizontal obtida em laboratório, para a profundidade de 20 cm, para solo com grau de saturação de  $S=63\%$  (a) e  $S=79\%$  (b)



Por outro lado, o solo com maior conteúdo de água, com grau de saturação de  $79\%$ , não mostrou picos de resistência bem definidos, mas um acréscimo contínuo nas tensões cisalhantes de acordo com o aumento da deformação horizontal, chegando a uma resistência máxima à tensão de cisalhamento e estabilizando os valores até o final do ensaio. Esse tipo de

comportamento se mostra análogo ao de um solo fofo e/ou desagregado (GERSCOVICH, 2016).

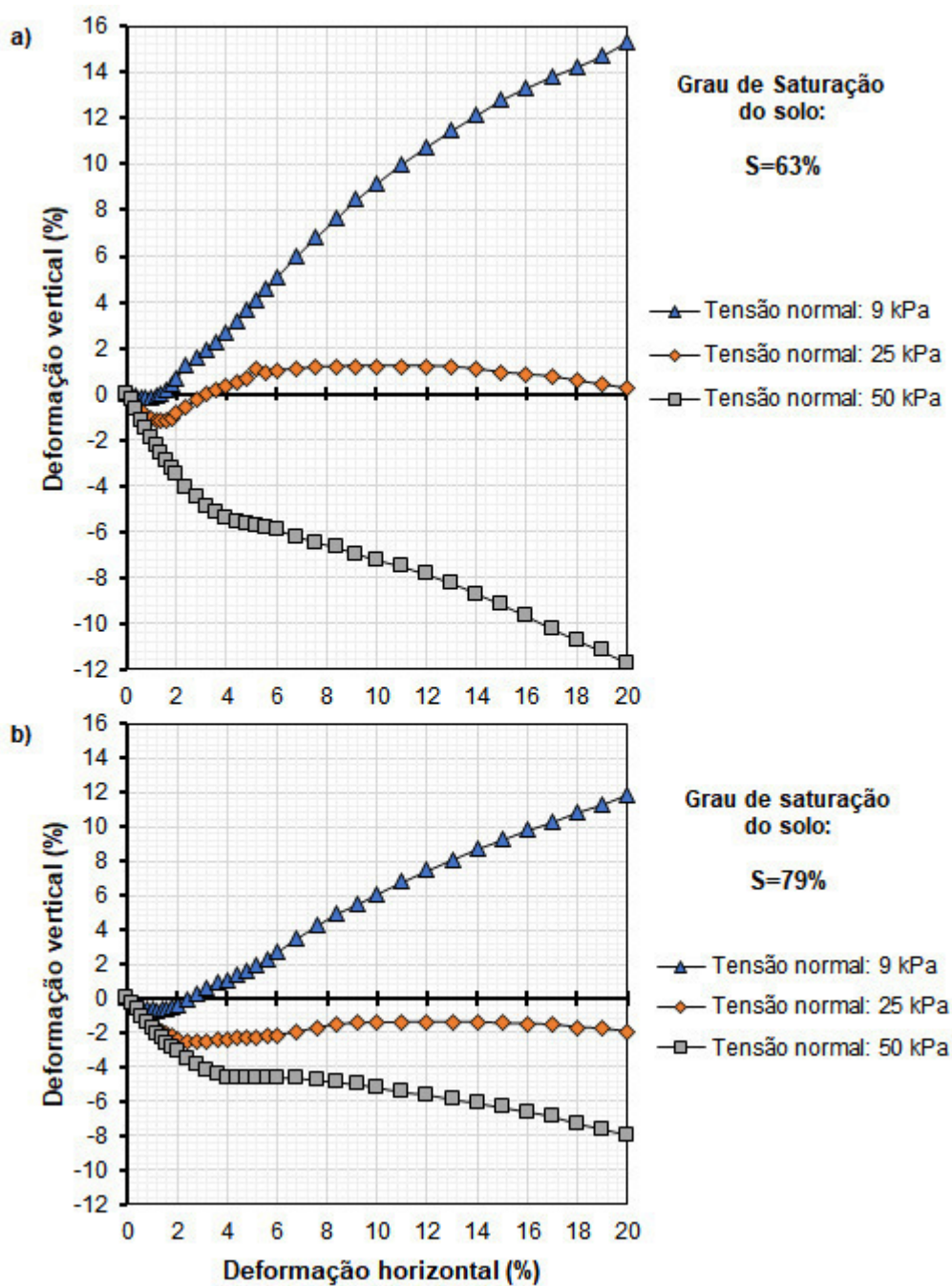
Quanto às tensões cisalhantes médias, devido aos diferentes graus de saturação, os solos apresentaram valores consideravelmente distintos. O solo com  $S=63\%$  teve tensões cisalhantes de pico de 19,9, 36,5 e 62,6 kPa para as tensões normais de 9, 25 e 50 kPa, respectivamente. O solo com  $S=79\%$  mostrou tensões cisalhantes máximas (não de pico) de 4,6, 11,2 e 19,4 kPa para tensões normais de 9, 25 e 50 kPa, respectivamente. Esses valores mostram que, para o mesmo solo, as diferenças relativas proporcionadas entre tensões cisalhantes por uma diferença de grau de saturação de 16% foram de 76,8%, 69,3% e 69% para as tensões normais de 9, 25 e 50 kPa, respectivamente.

Usando as informações da Figura 42 é possível comparar o efeito da diferença de umidade do solo na tensão cisalhante para uma determinada deformação horizontal. Toma-se como exemplo a tensão normal de 9 kPa, uma vez que esta é semelhante a uma das tensões aplicadas nos ensaios de cisalhamento direto *in situ*. As tensões cisalhantes são comparadas a 2% e 10% de deformação horizontal do corpo de prova. Aproximadamente aos 2% de deformação, o solo com  $S=63\%$  teve o pico de resistência, enquanto no solo com  $S=79\%$  a resistência ainda está aumentando gradativamente, onde a diferença entre valores é de aproximadamente 80,9%. Com 10% de deformação horizontal, em ambos os graus de saturação, a resistência ao cisalhamento mostra valores estabilizados. Contudo as diferenças, pelo efeito da umidade, são da ordem de 75,7%.

Quanto à deformação vertical do solo (compressão ou expansão), pequenas diferenças foram observadas no comportamento dos corpos de prova com diferentes graus de saturação (Figura 43). Observando as Figuras 43a e 43b, verifica-se que o solo com grau de saturação de 63%, comparado ao solo com  $S=79\%$ , sofre expansão ligeiramente maior nas tensões normais de 9 e 25 kPa e maior compressão na tensão normal de 50 kPa.

No solo com grau de saturação de 79%, é importante observar o comportamento da tensão normal de 9 kPa, uma vez que esta se aproxima de 8,7 kPa, uma das tensões normais utilizadas nos ensaios de cisalhamento direto *in situ*. Sob a tensão normal de 9 kPa, o solo inicialmente sofre uma pequena compressão (cerca de 1%), que ocorre até aproximadamente 1,5% de deformação horizontal, ponto em que sofre uma inflexão e inicia uma expansão contínua até o final do ensaio.

Figura 43 – Relação entre deformação vertical e horizontal do solo obtida em laboratório em corpos de prova de 5×5×2 cm, para a profundidade de 20 cm, para solo com graus de saturação de S=63% (a) e S=79% (b)



O solo com grau de saturação de 79% representa condições semelhantes às condições de umidade dos corpos de prova utilizados no cisalhamento direto *in situ*. Contudo, tanto os ensaios de laboratório quanto os ensaios *in situ* possuem algumas particularidades que merecem destaque, como, por exemplo, as diferenças de dimensão de corpos de prova (laboratório: 5×5×2 cm; *in situ*: 40×40×20 cm), de área da superfície de cisalhamento (laboratório: 25 cm<sup>2</sup>; *in situ*: 1600 cm<sup>2</sup>), de tensões normais aplicadas (laboratório: 9, 25 e 50 kPa; *in situ*: 3,5, 8,7,

14,0 e 19,4 kPa) e de constância na aplicação das tensões cisalhantes (laboratório: aplicação com auxílio de motor elétrico e engrenagens; *in situ*: manual, com auxílio de macaco hidráulico). Todas essas diferenças associadas podem resultar na obtenção de informações ligeiramente distintas.

#### 4.2.5 Seleção de plantas para os ensaios de cisalhamento direto *in situ*

As estacas de *P. sellowianus* iniciaram a emissão de brotos duas semanas após o plantio. Após um ano de desenvolvimento a campo, das 120 estacas plantadas, apenas 4 não sobreviveram, o que representa uma taxa de sobrevivência de 96,7%. Esse valor é corroborado por resultados encontrados por Sutili (2007), que trabalhou com *P. sellowianus* na mesma região do presente estudo, e por Hörbinger (2013), que trabalhou com a espécie na região norte do estado do Rio Grande do Sul, em um Latossolo Vermelho.

Após um ano de desenvolvimento, a soma de comprimento de brotos e a soma de área transversal de brotos, variáveis utilizadas como indicadores do crescimento das plantas, apresentaram valores médios de 192 cm e 187 mm<sup>2</sup>, respectivamente. Esses valores se mostraram relativamente menores que os encontrados na seção 4.1 (página 91), onde soma de comprimento de brotos foi de 600 cm e a soma de área transversal de brotos foi de 577 mm<sup>2</sup>. As diferenças entre valores, que são superiores a 100%, tanto para soma de comprimento de brotos quanto para soma de área transversal de brotos, estão possivelmente relacionadas com as distintas características dos solos em que os plantios foram realizados e também com as diferentes procedências das estacas utilizadas nos plantios.

Conforme verificado na seção 4.1, existe uma relação direta entre crescimento da parte aérea e resistência à tração do sistema radicial. Esta última variável, como já mencionado, tem sido destacada na literatura como de grande importância para a resistência ao cisalhamento do solo (COPPIN e RICHARDS, 2007; STOKES et al., 2008; WU, 2013).

Nos testes realizados na seção 4.1, a variável biométrica que apresentou melhor correlação com a resistência do sistema radicial foi a soma da área transversal de brotos. Essa variável, quando organizada em classes, descreveu 95% das variações na resistência ao arranquio das plantas de *P. sellowianus*. Diante desse resultado, a soma da área transversal de brotos se mostrou a variável mais promissora para ser utilizada como base na escolha de plantas representativas do plantio para a condução dos ensaios de cisalhamento direto *in situ*.

Os valores de soma de área transversal de brotos foram organizados em 7 classes distintas (Tabela 8). No conjunto geral de dados, os valores mínimo e máximo encontrados para



esta variável foram 12,88 e 360,88 mm<sup>2</sup>, respectivamente. A amplitude de cada classe foi de 49,71 mm<sup>2</sup>.

De acordo com os testes de Kolmogorov-Smirnov, Anderson-Darling e Shapiro-Wilk (APÊNDICE A, página 157), conduzidos a 5% de probabilidade de erro, os dados de soma de área transversal de brotos apresentam normalidade, indicando que são representados por uma distribuição de frequência gaussiana. Essa distribuição é caracterizada por uma curva em formato de sino, em que a maioria das observações ocorre próximo à média, que é representada pelo centro da curva (Figura 44b).

Conforme pode ser observado na Tabela 8, as classes 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7 correspondem a 1,72% (n=2), 11,21% (n=13), 25,86% (n=30), 34,48% (n=40), 16,38% (n=19), 6,90% (n=8) e 3,45% (n=4) do número de plantas do plantio, respectivamente. Nesta distribuição, a classe 4 representa a média, enquanto as classes 1 e 7 são as extremidades da distribuição de frequências.

Tabela 8 – Distribuição de frequência das plantas de *Phyllanthus sellowianus* organizadas em classes de soma de área transversal de brotos (mm<sup>2</sup>)

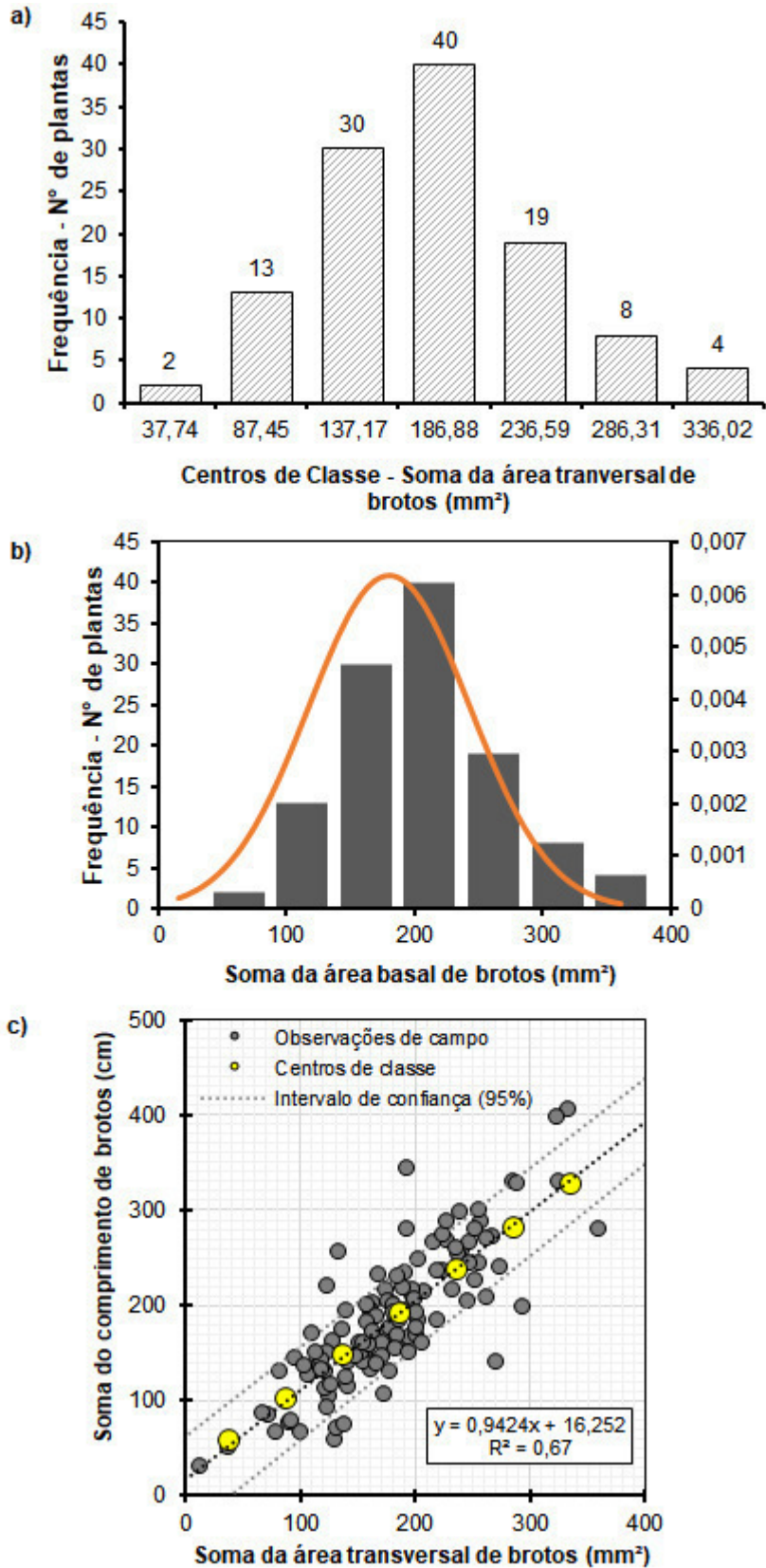
CLASSE n <sup>o</sup>	CLASSES soma da área transversal de brotos [mm <sup>2</sup> ]	Centros de Classe [mm <sup>2</sup> ]	Freq. Abs.	Freq. Rel.	Freq. Perc.	Freq. Acum.
1	12,88 † 62,60	37,74	2	0,02	1,72	1,72
2	62,53 † 112,31	87,45	13	0,11	11,21	12,93
3	112,31 † 162,02	137,17	30	0,26	25,86	38,79
4	162,02 † 211,74	186,88	40	0,34	34,48	73,28
5	211,74 † 261,45	236,59	19	0,16	16,38	89,66
6	261,45 † 311,17	286,31	8	0,07	6,90	96,55
7	311,17 † 360,88	336,02	4	0,03	3,45	100
TOTAL			116		100	

Onde: Freq. Abs. = Frequência Absoluta, também representada por n; Freq. Rel. = Frequência Relativa; Freq. Perc. = Frequência Percentual; Freq. Acum. = Frequência Acumulada

Na Figura 44a, as características da distribuição de frequências podem ser observadas em termos absolutos.

Para atender à necessidade de amostrar o total de 20 plantas para os ensaios de cisalhamento direto *in situ*, foi considerada a distribuição de frequências da soma de área transversal de brotos. Somente as classes que apresentaram número de plantas suficientes foram amostradas.

Figura 44 – Distribuição de frequência e crescimento das plantas de *Phyllanthus sellowianus*. a) distribuição de frequência de acordo com o centro de classe; b) distribuição normal da soma de área transversal de brotos; c) crescimento da parte aérea das plantas e indicação dos sete centros de classe.



No processo de amostragem das plantas, partiu-se do pressuposto de que a relação de interdependência entre desenvolvimento da parte aérea e resistência das raízes poderia também ser assumida para a resistência ao cisalhamento do solo com raízes, dada a possibilidade de uma planta com maior crescimento da parte aérea ter maior número de raízes cruzando a superfície de ruptura estipulada (a 20 cm de profundidade). Nesse processo observou-se que as classes 2, 3, 4, 5 e 6 representavam 94,8% do total de plantas ( $n = 110$ ), enquanto as classes 1 e 7 representavam apenas 5,2% do total de plantas ( $n = 6$ ). Além disso, constatou-se que a classe 1 não teve o número mínimo de 4 plantas (uma para cada tensão normal aplicada) necessário para a condução dos ensaios de cisalhamento direto *in situ*. Sendo assim, optou-se pela amostragem das classes centrais 2, 3, 4, 5 e 6, enquanto as classes 1 e 7 foram desconsideradas.

Na Figura 44c, em que é apresentada a relação entre soma do comprimento de brotos e soma da área transversal de brotos, é possível observar a posição dos 7 centros de classe. A observação do posicionamento dos centros de classe ajuda a justificar a amostragem das cinco classes centrais na condução dos ensaios de cisalhamento direto *in situ*.

#### **4.2.6 Características físicas dos corpos de prova e das superfícies de cisalhamento**

Na Tabela 9 podem ser observadas as características físicas da superfície de cisalhamento dos corpos de prova com e sem plantas de *P. sellowianus*.

Em linhas gerais, o objetivo de homogeneizar a umidade dos corpos de prova com e sem plantas foi alcançado. Os valores de umidade gravimétrica, umidade volumétrica e grau de saturação foram praticamente os mesmos para o solo com e sem plantas. Comportamento semelhante foi observado para as variáveis densidade do solo, peso específico natural do solo, porosidade total e índice de vazios. De modo geral, todos os parâmetros físicos avaliados tiveram coeficientes de variação (C.V.) com valores abaixo de 8,75%, o que corresponde a uma baixa dispersão de dados, conforme referido por GOMES (1985).

A grande semelhança entre os aspectos físicos do solo com e sem plantas pode estar relacionada ao pequeno período decorrido desde o plantio até o momento da avaliação. Somente quando as plantas tiverem tempo suficiente para desenvolver maior quantidade de raízes para além da profundidade de 20 cm (superfície de cisalhamento) é que diferenças nas características físicas do solo serão evidenciadas.

Tabela 9 – Características físicas do solo na superfície de ruptura dos corpos de prova, após os ensaios de cisalhamento direto *in situ*

Estatística descritiva	Umidade gravimétrica (g/g) [Ug]	Umidade volumétrica (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> ) [Uv]	Densidade do solo (g/cm <sup>3</sup> ) [Ds]	Peso específico natural do solo (g/cm <sup>3</sup> ) [Dn]	Porosidade total (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> ) [Pt]	Índice de vazios [e]	Grau de Saturação (%) [S]
<b>SOLO SEM RAÍZES (n = 120)</b>							
Mínimo	0,15	0,26	1,55	1,89	0,30	0,42	74,26
<b>Média</b>	<b>0,177</b>	<b>0,294</b>	<b>1,658</b>	<b>1,952</b>	<b>0,347</b>	<b>0,533</b>	<b>84,655</b>
Máximo	0,22	0,34	1,79	2,06	0,39	0,63	96,44
Desvio padrão	0,01	0,02	0,05	0,04	0,02	0,04	4,60
<b>C.V.(%)</b>	<b>7,34</b>	<b>5,56</b>	<b>2,74</b>	<b>2,05</b>	<b>5,15</b>	<b>7,82</b>	<b>5,44</b>
<b>SOLO COM RAÍZES (n = 120)</b>							
Mínimo	0,16	0,26	1,53	1,82	0,29	0,41	72,25
<b>Média</b>	<b>0,180</b>	<b>0,297</b>	<b>1,648</b>	<b>1,945</b>	<b>0,351</b>	<b>0,543</b>	<b>84,674</b>
Máximo	0,23	0,36	1,80	2,10	0,40	0,66	106,15
Desvio padrão	0,01	0,02	0,05	0,05	0,02	0,05	5,69
<b>C.V.(%)</b>	<b>7,42</b>	<b>5,65</b>	<b>3,11</b>	<b>2,46</b>	<b>5,74</b>	<b>8,75</b>	<b>6,72</b>
<b>ANÁLISE GERAL (n = 240)</b>							
Mínimo	0,15	0,26	1,53	1,82	0,29	0,41	72,25
<b>Média</b>	<b>0,179</b>	<b>0,295</b>	<b>1,652</b>	<b>1,948</b>	<b>0,349</b>	<b>0,539</b>	<b>84,666</b>
Máximo	0,23	0,36	1,80	2,10	0,40	0,66	106,15
Desvio padrão	0,01	0,02	0,05	0,04	0,02	0,05	5,24
<b>C.V.(%)</b>	<b>7,41</b>	<b>5,62</b>	<b>2,96</b>	<b>2,29</b>	<b>5,51</b>	<b>8,40</b>	<b>6,19</b>

\*n é número de amostrada coletadas e analisadas; \*\*C.V.(%) é o coeficiente de variação dos dados

O processo de umedecimento do solo permitiu alcançar a umidade volumétrica média de 0,295 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup> (C.V.=5,62% para n=240) e o grau de saturação médio de 84,7% (C.V.=6,19%) (Tabela 9). Quanto aos demais parâmetros físicos médios que caracterizam a superfície de ruptura, a densidade no solo foi de 1,65 g/cm<sup>3</sup> (C.V.=2,96%; n=240), a densidade natural foi 1,95 g/cm<sup>3</sup> (C.V.=2,29%; n=240), a porosidade total de (C.V.=2,29%; n=240) e o índice de vazios de 0,54 (C.V.=8,40%; n=240). Todos esses parâmetros físicos apresentaram coeficientes de variação abaixo 8,4%, indicando baixa dispersão e, portanto, homogeneidade do solo trabalhado.

Uma vez que as principais características físicas da superfície de cisalhamento mostraram ser semelhantes tanto para o solo com raízes quanto para o solo sem raízes, assume-se que eventuais diferenças na resistência ao cisalhamento sejam provocadas pela presença das estacas e suas raízes.

Na Tabela 10 podem ser observadas as características físicas dos corpos de prova (40×40×20 cm) obtidas imediatamente após a realização de cada ensaio de cisalhamento direto *in situ*.

Observa-se que os corpos de prova sem plantas apresentaram em média 65,3 kg (C.V.=7,12%), enquanto os corpos de prova com plantas tiveram em média 61,9 kg (C.V.=10,19%). Portanto, o solo sem raízes apresentou em média 3,4 kg a mais, o que é explicado pela ausência de raízes de *P. sellowianus*. Presumivelmente as raízes dessa espécie têm lenho de baixa densidade<sup>17</sup> e ocupam, especialmente nas camadas mais superficiais, grande volume de solo. Ao que tudo indica, essa característica foi suficiente para diminuir o peso médio dos corpos de prova com plantas em cerca de 3,4 kg.

As diferenças de peso de cada corpo de prova sempre foram computadas nas tensões normais dos ensaios de cisalhamento direto *in situ*, principalmente na elaboração das envoltórias de resistência.

Como uma resposta direta dos pesos obtidos, os corpos de prova com e sem plantas apresentaram diferenças de peso específico natural. O solo sem raízes apresentou um valor médio de 20,5 kN/m<sup>3</sup> (C.V.=7,62%), enquanto o do solo com raízes foi de 19,3 kN/m<sup>3</sup> (C.V.=10,19%), representando uma diferença da ordem de 5,8%.

Tabela 10 – Características físicas dos corpos de prova de 40×40×20 cm, com e sem plantas de *Phyllanthus sellowianus*

Estatística descritiva	SOLO SEM RAÍZES (n = 20)		SOLO COM RAÍZES (n = 20)				ANÁLISE GERAL (n=40)	
	Peso dos corpos de prova [kg]	Peso específico natural [kN/m <sup>3</sup> ]	Peso dos corpos de prova [kg]	Peso específico natural [kN/m <sup>3</sup> ]	Taxa de raízes por área de solo (Ar/A) [%]	Densidade de raízes no solo [g/m <sup>3</sup> ]	Peso dos corpos de prova [kg]	Peso específico natural [kN/m <sup>3</sup> ]
Mínimo	54,5	17,0	52,2	16,3	0,058	134,0	52,2	16,3
<b>Média</b>	<b>65,3</b>	<b>20,5</b>	<b>61,9</b>	<b>19,3</b>	<b>0,190</b>	<b>445,8</b>	<b>63,6</b>	<b>19,9</b>
Máximo	71,7	22,7	72,7	22,7	0,384	1392,8	72,7	22,7
Desvio Padrão	4,65	1,56	6,31	1,97	0,091	308,3	5,75	1,86
<b>C.V. (%)</b>	<b>7,12</b>	<b>7,62</b>	<b>10,19</b>	<b>10,19</b>	<b>47,76</b>	<b>69,1</b>	<b>9,05</b>	<b>9,32</b>

Como já destacado, a diferença mais evidente entre os corpos de prova testados foi a presença ou ausência de raízes. Para um eventual efeito na resistência ao cisalhamento, é necessário que as plantas tenham algum tipo de influência física na superfície de cisalhamento. Essa influência foi observada por meio da medição da taxa de raízes por área de solo<sup>18</sup> e também pela densidade de raízes por volume de solo. A primeira forma de avaliação é mais comum e

<sup>17</sup> Com base na densidade aparente da parte aérea de *P. sellowianus* que é de 0,51 g/cm<sup>3</sup> (DENARDI, 2007).

<sup>18</sup> Também conhecida como RAR – *Root Area Ratio* (GREY e LEISER, 1982).

tem sido utilizada por vários autores (WU et al., 1979; WU et al., 1988; CAMMERAAT et al., 2005; CAZZUFI et al., 2006; STOKES et al., 2008; COMINO e DRUETTA, 2009; COMINO et al., 2010; FAN e CHEN, 2010; FAN, 2012; GHESTEM et al., 2014; VEYLON et al., 2015), enquanto a segunda é menos comum, mas mencionada como possível substituta da primeira (GRAY e LEISER, 1982).

Para o solo com raízes, a taxa média de raízes por área de solo obtida foi de 0,19%<sup>19</sup>, com um coeficiente de variação de 47,76%, o qual é considerado elevado. Esse resultado era esperado uma vez que foram testadas plantas de diferentes classes de crescimento, o que repercute em mais ou menos raízes, assim como diferentes diâmetros de estaca, cruzando a superfície de ruptura. A taxa de raízes de 0,19%, apesar de parecer pequena, vai de encontro com o que vem sendo retratado na literatura. Por exemplo, Veylon et al. (2015), estudando *Jatropha curcas* L., *Rhus chinensis* L. e *Ricinus communis* L. relataram que, aos 10 meses de idade, na profundidade de 15 cm, as espécies apresentaram valores que variaram de 0,002 a 0,116%. Bischetti et al. (2005), estudando espécies do norte da Itália desenvolvendo naturalmente a campo, tais como *Alnus viridis* (Chaix) D.C., *Corylus avellana* L., *Fraxinus excelsior* L., *Picea abies* (L.) Karst. e *Larix decidua* Mill. obtiveram, para a profundidade de 20 cm, taxas de raízes por unidade de área de solo que variaram de 0,04 a 0,65%. Mattia et al. (2005), estudando as espécies *Lygeum spartum* L., *Atriplex halimus* L. e *Pistacia lentiscus* L., típicas do Mediterrâneo, relataram valores que variaram de 0,025 a 0,1%.

Para a concentração ou densidade de raízes no solo foi obtido o valor médio de 445,8 g/m<sup>3</sup>, com um coeficiente de variação de 69,1%, o que indica uma grande variação dos dados (GOMES, 1985). Essa grande variação é explicada pelas diferentes classes de crescimento a que as plantas amostradas pertencem.

Na Tabela 11 são apresentadas a massa seca de raízes de *P. sellowianus* obtida dos corpos de prova cisalhados, assim como a correspondente massa seca da parte aérea e o diâmetro das estacas na superfície de cisalhamento.

A massa seca de raízes foi separada entre as profundidades de 0 a 20 cm, que é o alcance da caixa de cisalhamento, e de 20 a 50 cm, que é limite de alcance das estacas. De 0 a 20 cm de profundidade as plantas apresentaram valor médio de massa seca de raízes de 14,3 g, com um C.V. elevado de 69,1%, indicando grande variabilidade dos dados. A massa seca de 20 a 50 cm apresentou valor médio de 0,4 g e uma variabilidade de dados bastante elevada (C.V.=139,5%). A diferença na ocupação das raízes em distintas camadas de solo foi evidente, deixando claro

---

<sup>19</sup> Representa o percentual da área da superfície de ruptura (1600 cm<sup>2</sup>) que é ocupada pela área transversal de raízes e de estaca plantada.

que o desenvolvimento de raízes em profundidades superiores a 20 cm após 1 ano de plantio foi extremamente pequeno. Em linhas gerais, a ocupação de raízes foi 36 vezes maior na camada de solo de 0 a 20 cm do que na camada de 20 a 50 cm. Esse tipo de comportamento, além de ter relação com o pouco tempo de desenvolvimento a campo, também pode ter relação com as características químicas e físicas do solo ao longo das duas camadas comparadas. Resultados similares foram obtidos na seção 4.1, e também por Sutuli (2007) e Hörbinger (2013).

Tabela 11 – Massa seca das raízes e brotos e diâmetro das estacas de *Phyllanthus sellowianus* na superfície de cisalhamento

Estatística descritiva	SOLO COM RAÍZES (n = 20)							Diâmetro das estacas na superfície de cisalhamento [mm]
	Massa seca de raízes de 0-20 cm [g]	Massa seca de raízes de 20-50 cm [g]	Massa seca total de raízes [g]	Massa seca de estacas de 0-20 cm [g]	Massa seca de estacas de 20-50 cm [g]	Massa seca total de estacas [g]	Massa seca da parte aérea [g]	
Mínimo	4,3	0,03	4,5	10,46	15,69	26,14	22,4	10,8
<b>Média</b>	<b>14,3</b>	<b>0,4</b>	<b>14,6</b>	<b>21,1</b>	<b>31,6</b>	<b>52,7</b>	<b>50,0</b>	<b>19,1</b>
Máximo	44,6	1,94	46,4	39,50	59,24	98,74	132,3	27,9
Desvio padrão	9,9	0,61	10,3	6,45	9,68	16,13	28,7	4,7
<b>C.V. (%)</b>	<b>69,1</b>	<b>139,5</b>	<b>70,7</b>	<b>30,6</b>	<b>30,6</b>	<b>30,6</b>	<b>57,5</b>	<b>24,5</b>

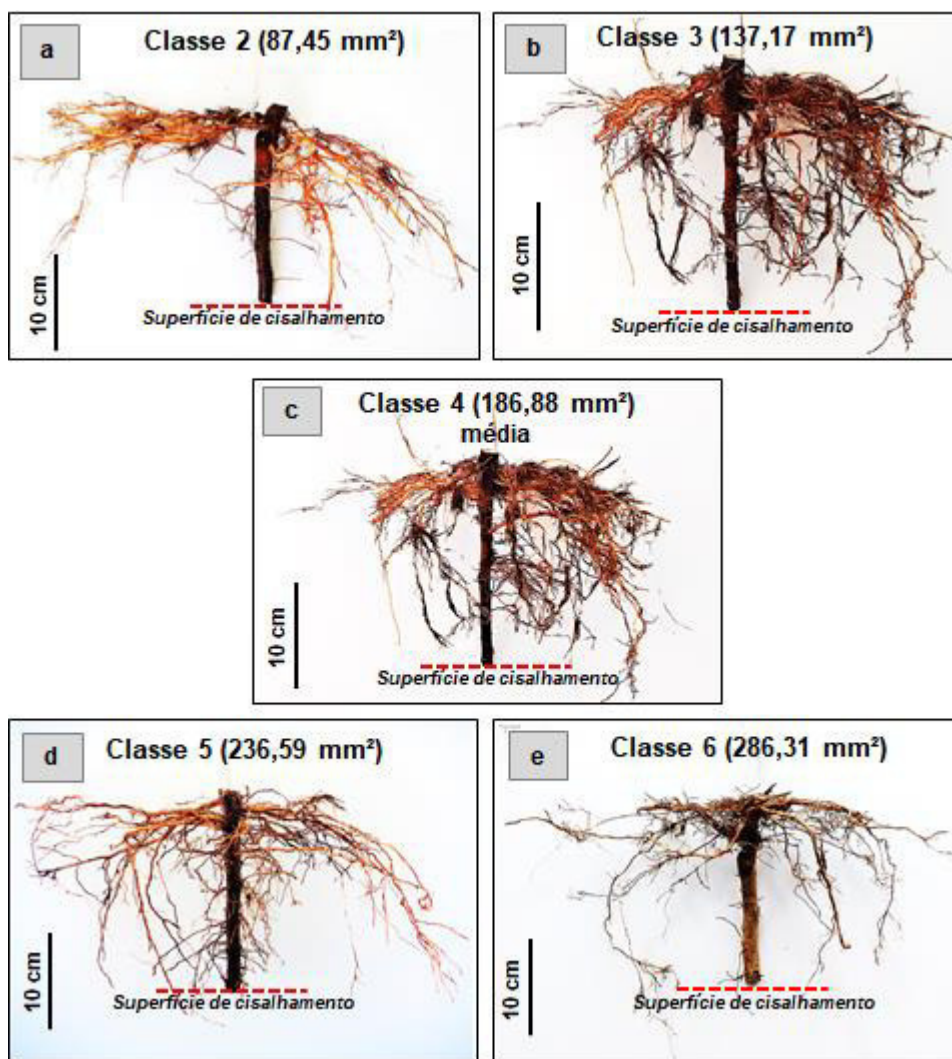
Quanto à massa seca da parte aérea, esta teve um valor médio de 50 g e, devido à amostragem de plantas de diferentes classes de crescimento, um C.V. elevado (57,5%). Em comparação com a massa seca total de raízes, a massa seca de brotos foi 3,4 vezes maior. Contudo, há de se considerar que os brotos foram avaliados em sua totalidade, enquanto a massa de raízes foi avaliada apenas em parte. Por outro lado, somando-se a massa de raízes com a massa seca média de estacas obtem-se o valor de 67,3 g, o qual é 25,7% maior que o valor de massa seca da parte aérea.

Quanto ao diâmetro das estacas na superfície de cisalhamento, verificou-se que, após um ano de desenvolvimento das plantas, houve um aumento do valor médio de 18 mm, quando do plantio, para 19,1 mm durante o período dos ensaios de cisalhamento direto *in situ* (Tabela 11). O conjunto de dados apresentou um coeficiente de variação de 24,5%, valor que é considerado alto (GOMES, 1985). É importante mencionar que o diâmetro das estacas sempre foi incluído no cálculo da taxa de raízes por área de solo.

Na Figura 45 é apresentado o aspecto geral do sistema radicial das plantas das cinco classes de soma da área transversal de brotos amostradas nos ensaios de cisalhamento direto *in situ*.

Nessa figura é possível perceber que lateralmente as raízes dos diferentes sistemas radiciais têm comprimento semelhante, cerca de 40 cm, o que é resultado dos cortes realizados no preparo dos corpos de prova para posterior inserção da caixa de cisalhamento. Nota-se, também, que a partir da classe 3, algumas raízes apresentam aspecto mais tortuoso, e podem apresentar mais do que 40 cm, uma vez que, em razão de terem crescido mais próximas à estaca, não foram cortadas no processo de preparo dos corpos de prova.

Figura 45 – Sistemas radiciais de plantas de 5 classes de soma de área transversal de brotos amostradas nos ensaios de cisalhamento direto *in situ*, onde as estacas têm 20 cm de comprimento (da superfície do solo à superfície de cisalhamento). Onde: a) classe 2; b) classe 3; c) classe 4; d) classe 5; e) classe 6



Fonte: Próprio autor.

Ainda na Figura 45, cabe destacar a pequena quantidade de raízes observada a 20 cm (profundidade que coincide com a superfície de cisalhamento), informação que é corroborada na Tabela 10 pelo pequeno valor médio de taxa de raízes por unidade de área de solo. Na mesma



figura, observando-se as classes 2, 3 e 4, a ocorrência de raízes junto à estaca na profundidade de 20 cm é praticamente inexistente. Apenas nas maiores classes, 5 e 6, é possível constatar, algumas raízes cruzando a superfície de ruptura. Em primeira análise, e levando em consideração parte do conceito do modelo de raiz perpendicular de Wu et al. (1979), de que apenas raízes cruzando a superfície de cisalhamento são capazes de influenciar na resistência ao cisalhamento do solo, pode-se apontar, como um indicativo, que eventuais efeitos das plantas devem resultar principalmente da estaca cruzando a superfície de ruptura.

Apesar da maioria das plantas terem mostrado maior desenvolvimento de raízes nos primeiros 20 cm de profundidade, algumas raízes ultrapassaram consideravelmente o limite de alcance das estacas (que foi de 50 cm). Isso fica evidente na Figura 46, em que raízes ultrapassam em 40 cm o limite da estaca, o que no solo representa cerca 90 cm de profundidade a partir da superfície do terreno (a coleta foi realizada nesta profundidade).

Figura 46 – Aspecto geral de parte do sistema radicial de uma planta de *Phyllanthus sellowianus* da classe de crescimento 5, com raízes ultrapassando 40 cm além do comprimento final da estaca. A linha vermelha pontilhada indica a posição da superfície de cisalhamento, abaixo da mesma a estaca está inserida mais 30 cm no solo



Fonte: Próprio autor.

Cabe mencionar que o aspecto geral dos sistemas radiciais apresentados, na maioria das vezes, não se mostrou simétrico (distribuição irregular das raízes no entorno das estacas). Também não foi observado um padrão ou uma tendência na direção de desenvolvimento das raízes (desenvolvimento aleatório). De acordo com Stokes et al. (2008), padrões de

desenvolvimento normalmente estão associados à disponibilidade de nutrientes e água (curto prazo), bem como aos estresses mecânicos (longo prazo).

#### 4.2.7 Resistência ao cisalhamento do solo *in situ*

Observando o comportamento da relação entre tensão cisalhante e deformação do solo (Figura 49), optou-se por elaborar, para solo com e sem plantas, envoltórias de resistência com base nos dados de resistência de pico e resistência pós-pico, ambas baseadas no critério de ruptura de Mohr-Coulomb. É importante mencionar que na resistência pós-pico foram considerados valores médios de resistência ao cisalhamento correspondentes ao intervalo de 6 a 12% de deformação horizontal dos corpos de prova.

Os modelos lineares, ou envoltórias, elaborados para as resistências de pico e pós-pico, para solo com e sem plantas, atenderam, segundo as análises estatísticas realizadas, às condicionantes das regressões, ou seja, demonstraram homogeneidade de variância, normalidade e independência de resíduos (APÊNDICE C; página 159). Isso significa que, para as condições avaliadas, os modelos ou envoltórias de resistência apresentados se mostram estatisticamente confiáveis.

Na Figura 47 são apresentadas as envoltórias de resistência elaboradas a partir das resistências de pico. Nessa condição, o solo sem raízes apresentou coesão variando de 7,60 a 7,87 kPa e ângulo de atrito interno de 27,5° a 37,0° (Figura 47b), ao passo que o solo com raízes teve coesão variando de 7,06 a 10,77 kPa e ângulo de atrito interno de 28,9° a 35,0° (Figura 47c). Quanto aos valores médios, o solo sem raízes apresentou envoltória com bom ajuste linear ( $r^2 = 0,90$ ), apresentando valores de coesão e ângulo de atrito interno de 7,73 kPa e 32,5°, respectivamente (Figura 47a). Por sua vez, o solo com raízes teve envoltória com ajuste linear menor ( $r^2 = 0,76$ ), apresentando coesão 8,94 kPa e ângulo de atrito interno de 31,9° (Figura 47a). As diferenças entre as duas condições médias, representam, em termos relativos, que as plantas de *P. sellowianus* aumentaram a coesão do solo em 15,6% (1,21 kPa) e provocaram, ao mesmo tempo, redução de 1,8% (0,6°) no ângulo de atrito interno do solo.

Na Figura 48, o comparativo entre envoltórias de resistência mostra que o efeito positivo das plantas sobre a resistência ao cisalhamento do solo foi ainda mais pronunciado ao considerar a resistência pós-pico. No solo sem raízes, a envoltória de resistência teve bom ajuste linear ( $r^2 = 0,89$ ), mostrando valores de coesão que variaram de 2,18 a 5,27 kPa e ângulo de atrito interno de 34,8° a 37,0° (Figura 48b), ao passo que no solo com raízes, a coesão variou de 4,72 a 8,97 kPa e o ângulo de atrito interno de 32,5° a 34,6° (Figura 48c). Considerando os valores médios,

o solo sem raízes apresentou coesão de 3,78 kPa e ângulo de atrito interno de 35,8° (Figura 48a), enquanto o solo com raízes teve coesão de 6,92 kPa e ângulo de atrito interno de 33,4° (Figura 48a). As diferenças entre as duas condições médias mostram que, em termos relativos, as plantas de *P. sellowianus* aumentam a resistência ao cisalhamento pós-pico do solo em 83,1% devido a um aumento direto na coesão (3,14 kPa), além de, ao mesmo tempo, terem proporcionado uma redução de 6,7% (2,4°) no ângulo de atrito interno do solo.

Com relação ao efeito da sucção mátrica na resistência ao cisalhamento do solo, o valor médio encontrado foi de 1,24 kPa (calculado a partir da Equação 25, página 75). Como visto na Tabela 11 (página 117), as plantas, devido ao escasso desenvolvimento de raízes em profundidade maior que 20 cm (0,4 g), praticamente não alteraram as características físicas do solo na superfície de cisalhamento (Tabela 9). Portanto, o solo sem raízes e o solo com raízes apresentaram características físicas semelhantes. Por motivos práticos, essa semelhança levou ao não emprego do efeito da sucção mátrica, mas a comparar apenas os valores de campo, uma vez que para essa condição a semelhança entre graus de saturação foi atendida (solo com e sem plantas tiveram graus de saturação de aproximadamente 84,7%). Por outro lado, é interessante observar que a parcela de resistência ao cisalhamento devido à sucção mátrica (1,24 kPa) foi praticamente a mesma que a parcela devido às raízes e estacas das plantas (1,21 kPa). Esse resultado é corroborado por Veylon et al. (2015), que estudaram o efeito das raízes e da sucção mátrica na resistência do solo, usando três espécies vegetais (*Jatropha curcas* L., *Rhus chinensis* L. e *Ricinus communis* L.).

Apesar de já mencionados, é importante destacar o significado dos coeficientes de determinação obtidos para as envoltórias de resistência. Para o solo sem raízes, as envoltórias de resistência apresentaram coeficientes de determinação de 0,90 (resistência de pico) e de 0,89 (resistência pós-pico), valores que são considerados adequados mesmo em análises de laboratório. Esses valores mostram que, apesar das grandes dimensões e principalmente da grande área da superfície de cisalhamento dos corpos de prova (1600 cm<sup>2</sup>), o solo da área de estudo mostrou ser relativamente homogêneo na profundidade estudada (20 cm), algo muito importante para assegurar a confiabilidade dos resultados obtidos. Quanto às envoltórias ajustadas para solo com raízes, os valores de coeficiente de determinação obtidos foram de 0,76 (resistência de pico) e de 0,82 (resistência pós-pico), ajustes relativamente menores que os obtidos para o solo sem raízes. É bem provável que essas diferenças resultaram de variações na resistência do solo proporcionadas pelo uso de plantas de diferentes classes de crescimento, ação que foi justificada pela intenção de registrar o comportamento e/ou contribuição de todo plantio.

Figura 47 – Envoltórias de resistência de pico do solo com e sem plantas de *Phyllanthus sellowianus*. a) envoltórias médias de resistência de pico do solo com e sem plantas; b) intervalo de confiança para a envoltória de resistência de pico do solo sem raízes; c) intervalo de confiança para a envoltória de resistência de pico do solo com raízes

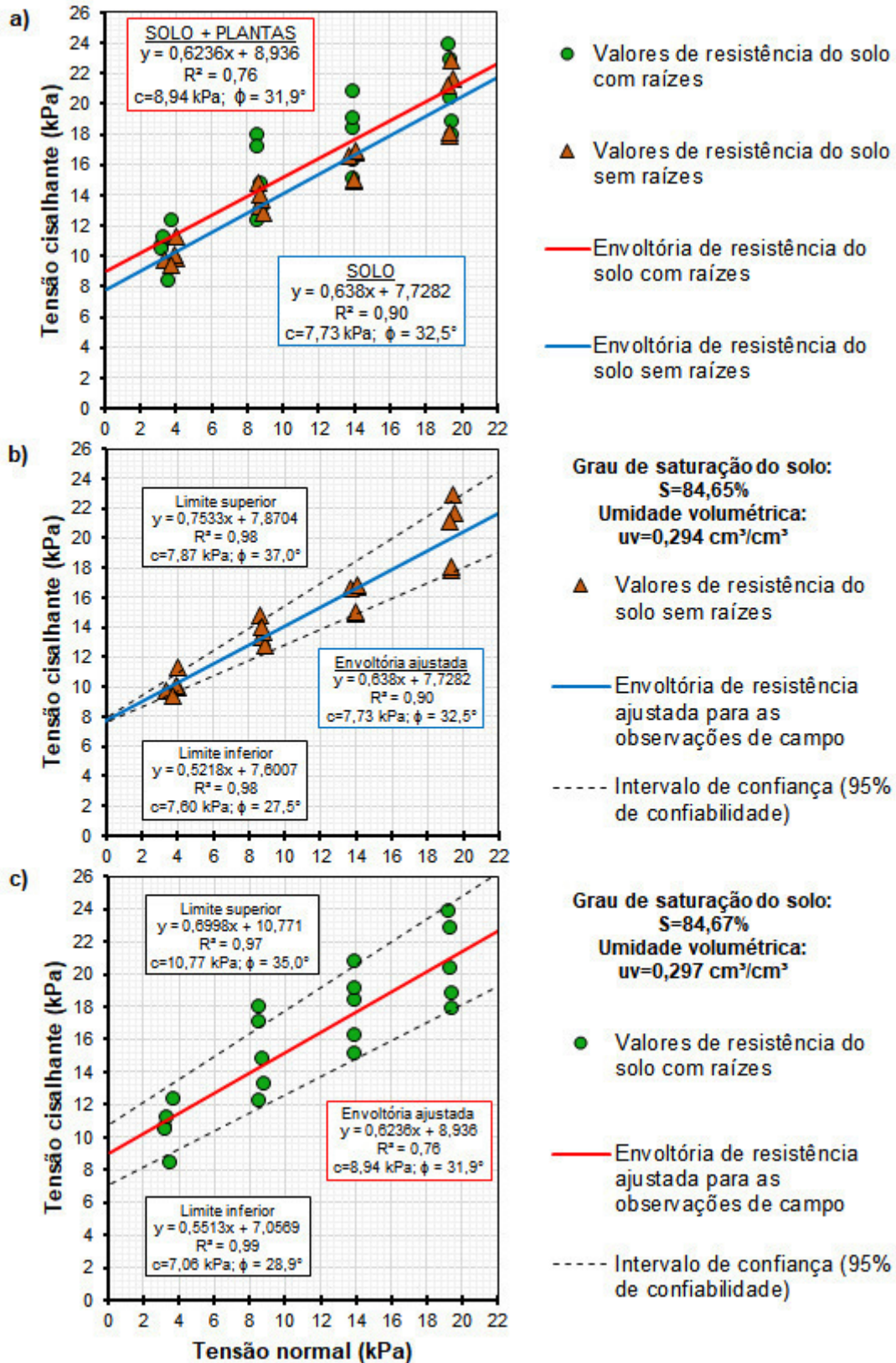
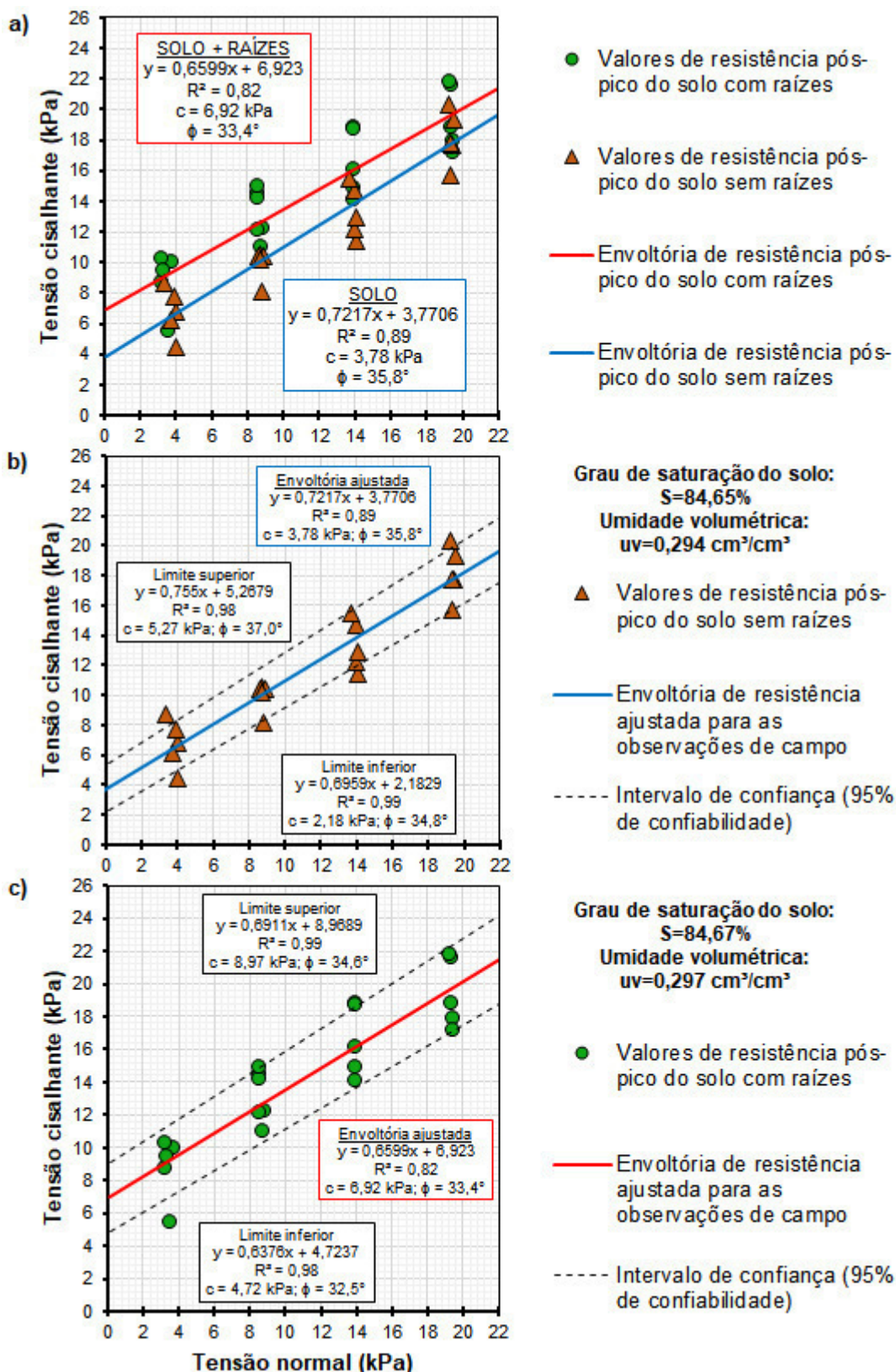


Figura 48 – Envoltórias de resistência pós-pico (de 6 a 12% de deformação horizontal) do solo com e sem plantas de *Phyllanthus sellowianus*. a) envoltórias médias de resistência do solo com e sem plantas; b) intervalo de confiança para a envoltória de resistência pós-pico do solo sem raízes; c) intervalo de confiança para a envoltória de resistência pós-pico do solo com raízes



Como demonstrado, para a coesão do solo, considerando os valores médios de resistência de pico e pós-pico, o incremento pela contribuição das plantas variou de 1,2 a 3,14 kPa, respectivamente. Tais resultados se mostram similares aos que têm sido obtidos em ensaios de cisalhamento direto *in situ* (ZIEMER, 1981; O'LOUGHLIN e ZIEMER, 1982; WALDRON et al., 1983; BARKER, 1987; TOBIAS, 1995; VAN BEEK et al., 2005; NORRIS, 2008; VEYLON, 2015) e também por estimativas<sup>20</sup> (ZIEMER e SWANSTON, 1977; WU et al., 1979; WU, 1984; BUCHANAN e SAVIGNY, 1990; SCHMIDT et al., 2001; MATTIA et al., 2005), cujos valores médios tem variado de 0,5 a 10 kPa.

Apesar da semelhança entre resultados, é importante destacar que, dada a fase inicial e exploratória em que as pesquisas sobre o reforço do solo por efeito das plantas se encontram<sup>21</sup>, diversas são as diferenças entre os estudos até então realizados. Essas diferenças, em geral, estão relacionadas ao clima, solo, espécies vegetais, idade de plantas, formas de seleção das plantas (seja em experimentos implantados ou na natureza), formas de propagação ou plantio, profundidade avaliada, dimensões da caixa de cisalhamento e sistema de aquisição de dados. A identificação dessa diversidade de condições é bastante relevante e não desqualifica a importância do uso de informações provenientes de estudos conduzidos por princípios metodológicos diferentes, mas mostra que, comparações, quando necessárias, devem ser realizadas com extrema cautela.

As envoltórias de resistência ajustadas de pico e pós-pico, de solo sem raízes e com plantas, apresentaram valores elevados de ângulo de atrito interno (entre 31,9° e 35,8°) (Figura 47a e Figura 48 a) se comparadas aos ensaios de cisalhamento direto realizados em laboratório (18° a 28°) (Figura 41, S=79%, página 106). O efeito de aumento do ângulo de atrito interno, além de estar associado a pequenas variações nos corpos de prova devido às suas grandes dimensões, tem sido retratado na literatura também como um resultado da aplicação de baixas tensões normais (BAKER, 2004; VEYLON et al., 2015).

Para efeito de comparação, é importante ressaltar que em laboratório foram utilizadas tensões normais maiores (9, 25 e 50 kPa) que as utilizadas nos ensaios *in situ* (3,5, 8,7, 14 e 19,4 kPa).

De modo geral, para o tipo de solo e condições estudadas, as plantas contribuíram para o reforço do solo influenciando majoritariamente no parâmetro coesão, resultado que é

---

<sup>20</sup> Essas estimativas são normalmente realizadas por *back analysis* (muito utilizada para verificar as condições que levaram um talude à ruptura), informações de densidade de raízes e modelo de raiz perpendicular, além de ensaios conduzidos em laboratório (NORRIS et al., 2008).

<sup>21</sup> Ainda não existe um sistema geral de padronização de ensaios e experimentos para a referida linha de pesquisa.

confirmado por vários estudos em solos granulares (COPPIN e RICHARDS, 2007; WALDRON, 1977; GRAY e OHASHI, 1983; SHEWBRIDGE e SITAR, 1989; WU e WATSON, 1998; OPERSTEIN e FRYDMAN, 2000). Entretanto, resultados contrários, em que o ângulo de atrito tem maior influência na resistência ao cisalhamento do solo, também têm sido observados. É o caso retratado por Graf et al. (2009), estudando um solo de detritos glaciais (*Moraine*) com raízes de *Alnus incana*, onde o efeito das raízes na coesão foi nulo e os valores de ângulo de atrito interno foram consideravelmente aumentados. Veylon et al. (2015), por sua vez, observaram em ensaios de cisalhamento direto, que as raízes das plantas tiveram influência tanto no ângulo de atrito interno quanto na coesão, destacando que a maior ou menor influência sobre um dos parâmetros de resistência está relacionada com a arquitetura do sistema radicular.

A pequena influência que as plantas tiveram sobre o ângulo de atrito interno do solo no presente estudo se mostra coerente com a pequena porcentagem média de área de raízes (0,19%) ocupando a superfície de ruptura dos corpos de prova. Por outro lado, com o crescimento das plantas, é natural que maior número de raízes cruze a superfície de ruptura, existindo uma grande possibilidade de que passem então a influenciar significativamente o ângulo de atrito interno do solo. Para essa condição, Veylon et al. (2015) sugerem que o ângulo de atrito interno tende a ser aumentado.

Tanto nas envoltórias elaboradas a partir da resistência de pico quanto nas elaboradas com a resistência pós-pico, os resultados relativos indicam que as plantas influenciaram na resistência do solo principalmente por efeito na coesão, tendo pouco ou nenhum efeito sobre o ângulo de atrito interno. Para complementar essas informações, testes estatísticos foram conduzidos para verificar a igualdade dos interceptos (coesão), o paralelismo das curvas (mesmo coeficiente angular; ângulo de atrito interno) e a coincidência (mesmo intercepto e coeficiente angular). Os resultados dessas análises são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 – Verificação dos efeitos das plantas de *Phyllanthus sellowianus* pelos testes de igualdade de intercepto, paralelismo e coincidência de curvas. A hipótese de igualdade entre valores é aceita se P-valor for maior que 0,05

<b>RESISTÊNCIA DE PICO</b>				
	G.L.	Soma de Quadrados	Estat. F	P-valor
Igualdade do Intercepto	1	3,0425	0,9452	0,3374
Paralelismo	1	0,0711	0,0221	0,8827
Coincidência	2	10,9595	1,7024	0,1966
<b>RESISTÊNCIA PÓS-PICO</b>				
	G.L.	Soma de Quadrados	Estat. F	P-valor
Igualdade do Intercepto	1	17,9579	5,9449	0,0198
Paralelismo	1	0,9582	0,3172	0,5768
Coincidência	2	55,3042	9,1541	0,0006

Os testes estatísticos indicaram que, tanto na resistência de pico quanto na resistência pós-pico, os ângulos de atrito interno do solo sem raízes e do solo com raízes não apresentam diferença significativa, uma vez que hipótese de paralelismo entre curvas não foi rejeitada ( $P\text{-valor} > 0,05$ ). Isso significa que os ângulos de atrito interno do solo com e sem plantas, apesar de serem relativamente diferentes, são estatisticamente iguais.

A coesão, por outro lado, mostrou resultados distintos para resistência de pico e resistência pós-pico. Para a resistência de pico, os testes indicaram não haver diferenças estatísticas entre os interceptos coesivos do solo sem raízes e do solo com raízes, uma vez que a hipótese de igualdade entre interceptos não foi rejeitada ( $P\text{-valor} > 0,05$ ). Além disso, os valores são coincidentes, indicando que os valores têm mesmo intercepto coesivo e mesmo coeficiente angular. Para a resistência pós-pico, no entanto, os testes apontaram a existência de diferenças significativas entre os interceptos coesivos do solo sem raízes e com plantas, visto que a hipótese de igualdade foi rejeitada ( $P\text{-valor} < 0,05$ ). Isso é corroborado pelo teste de coincidência, o qual indica que ao menos um dos coeficientes é diferente (no caso o intercepto coesivo).

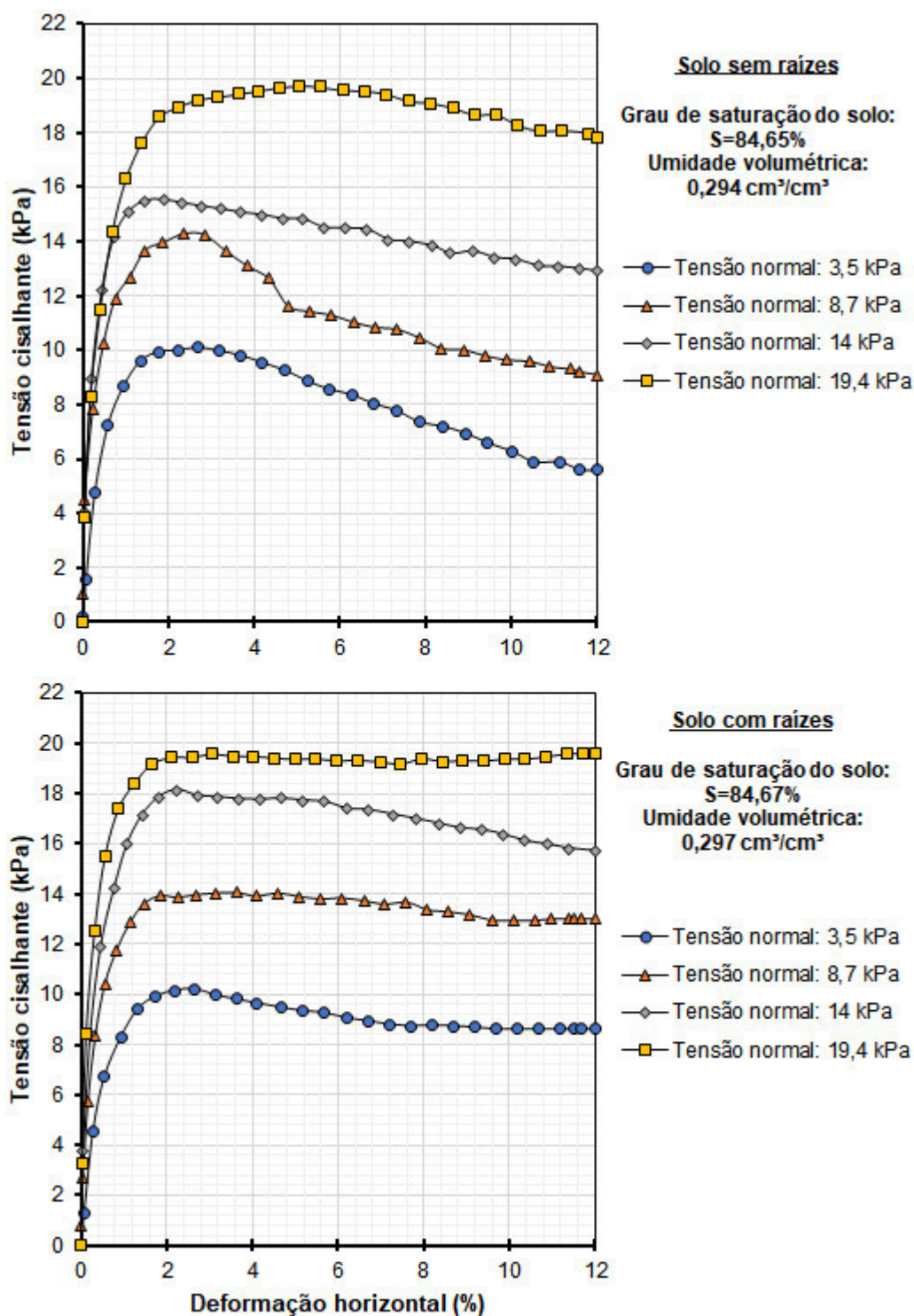
Em linhas gerais, os testes estatísticos revelaram que, após um ano de desenvolvimento a campo, as plantas de *P. sellowianus* não foram capazes de modificar o ângulo de atrito interno do solo, mas foram capazes de aumentar a resistência ao cisalhamento do solo, atuando como elementos de reforço, de modo que a resistência pós-pico permanecesse aproximadamente estável, sem apresentar decréscimos significativos, diferentemente do solo sem raízes. Portanto, toda a contribuição das plantas para o aumento da resistência ao cisalhamento do solo foi direcionada ao parâmetro coesão.

Esse comportamento, como já mencionado anteriormente, tem sido confirmado por diversos autores (COPPIN e RICHARDS, 2007; WALDRON, 1977; GRAY e OHASHI, 1983; SHEWBRIDGE e SITAR, 1989; WU e WATSON, 1998; OPERSTEIN e FRYDMAN, 2000). Contudo, nenhum dos trabalhos analisados utilizou procedimentos estatísticos mais elaborados, como é o caso dos testes de igualdade de intercepto, paralelismo e coincidência. Em primeira análise, esses testes se mostraram úteis para identificar quais diferenças foram de fato significativas.

Na Figura 49, onde são apresentadas as relações entre tensão cisalhante e deformação horizontal, constata-se que as plantas com suas raízes e estacas atuaram como elementos de reforço do solo.



Figura 49 – Relação entre tensão cisalhante e deformação horizontal obtida em *in situ*, para a profundidade de 20 cm, para solo sem raízes (a) e com plantas de *Phyllanthus sellowianus* (b)



Ao comparar a Figura 49a (solo sem raízes) com a Figura 49b (solo com raízes), percebe-se que as tensões cisalhantes máximas alcançadas no solo com raízes, exceto na tensão normal de 14 kPa, foram praticamente iguais às do solo sem raízes nas tensões normais de 3,5,

8,7 e 19,4 kPa. Contudo, quando se compara o comportamento do solo com e sem plantas após a resistência máxima ou de pico, observa-se que no solo sem raízes existe uma forte tendência de que a resistência pós-pico decresça rapidamente. De modo geral, tanto no solo sem raízes como no solo com raízes, a resistência máxima ou de pico foi alcançada antes dos 3% (12 mm) de deformação horizontal. É somente após a resistência de pico que se percebe uma clara influência das plantas no reforço do solo. Nessa fase do ensaio, enquanto no solo sem raízes a resistência à tensão cisalhante tende a decrescer continuamente, no solo com raízes a resistência à tensão cisalhante não apresenta decréscimos significativos, de modo que tende a se manter mais ou menos estável.

O efeito do sistema radicial de plantas atuando como elementos de reforço do solo tem sido mencionado por diversos autores (FAN e SU, 2008; GHESTEM et al., 2014; VEYLON et al., 2014). Em linhas gerais, autores têm confirmado que o principal efeito das plantas é sobre a resistência residual<sup>22</sup>, e que o efeito dos sistemas radiciais sobre a resistência ao cisalhamento tende a aumentar quanto maior for o grau de saturação do solo (FAN e SU, 2008). No presente estudo, ao invés de resistência residual foi utilizado o termo resistência pós-pico, que representa um comportamento anterior ao da resistência residual. Isso fornece um indicativo de que, caso os ensaios de campo fossem conduzidos a uma deformação horizontal grande o suficiente para caracterizar a resistência residual, é possível que a contribuição das plantas para a resistência ao cisalhamento do solo fosse ainda maior do que 83,1%, diferença apresentada entre envoltórias pós-pico na Figura 48a.

No sentido de verificar o comportamento médio das classes de crescimento das plantas avaliadas, na Figura 50 apresenta-se a relação entre tensão cisalhante normalizada (tensão cisalhante/tensão normal aplicada) e a deformação horizontal dos corpos de prova.

Na Figura 50a fica evidente que mesmo as plantas da menor classe de crescimento (classe 2) tiveram efeitos positivos sobre o reforço do solo. Todas as classes de crescimento avaliadas elevaram a resistência do solo até um determinado limite, a partir do qual apresentaram pequenos decréscimos e/ou mantiveram os valores de tensão cisalhante mais ou menos estabilizados. O comportamento geral do solo, por outro lado, mostrou que sua resistência aumenta progressivamente até atingir um limite, a partir do qual, por falta de reforço interno, começa a decrescer consideravelmente (Figura 50b).

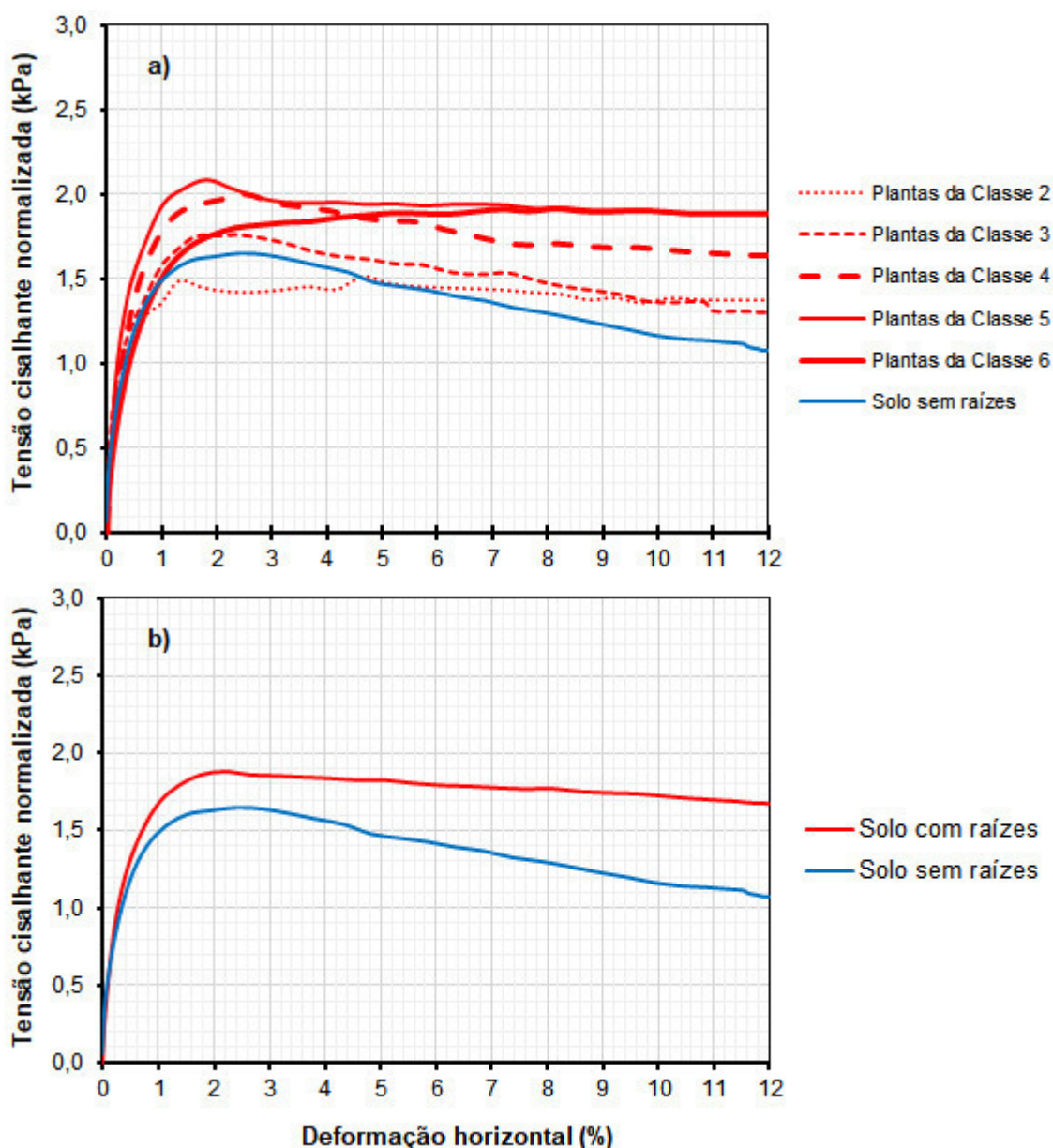
A título de exemplo, na Figura 50a, ao comparar a curva do solo sem raízes com a curva da classe 2, percebe-se que, entre 0,8 e 4,6% de deformação horizontal (cerca de 0,32 a 1,84

---

<sup>22</sup> A resistência ao cisalhamento residual de um solo é o valor mínimo de resistência ao cisalhamento obtido, durante um ensaio drenado, após a imposição de grandes deslocamentos (PINHEIRO, 2000).

cm), o solo apresenta maior tensão cisalhante normalizada, mas a partir de 4,6%, como as plantas mantiveram a tensão cisalhante estabilizada, sua resistência é superada.

Figura 50 – Relação entre tensão cisalhante normalizada e deformação horizontal obtida a partir dos ensaios de cisalhamento direto *in situ*. a) comparação entre o solo sem raízes e solo com raízes de *Phyllanthus sellowianus* de diferentes classes de soma de área transversal de brotos; b) comparativo do solo sem raízes e do solo com raízes (média das classes de crescimento avaliadas)



Ainda na Figura 50a, nota-se que a influência das plantas sobre os picos de tensão cisalhante normalizada foi mais ou menos crescente até a classe 5, uma vez que a classe 6 mostrou comportamento ligeiramente diferente. Até a classe 5, as tensões normalizadas tendem a atingir um valor máximo e a sofrer pequenas reduções, enquanto a classe 6 mostra aumento

crescente da tensão cisalhante normalizada até o final do ensaio. Isso é um indicativo de que na classe 6, por ser a maior classe de crescimento avaliada, mais raízes foram solicitadas a atuarem em conjunto.

O aspecto das curvas apresentadas na Figura 50b foi muito semelhante ao obtido por El-Khouly (1995), trabalhando em laboratório com areia densa reforçada por pequenas hastes de junco de 1,8 mm. Nesse estudo, o autor encontrou grande semelhança entre as resistências de pico, e confirmou, mais uma vez, maior contribuição dos elementos de reforço na resistência pós-pico. Resultados semelhantes também foram obtidos por Gray e Ohashi (1983), também trabalhando em ensaios de cisalhamento direto em laboratório com areias densa e fofa, reforçadas por fibras sintéticas e naturais. Esses autores concluíram que o reforço proporcionado pela adição de fibras (ou raízes) aumentou a resistência ao cisalhamento do solo e modificou de maneira considerável o comportamento da relação entre tensão-deformação. Além disso, indicaram que o principal papel da inclusão de fibras em um solo é aumento do pico de resistência ao cisalhamento e a limitação da redução da resistência pós-pico. Tais resultados observados em laboratório são condizentes aos encontrados *in situ* no presente estudo.

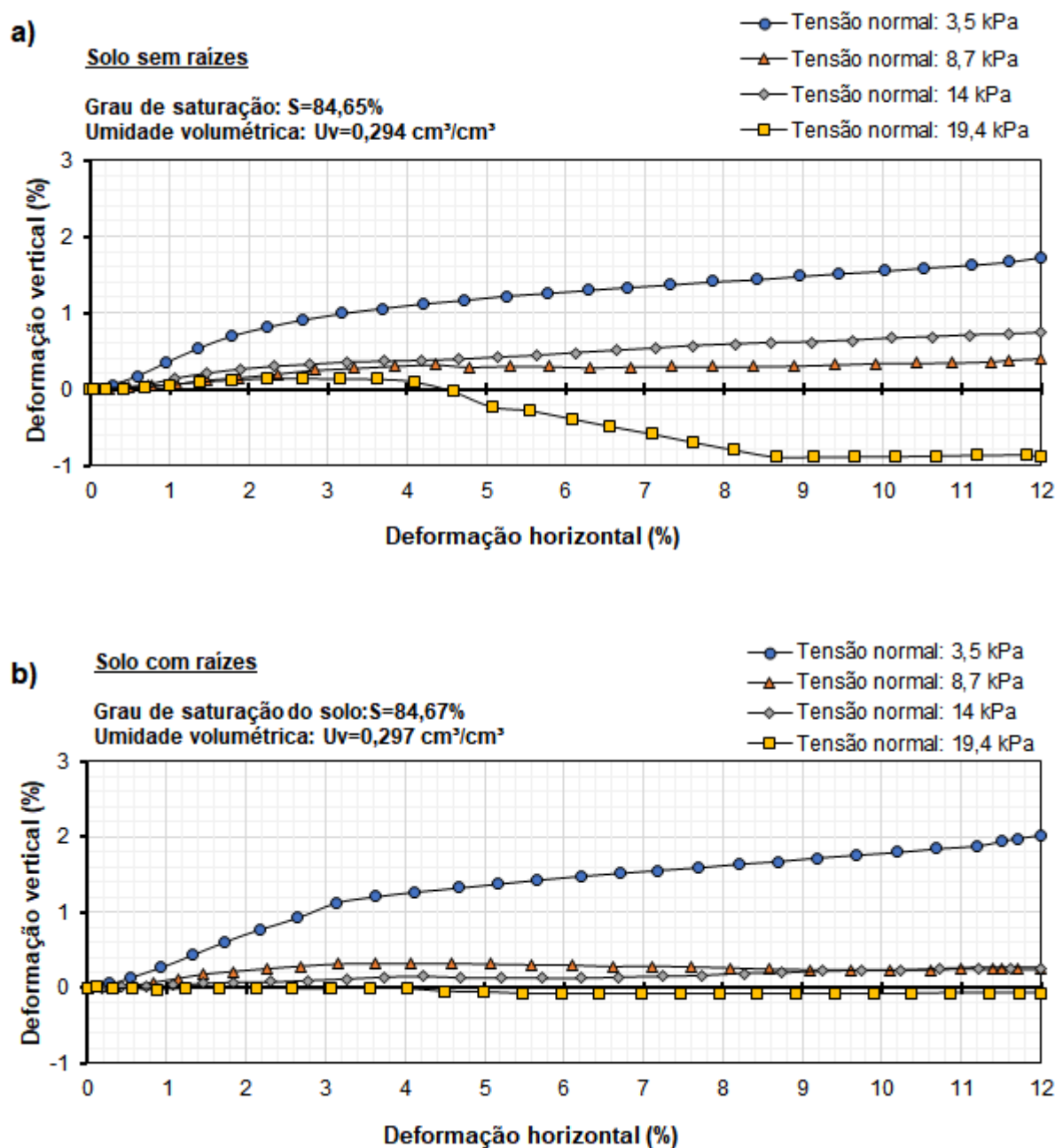
Quanto às deformações verticais dos corpos de prova (compressão ou expansão), essas foram condizentes com as baixas tensões normais aplicadas (Figura 51).

Os corpos de prova com e sem plantas apresentaram deformações pequenas, que variaram de aproximadamente -1% (compressão) (Figura 51a) a 2% (expansão) (Figura 51b). Ao comparar as Figuras 52a e 52b, observa-se que no solo sem raízes as deformações verticais foram melhor distribuídas, enquanto no solo com raízes há uma diferença considerável entre a tensão de 3,5 kPa, onde ocorre expansão, e as tensões normais de 8,7, 14 e 19,4 kPa, nas quais o corpo de prova praticamente não sofre deformação. Isso vai de encontro com Gray e Leiser (1982), que ressaltaram a grande eficiência das raízes em evitar deformações do solo por compressão.

As diferenças entre o solo com e sem plantas foram mais pronunciadas nas tensões normais dos extremos, ou seja, 3,5 e 19,4 kPa. Nas tensões normais centrais, ou seja, 8,7 e 14 kPa, as deformações verticais foram bastante semelhantes, uma vez que variaram de 0,2 a 0,8%.

Assim, para a maior tensão normal aplicada (19,4 kPa), o solo sem raízes apresentou maior deformação por compressão (Figura 51a), enquanto para a menor tensão normal (3,5 kPa) o solo com raízes apresentou maior deformação por expansão do corpo de prova (Figura 51a).

Figura 51 – Relação entre deformação vertical e deformação horizontal do solo *in situ*, para a profundidade de 20 cm, para solo sem (a) e com (b) plantas de *Phyllanthus sellowianus*



Como indicado anteriormente, a inclusão de “fibras” no solo tem se mostrado eficiente em reduzir deformações por compressão (GRAY e LEISER, 1982), o que foi observado no presente trabalho. Por outro lado, também foi observado que, quando a tensão normal é bastante baixa, como foi o caso de 3,5 kPa, o solo com raízes e estacas sofre deformações por expansão. Isso tende a ocorrer por que durante a deformação horizontal as partículas de solo são reorganizadas no sentido que oferece menor resistência. Assim, quando a tensão normal é baixa, o solo tende a se movimentar para cima, se a tensão for grande o suficiente, as partículas tendem

a se manter confinadas, sem espaço para sofrer movimentação, como foi observado nas tensões 8,7, 14 e 19,4 kPa (Figura 51b).

Na Figura 52 pode ser observado o aspecto geral da superfície de cisalhamento dos corpos de prova sem plantas e com plantas. Nas Figuras 53a, 53b e 53c, é possível observar o aspecto do corpo de prova sendo empurrado por uma força cisalhante, deixando, ao final do ensaio (4,8 cm ou 12% de deformação horizontal), a superfície de cisalhamento bem evidente.

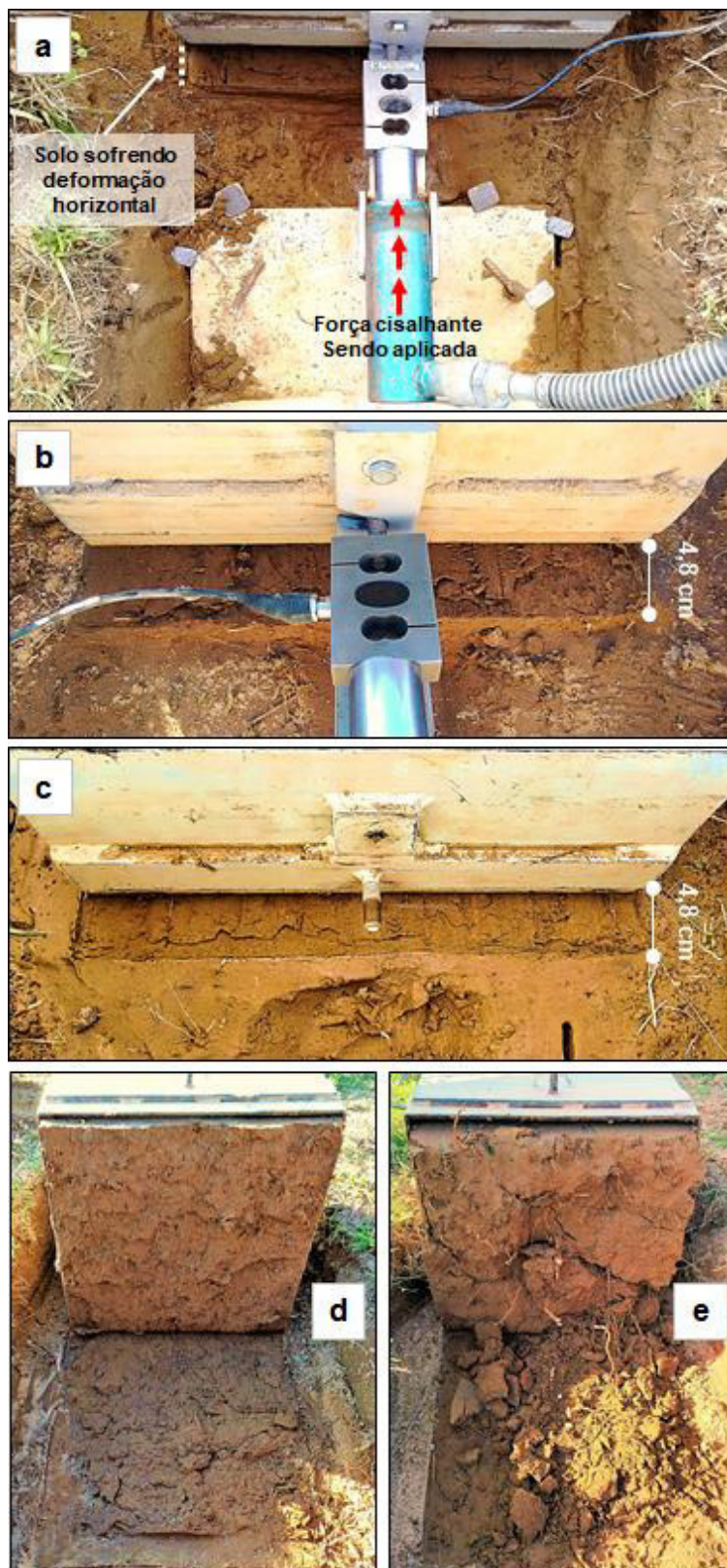
Após os ensaios de cisalhamento direto *in situ*, ao erguer os corpos de prova de solo com e sem plantas foram observadas grandes diferenças visuais entre as superfícies de cisalhamento.

No solo sem raízes (Figura 52d), a superfície de cisalhamento, apesar de ter área relativamente grande, se mostrou bastante homogênea. Isso, possivelmente, é resultado da não existência de barreiras (principalmente raízes) à movimentação das partículas de solo na direção imposta pela caixa de cisalhamento e pela força cisalhante aplicada.

Por outro lado, ao observar a superfície de cisalhamento com planta de *P. sellowianus* (Figura 52e), foi verificado um material mais desestruturado, de modo que não foi possível distinguir visualmente uma linha de ruptura bem definida. Esse resultado se deve às raízes e à estaca cruzando a superfície de ruptura, uma vez que estes elementos atuaram como barreiras à movimentação das partículas de solo, de modo que as tensões aplicadas são continuamente redistribuídas na superfície de cisalhamento em diferentes direções. Sendo assim, o efeito de barreira à força horizontal promovido pelas raízes e estaca é superado com a mudança na direção em que ocorre o movimento das partículas de solo, sendo, necessariamente, aquela que oferece a menor resistência.

A ruptura de raízes na superfície de cisalhamento, quando existente, ocorreu de maneira progressiva (inclusive, em alguns momentos durante os ensaios, o som da ruptura de raízes podia ser ouvido), corroborando com o que sido mencionado em diferentes estudos (POLLEN e SIMON, 2005; COMINO e DRUETA, 2009). Esse comportamento contraria o modelo de raiz perpendicular de Wu (1976), no qual se assume que as raízes rompem todas ao mesmo tempo para conferir a máxima resistência ao cisalhamento. No presente estudo, esse comportamento não poderia ser plausível, pois foram observadas raízes de *P. sellowianus* em diferentes quantidades e comprimentos atravessando a superfície de ruptura.

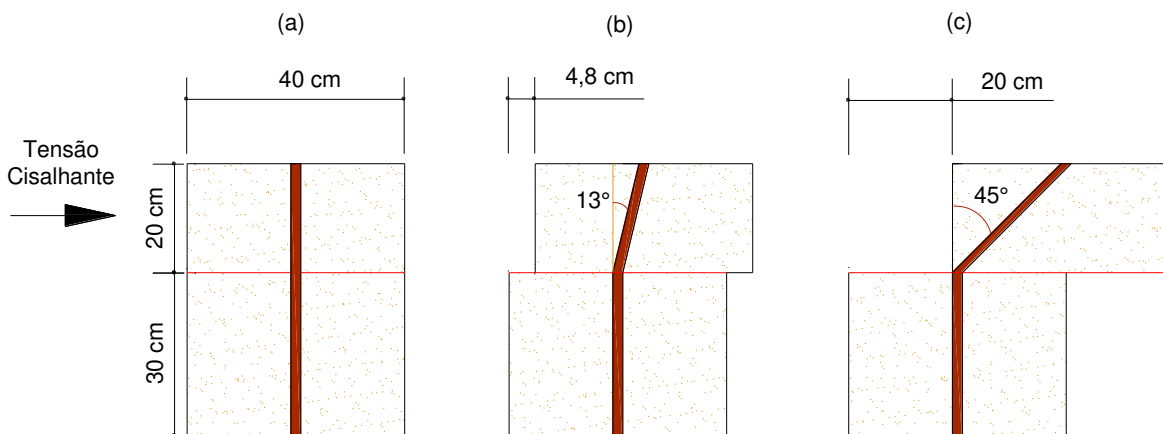
Figura 52 – Aspecto geral dos corpos de prova após o ensaio de cisalhamento direto *in situ*. a) corpo de prova durante o ensaio de cisalhamento recebendo uma força cisalhante e sofrendo deformação horizontal; b) deformação horizontal do corpo de prova ao final do ensaio; c) aspecto geral da deformação horizontal sofrida pelo corpo de prova; d) aspecto da superfície de cisalhamento do solo sem planta; e) aspecto da superfície de cisalhamento do solo com planta de *Phyllanthus sellowianus*



Na Figura 53 pode ser observada a representação esquemática das estacas de *P. sellowianus* sendo flexionadas durante a aplicação da tensão cisalhante.

Dada a pequena deformação horizontal assumida nos ensaios de cisalhamento direto *in situ* (de 12%), as estacas foram apenas levemente movimentadas no sentido da deformação. Em nenhuma estaca foram observados sinais de ruptura (danos na casca ou no lenho).

Figura 53 – Aspecto geral de deformação dos corpos de prova com plantas de *Phyllanthus sellowianus*. a) corpo de prova e estaca intactos; b) corpo de prova com 12% de deformação horizontal e estaca com 13° de inclinação (deformação reversível – deformação final dos ensaios de cisalhamento conduzidos *in situ*); c) corpo de prova com 50% de deformação horizontal e estaca com 45° de inclinação (deformação irreversível). A linha vermelha corresponde à superfície de cisalhamento



Fonte: Próprio autor.

Utilizando o método de Denardi (2007) para determinar o grau de flexibilidade de caules de *P. sellowianus* com diâmetro médio 19 mm, encontrou-se que as estacas poderiam ser flexionadas até aproximadamente 45° antes de deformar irreversivelmente (quebrar). Esse resultado, no ensaio de resistência ao cisalhamento, implicaria em uma deformação horizontal do corpo de prova de aproximadamente 50% (Figura 53c). A deformação utilizada, que foi de 12%, levou as estacas testadas a uma deformação máxima de 13° (Figura 53b). Sendo assim, e considerando que poucas raízes foram observadas na superfície de ruptura, é bem possível que a contribuição das plantas fosse mantida sem alterações significativas até muito próximo à deformação de 50% (20 cm) do corpo de prova. Para verificar isso, a capacidade do pistão do macaco hidráulico, que foi de 10 cm, deveria ser duplicada, enquanto a capacidade do defletômetro horizontal deveria ser quadruplicada.

É importante destacar que o aspecto da distribuição das raízes de plantas de *P. sellowianus* propagadas por estacas tende a ser, ao menos nos primeiros anos de desenvolvimento, diferente da distribuição de raízes da mesma espécie propagada por sementes.



Trabalhos têm indicado que uma das características das plantas que mais influenciam na resistência ao cisalhamento do solo é o aspecto ou morfologia do sistema radicial/radicular (STOKES et al., 2008; GHESTEM et al., 2014; VEYLON et al., 2015). Como mostrado na Figura 45 (página 118), no primeiro ano de desenvolvimento, a maior parte das raízes mostrou ter desenvolvimento próximo à superfície e em posição perpendicular às estacas, tendo poucas raízes desenvolvidas em profundidade. Neste caso, as estacas das plantas assumiram a função de reforço que seria desempenhada por raízes pivotantes (existentes em plantas propagadas por sementes), uma vez que independente da classe de crescimento sempre cruzaram a superfície de cisalhamento.

Tanto as raízes laterais (ou raízes desenvolvendo lateralmente) quanto as pivotantes são de extrema importância para garantir a estabilidade de um talude. Raízes laterais atuam interligando as camadas mais superficiais do solo (Schwarz et al. 2015), enquanto as pivotantes atuam em profundidade como elementos de ancoragem, interligando as camadas de solo mais fracas às mais resistentes (GRAY e LEISER, 1982; GRAY e SOTIR, 1996; STOKES et al., 2008; NORRIS et al., 2008). Ao longo do período avaliado poucas plantas apresentaram desenvolvimento de raízes em profundidade (cerca de 90% das raízes ocorreram na camada de 0-20 cm de profundidade). De acordo com Khuder et al. (2007), é comum que plantas propagadas a partir de estacas apresentem raízes pivotantes proeminentes somente a partir dos 5 anos de idade. Além disso, raízes laterais também tendem a crescer em profundidade conforme a planta cresce e necessita de maior suporte, água e/ou nutrientes.

De acordo com El-Khouly (1995), a interação entre solo e reforço envolve dois mecanismos: o atrito e tensões passivas de solo. Conforme foi observado no processo de cisalhamento do solo com raízes, sempre que aplicada a tensão cisalhante, o solo no entorno das estacas sofreu reorganização até uma condição mais estável, a partir da qual a estaca começou a ser solicitada (flexionada, pois a resistência do solo foi maior que a da estaca). No processo, durante a deformação horizontal, a estaca começou a inclinar, perdeu comprimento, e foi tensionada, movimentando consigo (em direção à superfície de cisalhamento), devido à rede de raízes, a massa de solo do corpo de prova. Esse comportamento mostrou realizar um afastamento entre partículas na superfície de cisalhamento, pois refletiu em uma leve redução dos ângulos de atrito interno nas envoltórias de resistência de pico (1,8% menor) e pós-pico (6,7% menor).

Todos os indicativos acima mencionados, mostraram que, mesmo tendo poucas raízes na superfície de ruptura, as plantas propagadas a partir de estacas tiveram considerável efeito sobre a resistência ao cisalhamento do solo. Ao que tudo indica, tal efeito tende a aumentar com

o tempo, pois as raízes das plantas continuam a crescer e, portanto, a melhorar sua fixação no solo.

#### 4.2.8 Conclusões

As plantas de *P. sellowianus*, após um período curto de desenvolvimento a campo (12 meses), contribuíram para o reforço do solo. Isso foi verificado pela influência que as estacas vivas e suas raízes tiveram nas envoltórias de resistência principalmente por incrementos proporcionados ao parâmetro coesão do solo (ou intercepto coesivo). Esse resultado, portanto, valida a hipótese  $H_1$  levantada no presente estudo.

O processo de umedecimento dos corpos de prova adotados para a homogeneização e saturação do solo resultaram efetivos. Por meio desse processo, conseguiu-se diminuir a sucção mátrica do solo a valores pequenos (cerca de 1,24 kPa). Isso possibilitou o comparativo entre solo com e sem plantas partindo-se de características homogêneas de umidade e sucção mátrica, permitindo atribuir as diferenças na resistência ao cisalhamento do solo à presença das raízes e às estacas das plantas.

Nas envoltórias elaboradas para a resistência de pico, a contribuição das plantas para o aumento da resistência ao cisalhamento chegou a 15,6%, enquanto nas envoltórias elaboradas para a resistência pós-pico, entre 6% e 12% de deformação horizontal do corpo de prova, a contribuição aumentou para 83,1%.

As análises estatísticas conduzidas foram importantes para identificar que, após 1 ano de desenvolvimento a campo, as plantas de *P. sellowianus* contribuíram significativamente para o aumento da resistência ao cisalhamento pós-pico do solo, não influenciando significativamente em seu ângulo de atrito interno.

As tensões cisalhantes normalizadas, em linhas gerais, aumentaram de acordo com a classe de crescimento das plantas. Isso é um indício de que o método de seleção indireto, ou seja, por medição da parte aérea, pode, se melhor explorado, ser bastante útil na estimativa de contribuição das plantas para o reforço do solo, de modo que não seja necessário utilizar de procedimentos destrutivos, demorados e economicamente dispendiosos.

O solo com raízes sofreu menores deformações por compressão, indicando que as plantas também aumentam a capacidade do solo de suportar tensões verticais. Por outro lado, sob pequenas tensões normais, sofreu maiores deformações por expansão.

É importante destacar que as plantas de *P. sellowianus* proporcionaram reforço ao solo mesmo em condições restritivas (elevado teor de alumínio, acidez e deficiência nutricional) ao

seu desenvolvimento. Esta capacidade de se estabelecer e crescer em condições adversas deve ser entendida como altamente positiva, posto que, em obras de proteção e/ou estabilização de taludes, nem sempre se dispõe de substrato adequado ao desenvolvimento satisfatório das plantas.

Quanto ao desempenho do equipamento de cisalhamento direto *in situ*, pode-se dizer que o mesmo mostrou ser, juntamente com a metodologia assumida para os ensaios, adequado à obtenção de informações de resistência ao cisalhamento de solo com e sem plantas. A sua operação foi relativamente simples, envolvendo tarefas de pouca complexidade, tanto no preparado dos corpos de prova quanto na condução dos ensaios propriamente ditos. Talvez o maior inconveniente do aparelho tenha sido o seu transporte, visto que a sua composição total tem cerca de 250 kg (peso facilmente transportado em um automóvel tipo pick-up). Por outro lado, por ser composta de partes relativamente leves, uma vez na área dos ensaios, a montagem foi simples e não demandou grande esforço. Efetivamente, a realização dos ensaios se mostrou mais simples com o trabalho conjunto de 3 a 4 pessoas.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para o uso de plantas em intervenções de controle de processos erosivos e estabilização de taludes, cada vez mais, tem se exigido conhecimentos técnicos a respeito dessa nova classe de material construtivo.

No caso dos dimensionamentos geotécnicos, a inclusão de plantas na estabilização de taludes ainda é um desafio, visto que faltam informações quantitativas básicas, bem como elucidações a respeito do efeito provocado pelas raízes na resistência ao cisalhamento do solo. Esse tipo de estudo, apesar de importante, vem sendo pouco explorado principalmente em razão da inexistência de métodos e equipamentos padronizados para avaliação dos eventuais efeitos que sistema radiciais desempenham no reforço do solo.

Nesse contexto, um dos primeiros passos do presente trabalho foi escolher uma espécie e uma forma de propagação para realizar o estudo das questões supracitadas. Optou-se por *Phyllanthus sellowianus* devido às suas qualidades técnicas excepcionais, bem como pelo seu frequente uso em obras de Engenharia Natural no Sul do Brasil. Para o plantio da espécie, optou-se pela propagação vegetativa, usando a estacaria viva, uma das técnicas mais empregadas em Engenharia Natural devido à sua grande simplicidade.

Com base na literatura e em conhecimentos técnicos específicos, além de diversos testes e ajustes em laboratório e a campo, o equipamento de cisalhamento direto foi projetado e fabricado de acordo com as exigências de representatividade assumidas necessárias aos ensaios a serem realizados *in situ*.

Durante os ensaios, o equipamento de cisalhamento, apesar do peso do conjunto (cerca de 250 Kg), mostrou ser relativamente fácil de operar, além de ter apresentado resultados de cisalhamento coerentes com aqueles obtidos em equipamento de laboratório (para solo sem raízes). As disparidades naturalmente existentes entre os tipos de ensaios são explicadas por características intrínsecas às dimensões dos corpos de prova e também pelas diferentes tensões normais aplicadas.

Dado o volume de tarefas e o frequente ajuste e movimentação de componentes, o processo de realização dos ensaios se mostrou mais eficiente quando conduzido pelo trabalho conjunto de três a quatro pessoas. Contudo, por ser semiautomatizada, sempre que necessário, o equipamento pôde, facilmente, ser operado por duas pessoas.

Em linhas gerais, a obtenção de uma curva tensão-deformação, contabilizando a condução de equipamentos, coleta de material, preparo dos corpos de prova e cisalhamento

propriamente dito, consumiu cerca de cinco horas. Isso fez com que a obtenção de uma envoltória simples (3 corpos de prova), para um solo franco arenoso, envolvesse no mínimo dois dias trabalho. Assim, em solos com maiores teores de argila, devido à dissipação mais lenta das poro-pressões, o tempo para obtenção de uma envoltória em termos de tensão efetiva deve aumentar consideravelmente.

Frente à necessidade de selecionar plantas para os ensaios de resistência ao cisalhamento direto *in situ*, optou-se pelo uso de um método indireto. Nesse caso, utilizou-se a variável biométrica da parte aérea das plantas de *P. sellowianus* melhor correlacionada com a resistência à tração do sistema radicial. Para a espécie, a variável selecionada foi a soma da área transversal de brotos, que se mostrou de fácil obtenção, envolvendo apenas um paquímetro. O emprego do método se mostrou adequado visto que as tensões cisalhantes normalizadas, em linhas gerais, aumentaram com a classe de crescimento das plantas.

As plantas de *P. sellowianus*, após um ano de desenvolvimento, contribuíram consideravelmente para o reforço do solo, validando a hipótese  $H_1$  levantada no presente trabalho. Isso foi verificado pela influência que as estacas vivas e suas raízes tiveram nas envoltórias de resistência principalmente por incrementos proporcionados ao parâmetro coesão do solo (ou intercepto coesivo). Devido às raízes e estacas, aumentos relativos na resistência ao cisalhamento foram observados tanto nas envoltórias de resistência de pico (diferença de 15,6%) quanto nas envoltórias de resistência pós-pico (diferença de 83,1%). Contudo, as análises estatísticas indicaram que as plantas contribuíram significativamente apenas no aumento da resistência ao cisalhamento pós-pico do solo, e de que não tiveram influência no ângulo de atrito interno.

As plantas de *P. sellowianus*, após um período relativamente pequeno de desenvolvimento a campo (um ano), tiveram sucesso em proporcionar reforço ao solo mesmo com este apresentando restrições físicas (não foi preparado mecanicamente) e químicas (elevado teor de alumínio, acidez e deficiência nutricional) que prejudicaram o seu desenvolvimento. Por essas razões, é possível inferir que, sob condições normalmente estabelecidas em técnicas de Engenharia Natural, como é o caso da descompactação, correção e adubação do solo, as plantas poderiam contribuir ainda mais para a resistência ao cisalhamento.

Cruzando as superfícies de cisalhamento, além das estacas, poucas raízes foram observadas. A maioria das raízes ocorreu preferencialmente acima de 20 cm de profundidade. Isso mostra que, mesmo com poucos elementos lenhosos cruzando a superfície de ruptura, as

plantas de *P. sellowianus* propagadas por estacas foram capazes de conferir aumento significativo na resistência ao cisalhamento do solo.

Cabe destacar que os testes estatísticos para verificar igualdade de intercepto, paralelismo e coincidência são muito utilizados em crescimento e produção florestal, porém, dado o histórico bibliográfico observado, se mostrou uma abordagem inovadora no campo da Geotecnia para verificar diferença ou igualdade de valores de coesão (interceptos coesivos) e de ângulo de atrito interno (coeficientes angulares), de solos com e sem plantas. Esse tipo de análise, se adequadamente utilizada, pode ser bastante útil na tomada de decisão, para, por exemplo, escolher a composição mais adequada de espécies de acordo com o potencial individual ou conjunto de conferir reforço ao solo.

É importante mencionar que entre os resultados de ensaios de cisalhamento obtidos *in situ* e resultados de testes de cisalhamento obtidos em laboratório (observados na literatura) foram encontradas tendências semelhantes de reforço do solo pelas raízes. Isso é indicativo de que ensaios de resistência ao cisalhamento conduzidos em laboratório, apesar de não representarem satisfatoriamente as condições em que as plantas podem estar submetidas a campo, se mostram úteis para melhorar a compreensão dos mecanismos que levam uma planta e seu sistema radicial a se comportar como um elemento de reforço do solo.

No sentido de melhorar o entendimento e complementar os assuntos aqui abordados, outros estudos podem ser realizados. Merecem destaque os estudos relacionados às diferenças de contribuição de espécies vegetais já utilizadas em Engenharia Natural, bem como testes de diferentes densidades, idades, classes de crescimento e formas de propagação (vegetativa e seminal).

Como os resultados do presente estudo foram obtidos para condições mais próximas ao natural, ou seja, sem realizar a correção de acidez ou melhorar as características nutricionais e de estrutura física do solo, é interessante que, para simular condições comuns em obras de Engenharia Natural, em trabalhos futuros, o solo seja trabalhado em condições ideais ao desenvolvimento das plantas.

Com a ampliação dessas linhas de pesquisa, o equipamento de cisalhamento direto *in situ* pode receber aperfeiçoamentos continuados, que o levem a um conjunto final padronizado, assim como já existe para o equipamento de laboratório. Da mesma forma, o aspecto geral dos ensaios pode evoluir à elaboração de uma especificação técnica para padronizar os procedimentos de realização. Assim, ao longo do tempo, por meio da realização de ensaios uniformizados e padronizados, o efeito geral das plantas na resistência ao cisalhamento do solo poderá ser melhor compreendido, e a aplicação técnica desses elementos vivos, ser realizada

com maior grau de segurança, de modo que, pouco a pouco, além dos já reconhecidos benefícios ecológicos, paisagísticos e estéticos, as plantas passem também a ser reconhecidas por suas propriedades de engenharia.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDI, E.; MAJNOUNIAN, B.; RAHIMI, H.; ZOBEIRI, M. Distribution and tensile strength of Hornbeam (*Carpinus betulus*) roots growing on slopes of Caspian Forests, Iran. **Journal of Forestry Research**, v. 20, p. 105-110, 2009.

ABDI, E. Effect of oriental beech root reinforcement on slope stability (Hyrcanian Forest, Iran). **Journal of Forest Science**, v. 60, p. 166-173, 2014.

ABDULLAH, M. N.; OSMAN, M.; ALI, F. H. Soil-root shear strength properties of some slope plants. **Sains Malaysiana**, v. 40, n. 10, p. 1065-1073, 2011.

ABERNETHY, B.; RUTHERFORD, I. D. The distribution and strength of riparian tree roots in relation to riverbank reinforcement. **Hydrological Processes**, v. 15, n. 1, p. 63-79, 2001.

ABICHEQUER, A. D.; BOHNEN, H. Morfologia e distribuição de raízes de arroz irrigado por inundação e sua relação com a absorção de nutrientes e o rendimento de grãos. **Pesq. Agropec. Gaúcha**, v. 14, p. 13-20, 2008.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 11682**: Estabilidade de Encostas. Rio de Janeiro, 2009.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6459**: Solo – Determinação do Limite de Liquidez. Rio de Janeiro, 2016.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7180**: Solo – Determinação do Limite de Plasticidade. Rio de Janeiro, 2016.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7181**: Solo – Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, 2016.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6458**: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm – Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2016.

ALFENAS, A. C.; ZAUZA, E. A. V.; MAFIA, R. G.; ASSIS, T. F. **Clonagem e doenças de eucalipto**. Viçosa, MG: Imprensa Universitária, UFV, 2009. 500 p.



ALI, F. H.; OSMAN, N. Shear strength of a soil containing vegetation roots. **Soils and Foundations**, v. 48, n. 4, p. 587-596, 2008.

ALI, F.; OSMAN, R.; KAMIL, S. S. S. M. The influences of root branching patterns on pullout resistance. **EJGE**, v. 18, p. 3967-3977, 2013.

ALMEIDA, M.; ALMEIDA, C. V. **Morfologia da raiz de plantas com sementes**. Piracicaba, ESALQ-USP, 2014. 71 p.

ASTM. American Society for Testing and materials. **D3080/D3080M**. Standard Method for Direct Shear Test of Soils under Consolidated Drained Conditions. West Conshohocken, USA; 2011.

ATWELL, B. J.; KRIEDMANN, P. E.; TURNBULL, C. G. N. **Plants in Action: Adaptation in Nature, Performance in Cultivation**. South Yarra [Vic.], Macmillan Education Australia, 1999.

BAKER, R. Nonlinear Mohr envelopes based on triaxial data. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, ASCE, v. 130, n. 5, p. 498–506, 2004.

BENGOUGH, A.G.; MCKENZIE, B.M.; HALLETT, P.D.; VALENTINE, T.A. Root elongation, water stress, and mechanical impedance: a review of limiting stresses and beneficial root tip traits. **Journal of Experimental Botany**, v. 62, n. 1, p. 59-68, 2011.

BERROCAL, A.; BAEZA, J.; RODRÍGUEZ, J.; ESPINOSA, M.; FREER, J. Effect of tree age on variation of *Pinus radiata* D. Don chemical composition. **J. Chil. Chem. Soc.**, v. 49, p. 251–256, 2004.

BISCHETTI, G. B.; CHIARADIA, E. A.; SIMONATO, T.; SPEZIALI, B.; VITALI, B.; VULLO, P.; ZOCCO, A. Root strength and root area ratio of forests species in Lombardy (Northern Italy). **Plant and Soil**, v. 278, n. 1, p. 11-22, 2005.

BÖHM, W. **Methods of studying root systems**. Berlin Heilderberg: Springer-Verlag, v. 33, 1979. 188 p.

BRAJA, M. D. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica**. Tradução da 7ª ed. Norte Americana. São Paulo – Cengage Learning, 2013. 560 p.

BUCHANAN, P.; SAVIGNY, K. W. Factors controlling debris avalanche initiation. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 27, n. 5, p. 659–675, 1990.

BURYLO, M.; REY, F.; ROUMET, C.; BUISSON, E.; DUTOIT, T. Linking plant morphological traits to uprooting resistance in eroded marly lands (Southern Alps, France). **Plant and Soil**, v. 324, p. 31-42, 2009.

BURYLO, M.; HUDEK, C.; REY, F. Soil reinforcement by the roots of six dominant species on eroded mountainous marly slopes (Southern Alps, France). **Catena**, v. 84, p. 70-78, 2011.

BUSSAB, W. O.; MORETTIN, P. A. **Estatística básica**. Editora Atual, São Paulo, 1988.

CABRERA, A. L.; CORREA, M. N.; DAWSON, G.; FABRIS, H. A.; KRAPOVICKAS, A.; PONTIROLI, A. **Flora de la Provincia de Buenos Aires – Oxalidáceas a Umbelíferas**. Parte IV. Buenos Aires: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), 1965.

CAMMERAAT, E.; VAN BEEK, R.; KOOIJMAN, A. Vegetation succession and its consequences for slope stability in SE Spain. **Plant and Soil**, v. 278, n. 1, p. 135-147, 2005.

CAZZUFI, D.; CORNEO, A.; CRIPPA, E. Slope stabilization by perennial “gramineae” in Southern Italy: plant growth and temporal performance. **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 24, p. 429-447, 2006.

CLAGUE, J. J.; STEAD, D. **Landslides: Types, Mechanisms and Modeling**. Cambridge University Press, 2012. 435 p.

CLIMATE-DATA.ORG. Clima: São João do Polêsine. Disponível em: < <https://pt.climate-data.org/location/313449/> > Acesso em: 18 de novembro de 2017.

COMINO, E.; DRUETTA, A. *In situ* shear tests of soil samples with grass roots in Alpine Environment. **American Journal of Environmental Sciences**, v. 5, n. 4, p. 475-486, 2009.

COMINO, E.; MARENGO, P.; ROLLI, V. Root reinforcement effect of different grass species: A comparison between experimental and models results. **Soil and Tillage Research**, v. 110, n. 1, p. 60-68, 2010.

COPPIN, N. J.; RICHARDS, I. J. **Use of vegetation in civil engineering**. Construction Industry Research and Information Association, Butterworths, London, 2007. 312 p.

COULON, F. K.; GUSSO, L. C. Contribuição ao estudo da resistência ao cisalhamento dos argilitos da formação Rosário do Sul – RS. **Pesquisas**, Porto Alegre, v. 8, p. 43-58, 1977.

COUTTS, M. P. Root architecture and tree stability. **Plant and Soil**, v. 71, n. 1, p. 171-188, 1983.

DANJON, F.; KHUDER, H.; STOKES, A. Deep phenotyping of coarse root architecture in *R. pseudoacacia* reveals that tree root system plasticity is confined within its architectural model. **Plos One**, v. 8, n. 12, p. 1-15, 2013.

DECAGON DEVICES. **Operator's manual version 1.3 WP4-T dewpointmeter**. Pullman, 2000. 70p.

DE BAETS, S.; POESEN, J.; REUBENS, B.; WEMANS, K.; DE BAERDEMAEKER, J.; MUYS, B. Root tensile Strength and root distribution of typical Mediterranean plant species and their contribution to soil shear strength. **Plant and Soil**, v. 305, n. 1, p. 207-226, 2008.

DENARDI, L. **Anatomia e flexibilidade do caule de quatro espécies lenhosas para o manejo biotécnico de cursos de água**. 2007. 112 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

DIAS, M. A.; LOPES, J. C.; CORRÊA, N. B.; DIAS, D. C. F. S. Germinação de sementes e desenvolvimento de plantas de pimenta malagueta em função do substrato e da lâmina de água. **Revista Brasileira de Sementes**, vol. 30, n. 3, p. 115-121, 2008.

DOUGLAS, G. B.; MCIVOR, I. R.; POTTER, J. F.; FOOTE, L. G. Root distribution of poplar at varying densities on pastoral hill country. **Plant Soil**, v. 333, p. 147-161, 2010.

DOURADO-NETO, D.; NIELSEN, D.R.; HOPMANS, J.W.; REICHARDT, K.; BACCHI, O.O.S. Software to model soil water retention curves (SWRC, version 2.00). **Scientia Agricola**, vol.57, n.1, p. 191-192, 2000.

DUNNE, T.; LEOPOLD, L. B. **Water in environmental planning**. 1ªed. San Francisco: W.H. Freeman & Company San Francisco, 1978. 818 p.

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

EL-KHOULY, M. **Analysys of soil-reinforcement interaction**. 1995. 225 f. Ph.D. Thesis – Ohio State University, 1995.

ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA. **Coefficient of determination**. Publicado em 2017. Disponível em: <<https://www.britannica.com/science/coefficient-of-determination>> Acesso em: 01 de novembro de 2017.

ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA. **Regression** (2014). Publicado em 2014. Disponível em: <<https://www.britannica.com/science/coefficient-of-determination>> Acesso em: 05 de novembro de 2017.

ENDO, T. Effect of tree roots upon the shear strength of soil. **Japan Agricultural Research Quarterly**, v. 14, n. 2 p.112-115, 1980.

ESTATCAMP. **Software Action**. Estatcamp – Consultoria em estatística e qualidade, São Carlos, São Paulo, 2014.

FAN, C.; CHEN, Y. The effect of root architecture on the shearing resistance of root-permeated soils. **Ecological Engineering**, v. 36, p. 813–826, 2010.

FAN, C. C.; SU, C. F. Role of roots in the shear strength of root-reinforced soils with high moisture content. **Ecological Engineering**, v. 33, n. 2, p. 157-166, 2008.

FAN, C. C. A displacement-based model for estimating the shear resistance of root-permeated soils. **Plant and Soil**, v. 355, p. 103-119, 2012.

FELLENIOUS, W. Calculations of the stability of earth dams. In: Trans. 2nd Congress on Large Dams, Washington DC, v. 4, 1936. 445 p.

FERREIRA, C. S.; PIEDADE, M. T. F.; FRANCO, A. C.; GONÇALVES, J. F. C.; JUNK, W. J. Adaptative strategies to tolerate prolonged flooding in seedlings of floodplain and upland populations of *Himatanthus sucuuba*, a Central Amazon tree. **Aquatic Botany**, v. 90, n. 3, p. 246-252.

FERREIRA, B. G. A.; ZUFFELLATO, R. K. C.; CARPANEZZI, A. A.; TAVARES, F. R.; KOEHLER, H. S. Metodologias de aplicação de AIB no enraizamento de estacas semilenhosas de *Sapium gladulatum* (Vell.) Pax. **Rev. Bras. Pl. Med.**, v. 11, n. 2, p. 196-201, 2009.

FIORI, A. P.; CARMIGNANI, L. **Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas: aplicações na estabilidade de taludes**. 2ª ed. Revisada e ampliada. Ed. UFPR – Curitiba, PR, 2009. 604 p.

FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H. **Soil mechanics for unsaturated soils**. John Wiley & Sons, New York, 1993. 517 p.

GENET, M.; STOKES, A.; SALIN, F.; MICKOVSKI, S. B.; FOURCAUD, T.; DUMAIL, J. F.; VAN BEEK, R. The influence of cellulose content on tensile strength in tree roots. **Plant and Soil**, v. 278, n. 1, p. 1-9, 2005.

GERSCOVICH, D. M. **Estabilidade de taludes**. 2ªed. Oficina de Textos: São Paulo, 2016. 192 p.

GHESTEM, M.; VEYLON, G.; BERNARD, A.; VANEL, Q.; STOKES, A. Influence of plant root system morphology and architectural traits on soil shear resistance. **Plant and Soil**, v. 377, n. 1, p. 43-61, 2014.

GOLDSMITH, W.; GRAY, D.; MCCULLAH, J. **Bioengineering case studies: sustainable streambank and slope stabilization**. Springer-Verlag New York Inc., 2013, 244 p.

GOMES, F. P. **Curso de Estatística Experimental**. Piracicaba-SP. ESALQ/USP, 1985. 430 p.

GONÇALVES, J. F. C.; MELO, E. G. F.; SILVA, C. E. M.; FERREIRA, M. J.; JUSTINO, G. C. Estratégias no uso da energia luminosa por plantas jovens de *Genipa spruceana* Steyerm submetidas ao alagamento. **Acta Botanica Brasilica**, v. 26, n. 2, p. 391-398, 2012.

GONÇALVES, J. F. C.; MELO, E. G. F.; FERREIRA, M. J.; SILVA, C. E. M.; GOMES, I. B. Crescimento, partição de biomassa e fotossíntese em plantas jovens de *Genipa spruceana* submetidas ao alagamento. **Cerne**, v. 19, n. 2, p. 193-200, 2013.

GRAF, F.; FREI, M.; BÖLL, A. Effects of vegetation on the angle of internal friction of a moraine. **For. Snow Landsc. Res.**, v. 82, n. 1, p. 61-77, 2009.

GRAY, D. H.; LEISER, A. J. **Biotechnical Slope Protection and Erosion Control**. Van Nostrand Reinhold, New York, 1982. 271 p.

GRAY, D. H.; SOTIR, R. B. **Biotechnical and Soil Bioengineering Slope Stabilization**. John Wiley and Sons, Inc., New York, 1996. 400 p.

GRAY, D.; OHASHI, H. Mechanics of fiber reinforcement in sand. **Journal of Geotechnical Engineering**, v. 109, p. 335–353, 1983.

GREENWAY, D. R. Vegetation and slope stability. In: ANDERSON, M. G.; RICHARDS, K. S. (eds.), **Slope stability**, New York: Wiley, 1987. p. 187-230.

GREENWOOD, J. R. A simple approach to slope stability. **Ground Engineering**, v. 16, n. 4, p. 45-98, 1983.

GUIDICINI, G.; NIEBLE, C. M. **Estabilidade de taludes naturais e de escavação**. Ed. Blucher, 2ª ed., São Paulo, 1983.

HALES, T. C.; FORD, C. R.; HWANG, T.; VOSE, J. M.; BAND, L. E. Topographic and ecologic controls on root reinforcement. **Journal of Geophysical Research**, v. 114, n. F03013, p. 1-17, 2009.

HALES, T. C.; HAWTHORNE, C. C.; LOVELL, L.; EVANS, S. L. Assessing the accuracy of simple field based root strength measurements. **Plant and Soil**, v. 372, n. 1, p. 553-565, 2013.

HATHAWAY, R. L.; PENNY, D. Root strength in some Populus and Salix clones. **N. Z. J. Bot.** v. 13, p. 333–343, 1975.

HÖRBINGER, S. **A pull out test of Phyllanthus sellowianus and Sebastiania schottiana and development of soil bioengineering constructions in southern Brazil**. 2013. 91 f. Master thesis - Universität für Bodenkultur Wien, Wien, 2013.

HUBBLE, T. C. T. Improving the stream of consciousness: A nomenclature for describing the factor of safety in river bank stability analysis. **Ecological Engineering**, v. 36, n. 12, p. 1765-1768, 2010.

IAEG. International Association for Engineering Geology. Classification of rocks and soils for engineering geological mapping. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, v. 19. n. 1, 1979.

KARRENBERG, S.; BLASER, S.; KOLLMANN, J.; SPECK, T.; EDWARDS, P.J. Root anchorage of saplings and cuttings of woody pioneer species in a riparian environment. **Functional Ecology**, v. 17, n. 2, p. 170–177, 2003.

KHUDER H, STOKES A, DANJON F, GOUSKOU K. Is it possible to manipulate root anchorage in young trees?. **Plant Soil**, v. 294, p. 87-102, 2007.

KLAMT, E.; DALMOLIN, R. S. D.; CABRAL, D. R. **Solos do município de São João do Polêsine: características, classificação, distribuição geográfica e aptidão de uso**. Santa Maria: Departamento de Solos/CCR/UFMS, 1997, 93p.

KLEIN, V. A. **Física do solo**. Universidade de Passo Fundo, 3ª ed., 2014. 263 p.

KOKUTSE, N.; FOURCAUD, T.; KOKOU, K.; NEGLO, K.; LAC, P. 3D numerical modelling and analysis of the influence of forest structure on hill slopes stability. In: MARUI, H.; MARUTANI, T.; WATANABE, N.; KAWABE, H.; GONDA, Y.; KIMURA, M.; OCHIAI, H.; OGAWA, K.; FIEBIGER, G.; HEUMADER, J.; RUDOLF-MIKLAU, F.; KIENHOLZ, H.; MIKOS, M. (Eds) *Interpraevent 2006: Disaster mitigation of debris flows, slope failures and landslides*. Universal Academy Press, Tokyo, 2006. p. 561–567.

KÖPPEN, W. **Climatologia: com um estúdio de los climas de la Tierra**. México: Fondo de Cultura Economica, 1948. 478p.

LAMBE, T. W.; WHITMAN, R. V. **Soil Mechanics**. New York: J. Wile, 1969. 553 p.

LAWRENCE, C. J.; RICKSON, R. J.; CLARK, J. E. The effect of grass roots on the shear strength of colluvial soils in Nepal. In ANDERSON, M. G.; BROOKS, S. M. (Eds), **Advances in Hillslope Processes**, John Wiley, Chichester, p. 857-868, 1996.

LEMOS, R. C.; AZOLIM, M. A. D.; ABRÃO, P. U. R.; SANTOS, M. C. L. **Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado do Rio Grande do Sul**. Recife: Ministério da Agricultura – Departamento Nacional de Pesquisa Agropecuária – Divisão de Pesquisa Pedológica, 1973, 431 p.

LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop production. **Advances in Soil Sciences**, v. 1, n. 1, p. 277-293, 1985.

LIU, Y.; RAUCH, H.P.; ZHANG, J.; YANG, X.; GAO, J. Development and soil reinforcement characteristics of five native species planted as cuttings in local area of Beijing. **Ecological Engineering**, v. 71, n. 1, p. 190-196, 2014.

LOADES, K.W.; BENGOUGH, A.G.; BRANSBY, M.F.; HALLETT, P.D. Biomechanics of nodal, seminal and lateral roots of barley: effects of diameter, waterlogging and mechanical impedance. **Plant and Soil**, v. 370, n. 1-2, p. 407-418, 2013a.

LOADES, K.W.; BENGOUGH, A.G.; BRANSBY, M.F.; HALLETT, P.D. Reinforcement of soil by fibrous roots. In: TIMLIN, D.; AHUJA, L.R. (Eds.) **Enhancing Understanding and Quantification of Soil–Root Growth Interactions**, Adv. Agric. Syst. Model. 4. ASA, CSSA, SSSA., Madison, WI, p. 197-228, 2013b.

LOADES, K.W.; BENGOUGH, A.G.; BRANSBY, M.F.; HALLETT, P. D. Effect of root age on the biomechanics of seminal and nodal roots of barley (*Hordeum vulgare* L.) in contrasting soil environments. **Plant and soil**, v. 395, n. 1-2, p. 253-261, 2015.

LOADES, K.W.; BENGOUGH, A.G.; BRANSBY, M.F.; HALLETT, P.D. Planting density influence on fibrous root reinforcement of soils. **Ecological Engineering**, v. 36, n. 3, p. 276-284, 2010.

MANTOVANI, N.; ROVEDA, M.; TRES, L.; FORTES, F. O.; GRANDO, M. F. Cultivo de canafístula (*Peltophorum dubium*) em minijardim clonal e propagação por miniestacas. **Ciência Florestal**, v. 27, n. 1, p. 225-236, 2017.

MANUAL DE CALAGEM E ADUBAÇÃO PARA OS ESTADOS DO RIO GRANDE DO SUL E DE SANTA CATARINA. 11. ed. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Núcleo Regional Sul, Comissão de Química e Fertilidade do Solo - RS/SC, 2016. p. 376.

MASSAD, F. **Obras de Terra: Curso Básico de Geotecnia**. 2ª ed., São Paulo, 2010. 216 p.

MATTIA, C.; BISCHETTI, G. B.; GENTILE, F. Biotechnical characteristics of root systems of typical Mediterranean species. **Plant and Soil**, v. 278, n. 1, p. 23-32, 2005.

MICKOVSKI, S. B.; VAN BEEK, L. P. H. Root morphology and effects on soil reinforcement and slope stability of young vetiver (*Vetiveria zizanioides*) plants grown in semi-arid climate. **Plant and Soil**, v. 324, n. 1, p. 43-56, 2009.

MINITAB. **Regression analysis: How do I interpret R-squared and assess the goodness-of-fit**. Disponível em: <<http://blog.minitab.com/blog/adventures-in-statistics-2/regression-analysis-how-do-i-interpret-r-squared-and-assess-the-goodness-of-fit>> Acesso em: 25 de novembro de 2017.



MOREIRA, M. F. **Desenvolvimento do sistema radicular e da parte aérea do feijoeiro comum em função da distribuição e do teor de fósforo no solo**. 2004. 135 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2004.

MORGAN, R. P. C.; RICKSON, R. J. **Slope stabilization and erosion control: A bioengineering approach**. London: E & FN SPON, 1995. 274 p.

NICACIO, P. R. **Enraizamento adventício de miniestacas de *Mezilaurus itauba***. 2016. 93 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Mato Grosso, Cuiabá, 2016.

NICOLL, B. C.; GARDINER, B. A.; RAYNER, B.; PEACE, A. B. The architecture of *Picea sitchensis* structural root systems on horizontal and sloped terrain. **Trees**, v. 20, n. 6, p. 701-712, 2006.

NILAWEEERA, N. S.; NUTALAYA, P. Role of tree roots in slope stabilization. **Bulletin on Engineering Geology and the Environment**, v. 57, n. 4, p. 337-342, 1999.

NORRIS, J. E.; GREENWOOD, J. R.; ACHIM, A.; GARDINER, B. A.; NICOLL, B. C.; CAMMERAAAT, E.; MICKOVSKI, S. B. Hazard Assessment of Vegetated Slopes. In: NORRIS, E. J.; STOKES, A.; MICKOVSKI, S. B.; CAMMERAAAT, E.; VAN BEEK, R.; NICOLL, B. C.; ACHIM, A. (eds.) **Slope Stability and Erosion Control: Ecotechnological Solutions**. Springer, Dordrecht, Netherlands, p. 119-166., 2008.

O'LOUGHLIN, C. L.; ZIEMER, R. R. The importance of root strength and deterioration rates upon edaphic stability in steep-land forests: In: Warren, R. H. (ed.). Carbon uptake and allocation in subalpine ecosystems as a key to management. **Proceedings of an I.U.F.R.O.**, Oregon State University, Corvallis, Oregon, USA, p. 70-78, 1982.

ÖBERG, A.; SÄLLFORS, G. Determination of shear strength parameters of unsaturated silts and sands based on the water retention curve. **Geotechnical Testing Journal**, v. 20, p. 40-48, 1997.

OPERSTEIN, V.; FRYDMAN, S. The influence of vegetation on soil strength. **Ground Improvement**, v. 4, n. 2, p. 81-89, 2000.

PATTON, A.R.; GIESEKER, L. Seasonal changes in the lignin and cellulose content of some Montana grasses. **J. Anim. Sci.**, v. 1, p. 22-26, 1942.

PINHEIRO, R. J. B. **Estudo de alguns casos de instabilidade da encosta da Serra Geral no estado do Rio Grande do Sul**. 2000. 318 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

POLLEN, N.; SIMON, A. Estimating the mechanical effects of riparian vegetation on stream bank stability using a fiber bundle model. **Water Resources Research**, v. 41, n. 7, p. 1-11, 2005.

PRETI, F.; GIADROSSICH, F. Root reinforcement and slope bioengineering stabilization by Spanish Broom (*Spartium junceum* L.). **Hydrology and Earth System Science**, v. 13, n. 1, p. 1713-1726, 2009.

RAMBO, B. **A fisionomia do Rio Grande do Sul: ensaio de monografia natural**. 3 ed. São Leopoldo: Ed. Unisinos, 2005. 473 p.

REUBENS, B.; POENSEN, J.; DANJON, F.; GEUDENS, G.; MUYS, B. The role of fine and coarse roots in shallow slope stability and soil erosion control with a focus on root system architecture: a review. **Trees**, v. 21, n. 4, p. 385-402, 2007.

SCAPINELLI, A.; DEINA, F. R.; JUNIOR, D. D. V.; VALADÃO, F. C. A.; PEREIRA, L. B. Sistema radicular e componentes produtivos do girassol em solo compactado. **Bragantia**, v. 75, p. 474-486, 2016.

SCHNEIDER, P. R.; SCHNEIDER, P. S. P.; SOUZA, C. A. M. **Análise de regressão aplicada à Engenharia Florestal**. FACOS-UFSM, 294 p., Santa Maria, 2009.

SCHIECHTL, H. M. **Bioingegneria Forestale. Basi materiali da costruzioni vivi – metodi**. Tipolitografia Castaldi-Feltre, 1973. 263 p.

SCHIECHTL, H. M.; STERN, R. **Ground bioengineering techniques for Slope protection and erosion control**. Blackwell Science Publications, Oxford, 1996. 176 p.

SCHIECHTL, H. M.; STERN, R. **Water bioengineering techniques for watercourse, bank and shoreline protection**. Blackwell Science Publications, Oxford, 1997. 186 p.

SCHMIDT, K. M.; ROERING, J. J.; STOCK, J. D.; DIETRICH, W. E.; MONTGOMERY, D. R.; SHAUB, T. The variability of root cohesion as an influence on shallowlandslide susceptibility in the Oregon Coast Range. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 38, n. 5, p. 995–1024, 2001.

SCHWARZ, M.; COHEN, D.; OR, D. Root-soil mechanical interactions during pullout and failure of root bundles. **Journal of Geophysical Research**, v. 115, n. 4, p. 1-19, 2010a.

SCHWARZ, M.; PRETI, F.; GIADROSSICH, F.; LEHMANN, P.; OR, D. Quantifying the role of vegetation in slope stability: A case study in Tuscany (Italy). **Ecological Engineering**, v. 36, n. 3, p. 285-291, 2010b.

SCHWARZ, M.; GIADROSSICH, F.; COHEN, D. Modeling root reinforcement using a root-failure Weibull survival function. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 17, n. 11, p. 4367-4377, 2013.

SCHWARZ, M.; COHEN, D.; OR, D. Spatial characterization of root reinforcement at stand scale: Theory and case study. **Geomorphology**, v. 171-172, p. 190-200, 2012.

SCHWARZ M.; RIST, A.; COHEN, D.; GIADROSSICH, F.; EGOROV, P.; BÜTTNER D, STOLZ, M.; THORMANN, J. J. Root reinforcement of soils under compression. **J. Geophys. Res. Earth Surf**, 2015; 120: 2103-2120.

SHENG, D.; FREDLUND, D. G.; GENS, A. A new modelling approach for unsaturated soils using independent stress variables. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 45, n. 4, p. 511–534, 2008.

SHEWBRIDGE, S.E.; AND SITAR, N. Deformation characteristics of reinforced sand in direct shear. **Journal of Geotechnical Engineering**, v. 115, p. 1134–1147, 1989.

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

SOUSA, R. S.; MAFFRA, C. R. B.; SUTILI, F. J. Aspectos técnicos das plantas utilizadas em Engenharia Natural. **Revista Ciência e Ambiente**, v. 46-47, p. 31-71, 2017.

STOKES, A.; MATTHECK, C. Variation of root strength in tree roots. **Journal Experimental Botany**, v. 47, n. 5, p. 693-699, 1996.

STOKES, A.; NORRIS, J. E.; VAN BEEK, L. P. H.; BOGAARD, T.; MICKOVSKI, S. B.; JENNER, A.; DI LORIO, A.; FOURCAUD, T. How vegetation reinforces soil on slopes. In: NORRIS, E. J.; STOKES, A.; MICKOVSKI, S. B.; CAMMERAAT, E.; VAN BEEK, R.; NICOLL, B. C.; ACHIM, A. (eds.) **Slope Stability and Erosion Control: Ecotechnological Solutions**. Springer, Dordrecht, Netherlands, p. 65-118, 2008.

STUEPP, C. A.; PEREIRA, G. P.; ZEM, L. M.; PEÑA, M. L.; BUENO, M. C. B.; SPADER, V.; RIBAS, K. C. Z.; ROSA, G. M. Enraizamento de melaleuca: influência da altura de coleta das estacas e aplicação de IBA. **Colloquium Agrariae**, v. 9, p. 01-09, 2013.

STYCZEN, M. E.; MORGAN, R. P. C. Engineering Properties of Vegetation. In: MORGAN, R. P. C.; RICKSON, R. J. (eds) **Slope Stabilization and Erosion control: A Bioengineering Approach**. E&FN Spon, London, p. 5-58, 1995.

SUTILI, F. J. **Bioengenharia de Solos no âmbito fluvial do Sul do Brasil**. 2007. 95 p. Tese de Doutorado, Universidade Rural de Viena, Viena, Austria, 2007.

SUTILI, F. J.; DENARDI, L.; DURLO, M. A.; RAUCH, H. P.; WEISSTEINER, C. Flexural behavior of selected riparian plants under static load. **Ecological Engineering**, v. 43, p. 85-90, 2012.

TOBIAS, S. Shear strength of the soil root bond system. In: BARKER, D. H. **Vegetation and slopes**. Thomas Telford, London, 1995. p. 280–285.

VAN BEEK, R.; CAMMERAAT, E.; ANDREU, V.; MICKOVSKI, S. B. Hillslope processes: mass wasting, slope stability and erosion. In: NORRIS, E. J.; STOKES, A.; MICKOVSKI, S. B.; CAMMERAAT, E.; VAN BEEK, R.; NICOLL, B. C.; ACHIM, A. (eds.) **Slope Stability and Erosion Control: Ecotechnological Solutions**. Springer, Dordrecht, Netherlands, 2008. p. 17-64.

VAN GENUCHTEN, M. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 44, p. 892-898, 1980.

VANAPALLI, S. K.; FREDLUND, D. G.; PUF AHL, D. E.; CLIFTON, A. W. Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 33, n. 3, p. 379–392, 1996.

VERGANI, C.; CHIARADIA, E. A.; BASSANELLI, C.; BISCHETTI, G. B. Root strength and density decay after felling in a Silver Fir-Norway stand in the Italian Alps. **Plant and Soil**, v. 377, n. 1, p. 63-81, 2014.

VEYLON, G.; GHESTEM, M.; STOKES, A.; BERNARD A. Quantification of mechanical and hydric components of soil reinforcement by plant roots. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 52, n. 11, p. 1-11, 2015.

WALDRON, L. J. The shear resistance of root-permeated homogeneous and stratified soil. **Soil Science Society of America Journal**, v. 41, n. 5, p. 843-849, 1977.

WALDRON, L. J.; DAKESSIAN, S.; NEMSON, J. A. Shear resistance enhancement of 1.22-meter diameter soil cross sections by pine and alfalfa roots. **J. Soil Sci. Soc. Am.**, v. 49, p. 9-14, 1983.

WOLLE, C. M.; CARVALHO, C. S. Deslizamentos em encostas na Serra do Mar – Brasil. **Solos e Rochas**, v. 12, n. 1, p. 27-36, 1989.

WU, T. H. Investigation of landslides on Prince of Wales Island. **Geotechnical Engineering Report 5**, Civil Engineering Department, Ohio State University, Columbus, Ohio, USA, 1976. 106 p.

WU, T. H. Soil movements on permafrost slopes near Fairbanks, Alaska. **Can. Geotech. Journal**, 21, 377-412, 1984.

WU, T. H.; MCOMBER, R. M.; ERB, R. T.; BEAL, P. E. Study of soil-root interaction. **Journal of Geotechnical Engineering**, v. 114, n. 12, p. 1351-1375, 1988.

WU, T. H. Slope stabilization. In: MORGAN, R. P. C.; RICKSON, R. J. (eds.). **Slope Stabilization and Erosion Control: A Bioengineering Approach**. London: E & FN Spon, 1995. p. 233-282.

WU, T. H.; WATSON, A. In situ shear tests of soil blocks with roots. **Can. Geotech. Journal**, v. 35, p. 579-590, 1998.

WU, T. H. Root reinforcement of soil: review of analytical models, test results, and applications to design. **Can. Geotech. Journal**, v. 50, n. 3, p. 259-274, 2013.

WU, T. H.; MCKINNELL, W. P.; SWANSTON, D. N. Strength of tree roots and landslides on Prince of Wales Island, Alaska. **Can. Geotech. Journal**, v. 16, n. 1, p. 19-33, 1979.

WU, T. H.; KOKESH, C. M.; TRENNER, B. R.; FOX, P. J. Use of live poles for stabilization of a shallow slope failure. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 140, n. 10, p. 1-13, 2014.

XIAO, H.; HUANG, G.; MA, Q.; ZHU, J.; HONG, R. Research on direct shear test of undisturbed root-soil composition. **Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology**, v. 7, n. 6, p. 997–1000, 2014.

ZHANG, C. B.; CHEN, L. H.; LIU, Y. P.; JI, X. D; LIU, X. P. Triaxial compression test of soil-root composites to evaluate influence of roots on soil shear strength. **Ecological Engineering**, v. 36, p. 19–26, 2010.

ZHANG, C. B.; CHEN, L. H.; JIANG, J. Why fine roots are stronger than thicker roots: The role of cellulose and lignin in relation to slope stability. **Geomorphology**, v. 206, n. 1, p. 196-202, 2014.

ZIEMER, R. R.; SWANSTON D. N. Root strength changes after logging in southeast Alaska. USDA Forest Service, **Research Note** PNW-306. Forest Service, USDA, Portland, 1977, 10 p.

ZIEMER, R. R. Roots and shallow stability slopes. *Int. Ass. Hydrol. Sci.*, v. 132, p. 343-361, 1981.

## APÊNDICES

### APÊNDICE A – Análise de normalidade dos dados de soma de área transversal de brotos

Quando o P-valor for maior do que 0,05, aceita-se a hipótese de normalidade dos dados. Os resultados são apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 – Normalidade dos dados de soma de área transversal de brotos.

Testes	Estatísticas	P-valores
Anderson - Darling	0,5139	0,1894
Kolmogorov - Smirnov	0,0627	0,2769
Shapiro - Wilk	0,9836	0,1428

## APÊNDICE B – Análise de variância das regressões lineares

Na Análise de Variância (ANOVA), verifica-se se a variável explicativa é significativa para o modelo linear. Para tanto são testadas as seguintes hipóteses:

H0: Não existe relação linear significativa entre as variáveis explicativa (tensão normal) e dependente (tensão cisalhante);

H1: Existe relação linear significativa entre as variáveis explicativa (tensão normal) e dependente (tensão cisalhante).

Para que a variável dependente seja significativa para o modelo, o seu P-valor deve ser menor que 0,05. Os resultados são apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 – Análise de variância (ANOVA) dos dados de resistência ao cisalhamento direto *in situ*. As análises foram conduzidas para as resistências de pico e pós-pico de solo com e sem plantas *P. sellowianus*.

<b>RESISTÊNCIA DE PICO</b>					
<b>Solo sem Plantas</b>					
Fatores	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P-valor
Tensão normal	1	273,9379	273,9379	158,9546	2,2690E-10
Resíduos	18	31,0207	1,7234		
<b>Solo com Plantas</b>					
Fatores	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P-valor
Tensão normal	1	274,4598	274,4598	58,2198	4,7766E-07
Resíduos	18	84,8557	4,7142		
<b>RESISTÊNCIA PÓS-PICO</b>					
<b>Solo sem Plantas</b>					
Fatores	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P-valor
Tensão normal	1	350,6095	350,6095	142,9620	5,349E-10
Resíduos	18	44,1444	2,4525		
<b>Solo com Plantas</b>					
Fatores	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P-valor
Tensão normal	1	315,8865	315,8865	88,0153	2,3630E-08
Resíduos	18	64,6019	3,5890		



## APÊNDICE C – Condicionantes das regressões

### Homogeneidade de variância

No teste de homogeneidade de variância são testadas as seguintes hipóteses:

H0: As variâncias são iguais (erros homocedásticos);

H1: As variâncias não são iguais (erros heterocedásticos).

Quando o P-valor for maior do que 0,05, aceita-se a hipótese de que o conjunto de dados apresenta homogeneidade de variância, ou de que apresentam homocedasticidade. Os resultados são apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 – Teste de homogeneidade da variância dos dados de resistência ao cisalhamento direto *in situ*. As análises foram conduzidas para as resistências de pico e pós-pico de solo com e sem plantas *P. sellowianus*.

<b>RESISTÊNCIA DE PICO</b>		
<b>Informação</b>	<b>Solo sem plantas</b>	<b>Solo com plantas</b>
Bartlett (estatística do teste)	6,9975	1,2619
P-valor	0,0720	0,7382
<b>RESISTÊNCIA PÓS-PICO</b>		
<b>Informação</b>	<b>Solo sem plantas</b>	<b>Solo com plantas</b>
Bartlett (estatística do teste)	0,5486	0,5486
P-valor	0,9081	0,9081

### Normalidade dos resíduos

Para verificar a normalidade dos resíduos do conjunto de dados, as seguintes hipóteses são testadas:

H0: Os dados seguem uma distribuição normal;

H1: Os dados não seguem uma distribuição normal.

Quando o P-valor for maior do que 0,05, aceita-se a hipótese de normalidade dos dados. Os resultados são apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 - Teste de normalidade dos resíduos dos dados de resistência ao cisalhamento direto *in situ*. As análises foram conduzidas para as resistências de pico e pós-pico de solo com e sem plantas *P. sellowianus*.

<b>RESISTÊNCIA DE PICO</b>				
<b>Informação</b>	<b>Solo sem plantas</b>		<b>Solo com plantas</b>	
	Estatística	P-valor	Estatística	P-valor
Anderson-Darling	0,2655	0,6546	0,2453	0,7252
Shapiro-Wilk	0,9707	0,7692	0,9572	0,4894
Kolmogorov-Smirnov	0,0988	0,8760	0,1051	0,8141

<b>RESISTÊNCIA PÓS-PICO</b>				
<b>Informação</b>	<b>Solo sem plantas</b>		<b>Solo com plantas</b>	
	Estatística	P-valor	Estatística	P-valor
Anderson-Darling	0,3544	0,4262	0,2575	0,6825
Shapiro-Wilk	0,9551	0,4510	0,9604	0,5525
Kolmogorov-Smirnov	0,1307	0,4951	0,1177	0,6628

### Independência dos resíduos

Para verificar a independência dos resíduos dos conjuntos de dados, as seguintes hipóteses são testadas.

H0: Observações são independentes;

H1: Observações não são independentes.

Quando o P-valor for maior que 0,05, aceita-se a hipótese de que os resíduos dos dados são independentes (não apresentam autocorrelação). Os resultados são apresentados na Tabela 17.

Tabela 17 – Teste de independência dos resíduos dos dados de resistência ao cisalhamento direto *in situ*. As análises foram conduzidas para as resistências de pico e pós-pico de solo com e sem plantas *P. sellowianus*.

<b>RESISTÊNCIA DE PICO</b>				
<b>Informação</b>	<b>Solo sem plantas</b>		<b>Solo com plantas</b>	
	Estatística	P-valor	Estatística	P-valor
Durbin-Watson	1,9468	0,3566	1,9844	0,3892

<b>RESISTÊNCIA PÓS-PICO</b>				
<b>Informação</b>	<b>Solo sem plantas</b>		<b>Solo com plantas</b>	
	Estatística	P-valor	Estatística	P-valor
Durbin-Watson	1,6271	0,1335	1,6665	0,1546

## APÊNDICE D – Anova da Comparação de Curvas

### Análise de variância do Modelo de regressão linear com variável dummy

Na Tabela 18 apresenta-se a análise de variância do modelo de regressão com variável dummy. A significância da variável explicativa (tensão normal) e da variável Dummy (solo com e sem raízes ou plantas) para o modelo é testada pelas seguintes hipóteses:

H0: a variável é significativa para o modelo;

H1: a variável é não significativa para o modelo.

Valores de P-valor menores que 0,05 indicam que a variável é significativa para o modelo.

Tabela 18 – Análise de variância do modelo de regressão linear com variável Dummy. As análises foram conduzidas para os resultados dos ensaios de cisalhamento direto *in situ*, especificamente para as resistências de pico e pós-pico de solo com e sem plantas *P. sellowianus*.

RESISTÊNCIA DE PICO					
Fatores	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P-valor
Tensão normal	1	547,4883	547,4883	170,0914	3,31E-15
Matriz (com e sem raízes)	1	10,8884	10,8884	3,3828	0,0741
Normal:Matriz	1	0,0711	0,0711	0,0221	0,8827
Resíduos	36	115,8764	3,2188		
RESISTÊNCIA PÓS-PICO					
Fatores	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P-valor
Tensão normal	1	663,4544	663,4544	219,6337	6,73E-17
Matriz (com e sem raízes)	1	54,3460	54,3460	17,9910	1,48E-04
Normal:Matriz	1	0,9582	0,9582	0,3172	0,5768
Resíduos	36	108,7463	3,0207		

## APÊNDICE E – Comparação de curvas com contribuição das plantas para a resistência ao cisalhamento do solo estimada para 2, 3, 4 e 5 anos de desenvolvimento a campo.

Na Tabela 19 é apresentado o comparativo das curvas, ou envoltórias de resistência, elaboradas para a resistência de pico para solo com e sem plantas de *P. sellowianus*. Os dados determinados a campo são aqueles de 1 ano (de desenvolvimento das plantas), enquanto os de 2, 3, 4 e 5 anos foram estimados a partir dos dados observados de 1 ano. Na Tabela 19 não aparece uma distinção entre análise do solo com e sem plantas, uma vez que as duas condições estão inclusas na mesma análise para gerar conclusões como: as retas têm o mesmo intercepto ou as retas não têm o mesmo intercepto, as retas são paralelas ou as retas não são paralelas, as retas são coincidentes ou as retas não são coincidentes. Isso é decidido com base no P-valor, que normalmente é de 5% (ou 0,05).

Tabela 19 – Verificação dos efeitos das plantas pelos testes de igualdade de intercepto, paralelismo e coincidência de curvas. As análises foram realizadas para os dados de resistência de pico para plantas com 1 ano de desenvolvimento e para estimativas realizadas para plantas com 2, 3, 4 e 5 anos de desenvolvimento a campo. A hipótese de igualdade entre valores é aceita se P-valor for maior que 0,05.

<b>Testes de Comparação</b>				
<b>1 ANO</b>				
	<b>G.L.</b>	<b>Soma de Quadrados</b>	<b>Estat. F</b>	<b>P-valor</b>
Igualdade do Intercepto	1	3,0425	0,9452	0,3374
Paralelismo	1	0,0711	0,0221	0,8827
Coincidência	2	10,9595	1,7024	0,1966
<b>2 ANOS</b>				
	<b>G.L.</b>	<b>Soma de Quadrados</b>	<b>Estat. F</b>	<b>P-valor</b>
Igualdade do Intercepto	1	14,3168	8,2268	0,0069
Paralelismo	1	0,0844	0,0485	0,8269
Coincidência	2	59,6648	17,1425	5,89E-06
<b>3 ANOS</b>				
	<b>G.L.</b>	<b>Soma de Quadrados</b>	<b>Estat. F</b>	<b>P-valor</b>
Igualdade do Intercepto	1	30,4355	17,4890	1,77E-04
Paralelismo	1	0,0844	0,0485	0,8269
Coincidência	2	132,6453	38,1107	1,29E-09
<b>4 ANOS</b>				
	<b>G.L.</b>	<b>Soma de Quadrados</b>	<b>Estat. F</b>	<b>P-valor</b>
Igualdade do Intercepto	1	52,5612	30,2030	3,28E-06
Paralelismo	1	0,0844	0,0485	0,8269
Coincidência	2	234,4249	67,3533	6,81E-13
<b>5 ANOS</b>				
	<b>G.L.</b>	<b>Soma de Quadrados</b>	<b>Estat. F</b>	<b>P-valor</b>
Igualdade do Intercepto	1	80,6941	46,3689	5,84E-08
Paralelismo	1	0,0844	0,0485	0,8269
Coincidência	2	365,0036	104,8702	9,66E-16

Considerando que as envoltórias de resistência de pico para solo com e sem plantas foram estatisticamente iguais no primeiro ano, os procedimentos estatísticos acima mencionados foram utilizados para estimar em quanto tempo as plantas apresentariam valores significativamente diferentes de contribuição à resistência ao cisalhamento do solo. Para essa análise foi utilizado como base o valor de incremento anual de 15,6% (ou 1,2 kPa) sobre a coesão do solo, considerando-se 5 anos de desenvolvimento ininterrupto das plantas. Na análise foi observado que logo no segundo ano de desenvolvimento as plantas teriam efeito significativo também sobre as resistências de pico, especificamente na coesão.

## APÊNDICE F – Simulações do efeito da densidade e idade das plantas na estabilidade de taludes

### 1 MATERIAL E MÉTODOS

#### 1.1 Estimativas do efeito da idade e da densidade de plantas na resistência ao cisalhamento do solo

A determinação de campo do efeito das plantas na resistência ao cisalhamento do solo foi realizada para um plantio com idade variando entre 10 e 12 meses (período de inverno<sup>23</sup>) e com densidade de 6 plantas ou plantas/m<sup>2</sup>.

Considerando que as plantas continuam a crescer ao longo dos anos, considerou-se importante realizar previsões com base nos dados de campo dos efeitos anuais sobre a resistência do solo. Da mesma forma, considerou-se importante estimar os efeitos proporcionados pela densidade de plantas.

Assim, a partir dos dados observados, foram estimados os efeitos sobre a resistência ao cisalhamento do solo de 14 condições relacionadas à densidade das plantas e o tempo decorrido após o plantio, conforme mostrado na Tabela 20.

Tabela 20 – Condições de plantio utilizadas nas análises do efeito das plantas de *P. sellowianus* na resistência ao cisalhamento do solo.

Densidade de Plantio (plantas/m <sup>2</sup> )	Tempo decorrido após o plantio				
	1 ano	2 anos	3 anos	4 anos	5 anos
6	<b>Determinado <i>in situ</i></b>	Estimado	Estimado	Estimado	Estimado
12	Estimado	Estimado	Estimado	Estimado	Estimado
18	Estimado	Estimado	Estimado	Estimado	Estimado

Para a determinação do tempo decorrido após o plantio, optou-se por ciclos completos de crescimento ou 12 meses (primavera a primavera). O período máximo de 60 meses (5 anos) foi escolhido com base na idade aproximada das plantas levadas a campo. De acordo com o trabalho de Denardi (2007), estacas de *P. sellowianus* com o diâmetro de 1,8 cm (igual ao das estacas do plantio) têm idade aproximada de 4,5 anos. Com base no mesmo trabalho observou-se que as plantas ainda continuam em desenvolvimento após 10 anos de idade (caules e brotos com cerca de 4,3 cm de diâmetro). Isso indica que as plantas de *P. sellowianus* podem se manter em pleno desenvolvimento passados 5 anos do plantio.

<sup>23</sup> Plantas na região Sul do Brasil costumam ter o crescimento interrompido no inverno.

Para definir o número de plantas/m<sup>2</sup> foram considerados valores usuais empregados em obras de Engenharia Natural e compatíveis com o experimento de campo (1 planta em uma caixa de cisalhamento de área 0,16 m<sup>2</sup> [0,4×0,4 m] ≈ 6 plantas/m<sup>2</sup>), o que resultou nas densidades de 6, 12 e 18 plantas/m<sup>2</sup>.

Os valores estimados do efeito das plantas sobre a resistência do solo ao cisalhamento, da mesma forma que os valores observados, foram considerados nas análises de estabilidade de taludes.

## 1.2 A influência das plantas na estabilidade de taludes

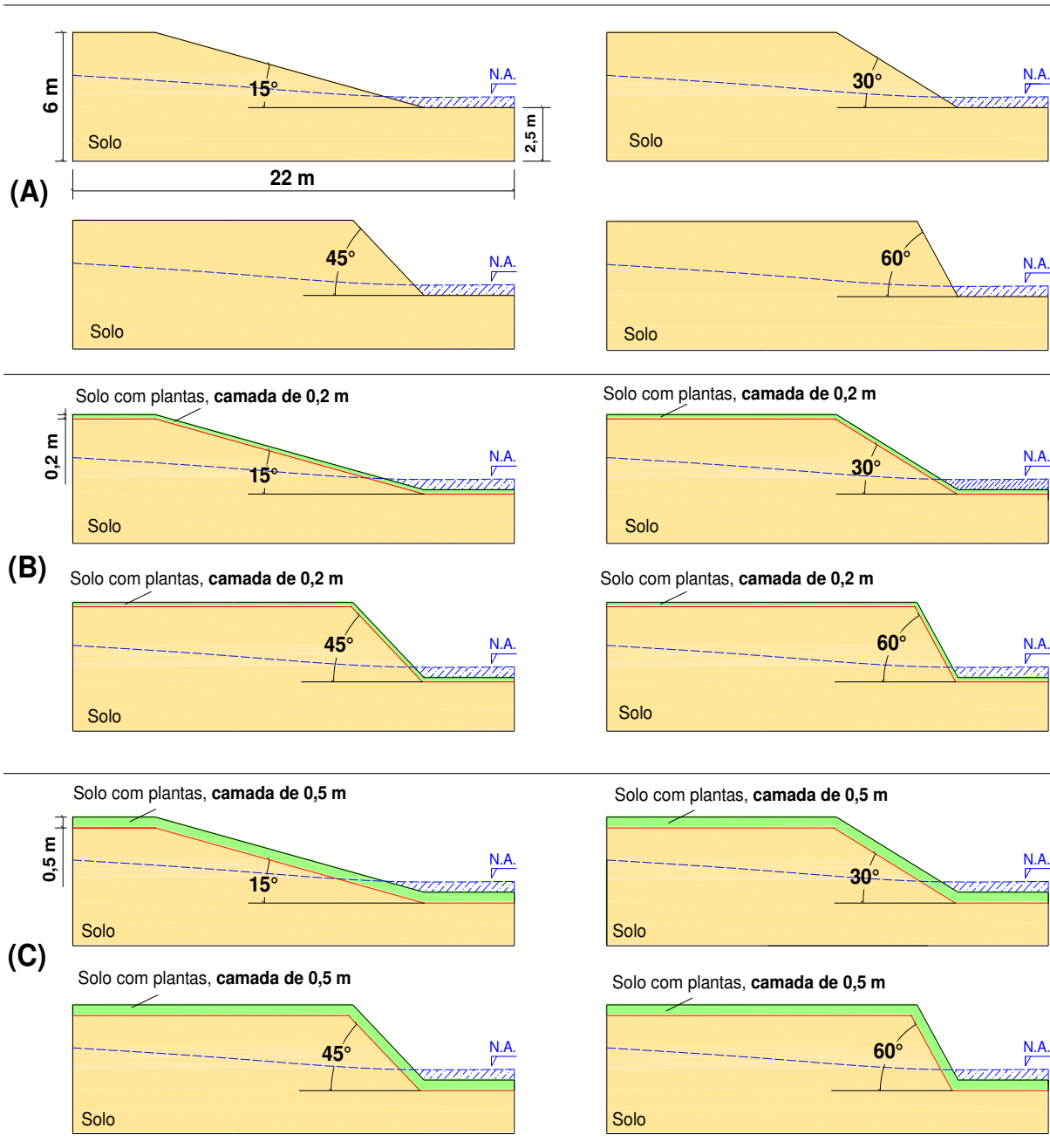
O efeito das plantas na estabilidade de taludes foi verificado por meio de simulações numéricas realizadas no software Geo-Slope (GEOSTUDIO, 2012). O comparativo entre taludes com e sem plantas foi realizado por meio dos fatores de segurança obtidos pelo método de equilíbrio limite de Morgenstern-Price. Os fatores de segurança foram obtidos a partir de análises paramétricas em que os seguintes parâmetros foram variados: ângulo de inclinação do talude, coesão do solo e profundidade de atuação das raízes. Essas informações foram compiladas em gráficos de dupla entrada, com valores absolutos e relativos no eixo das ordenadas e inclinação de taludes no eixo das abscissas.

As simulações numéricas foram realizadas para o total de 64 taludes com características distintas. Para o caso de taludes sem plantas (ou solo sem raízes) foram conduzidas 4 simulações variando apenas a inclinação da superfície do solo, enquanto para taludes com plantas, além de 4 diferentes inclinações da superfície, foram considerados 5 períodos após o plantio e 3 densidades de plantas, totalizando 60 combinações. Para cada combinação foram calculados fatores de segurança para 605 superfícies potenciais de ruptura no software Geo-Slope. As características desse taludes estão resumidas na Tabela 21 e representadas esquematicamente na Figura 54.

Tabela 21 – Condições utilizadas para a simulação numérica da estabilidade de taludes

Condição do talude	Densidade de plantio	Inclinação do talude	Número de taludes analisados
Solo sem plantas de <i>P. sellowianus</i>	-	15°, 30°, 45° e 60°	4
Solo com plantas de <i>P. sellowianus</i> 1, 2, 3, 4 e 5 anos após o plantio	6, 12 e 18 estacas/m <sup>2</sup>	15°, 30°, 45° e 60°	60

Figura 54 – Detalhes e aspectos geométricos dos taludes analisados. a) taludes sem plantas; b) taludes em que o efeito das plantas foi considerado até 0,2 m de profundidade, observando que esta foi objeto dos ensaios de cisalhamento direto *in situ*; c) taludes em que o efeito das plantas foi considerado até 0,5 m, limite de profundidade das estacas



Todos os 64 taludes foram simulados assumindo-se o efeito homogêneo das plantas em duas profundidades, a de 0,2 m, que foi objeto dos ensaios de cisalhamento direto *in situ*, e a de 0,5 m, limite de alcance das estacas definido no plantio.

É importante observar que, exceto pelas variações destacadas na Tabela 4 (bem como efeitos resultantes sobre os parâmetros de resistência do solo), os taludes utilizados nas simulações foram sempre considerados com as mesmas características de estrutura física do



solo (em todas as profundidades) e de geometria (altura x comprimento). Como *P. sellowianus* é reófila, optou-se por adicionar a todos os taludes um pequeno nível de água, indicando uma condição desfavorável à estabilidade.

## 2 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 2.1 Estimativas do efeito da idade e da densidade de plantas na resistência ao cisalhamento do solo

Uma vez confirmado o efeito positivo de plantas de *P. sellowianus* na resistência ao cisalhamento do solo, os valores observados *in situ* foram empregados para obtenção de estimativas relacionadas ao tempo de desenvolvimento a campo e à densidade de plantio. Para tempo de desenvolvimento a campo foram assumidos 1 (observação de campo), 2, 3, 4 e 5 anos e para densidades foram assumidas 6 (observação de campo), 12 e 18 plantas/m<sup>2</sup>.

Como não foram observadas diferenças estatísticas entre os ângulos de atrito interno do solo com e sem plantas, assumiu-se que nas envoltórias de resistência, ou equações lineares, as plantas propagadas por meio de estacas têm efeitos apenas na coesão do solo.

Para plantas com 1 ano de idade foi observado incremento de 1,2 kPa<sup>24</sup> na resistência ao cisalhamento do solo. Esse valor foi assumido proporcionalmente para 2 anos (2,4 kPa), 3 anos (3,6 kPa), 4 anos (4,8 kPa) e 5 anos (6 kPa) após o plantio. O mesmo procedimento foi seguido para estimar os valores de contribuição à coesão se fossem plantadas, além de 6 plantas/m<sup>2</sup>, 12 plantas/m<sup>2</sup> e 18 plantas/m<sup>2</sup>, densidades costumeiramente empregadas em técnicas de Engenharia Natural, dependendo da técnica de intervenção especificada.

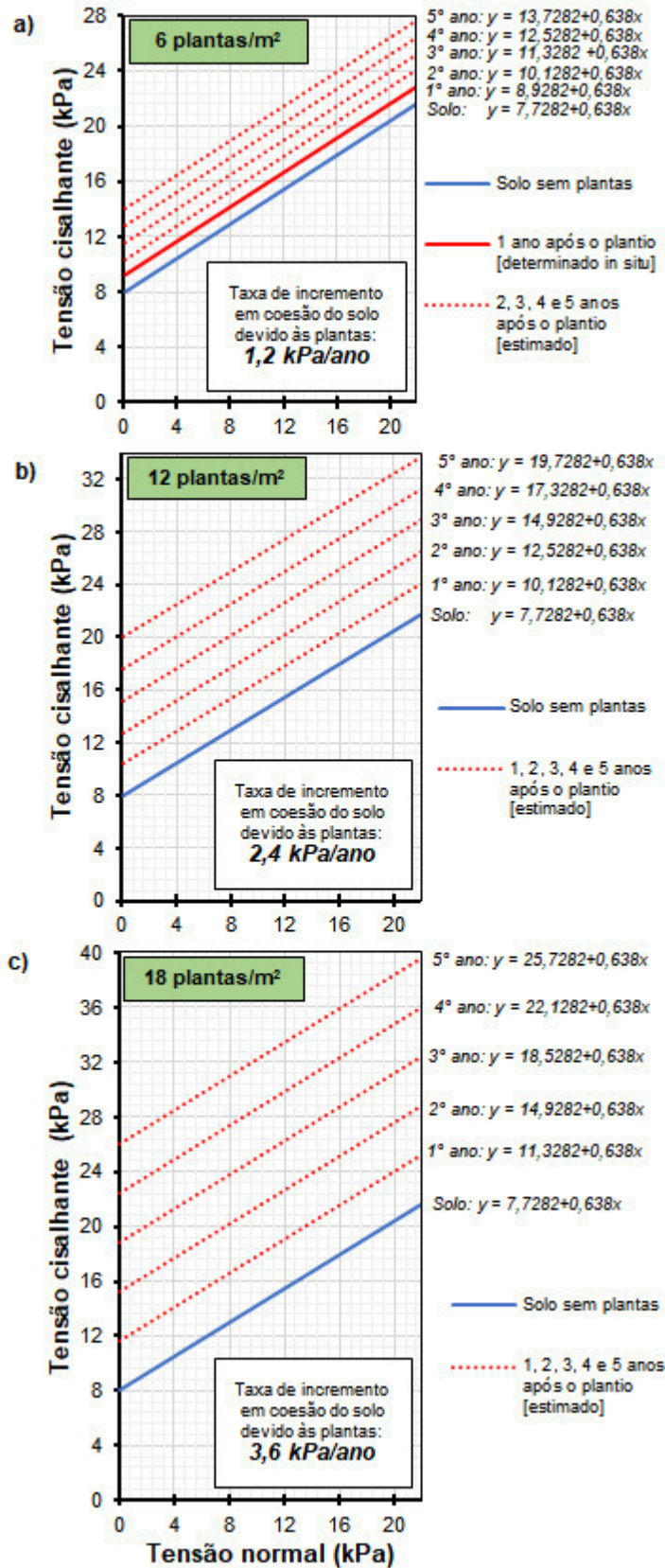
Todos os valores estimados a partir das observações de campo, realizadas no primeiro ano de desenvolvimento das plantas, são apresentados na forma de envoltórias de resistência (equações lineares) na Figura 55.

Nessa Figura, considerando as diferenças entre solo com e sem plantas, observa-se que do 1º ao 5º ano após o plantio os valores de contribuição à coesão variaram de 1,2 a 6 kPa para 6 plantas/m<sup>2</sup>, de 2,4 a 12 kPa para 12 plantas/m<sup>2</sup> e de 3,6 a 18 kPa para 18 plantas/m<sup>2</sup>.

---

<sup>24</sup> Esse valor foi assumido para as simulações uma vez que foi a pior condição de contribuição das plantas para a resistência ao cisalhamento do solo.

Figura 55 – Estimativa do incremento em resistência ao cisalhamento do solo de acordo com a densidade e tempo decorrido após o plantio de *Phyllanthus sellowianus*: a) efeito de 6 plantas/m<sup>2</sup>; b) efeito de 12 plantas/m<sup>2</sup>; c) efeito de 18 plantas/m<sup>2</sup>.



Em linhas gerais, as estimativas apresentadas tanto para a densidade de plantas quanto para o tempo de desenvolvimento a campo sugerem ser bastante conservadoras, ou seja, apresentar valores menores do que aqueles que efetivamente podem ocorrer a campo.

No caso da densidade de estacas, para a caixa de área  $0,16 \text{ m}^2$ , uma, duas e três estacas correspondem a aproximadamente 6, 12 e 18 estacas/ $\text{m}^2$ . Sendo assim, há de se considerar que a interação entre raízes e estacas na superfície de ruptura pode se mostrar mais efetiva do que o representado pelo simples incremento linear em resistência ao cisalhamento assumido nas estimativas da Figura 55.

Com relação ao tempo de desenvolvimento a campo, plantas de *P. sellowianus* desenvolvendo naturalmente em cursos de água, tendem a se agrupar em formações bastante densas, o que pode ser um indicativo de que o desenvolvimento da espécie, ao menos a curto prazo, pode ser pouco influenciado pela competição. Além disso, as estimativas não consideram a dinâmica de crescimento das raízes (aumento em diâmetro e quantidade) e também das estacas (aumento em diâmetro). Nesse caso é interessante destacar que, como mostrado nas seções 4.2.6 e 4.2.7, após 1 ano de desenvolvimento, poucas raízes foram observadas na superfície de ruptura, algo que tende a ser rapidamente alterado com o crescimento continuado das plantas.

Os valores observados e estimados de contribuição das plantas de *P. sellowianus* foram utilizados na realização de análises de estabilidade de taludes.

## 2.2 Influência das plantas na estabilidade de taludes

Em última análise, o principal objetivo de determinar o efeito de plantas na resistência ao cisalhamento do solo é determinar sua influência na estabilidade de taludes.

Nesse caso, os resultados de resistência ao cisalhamento encontrados a campo e as estimativas de comportamento obtidos na Figura 55 foram empregados em análises de estabilidade de taludes com diferentes características.

Os resultados das análises de estabilidade foram compilados em gráficos de dupla entrada na Figura 56 (contribuição das plantas até 20 cm de profundidade) e na Figura 57 (contribuição das plantas até 50 cm de profundidade). Cada figura apresenta três gráficos, um para 6 plantas/ $\text{m}^2$ , um para 12 plantas/ $\text{m}^2$  e outro para 18 plantas/ $\text{m}^2$ . Em cada gráfico, no eixo das ordenadas, são apresentadas 5 curvas de fator de segurança em valores absolutos e 5 retas representando os valores relativos de contribuição das plantas ao fator de segurança. No eixo das abscissas são apresentados valores de inclinação de taludes, que variam de  $15^\circ$  a  $60^\circ$ .

Exemplos das análises de estabilidade conduzidas no software Geoslope para taludes sem plantas, taludes com contribuição de plantas até 20 cm e até 50 cm, e que deram origem às Figuras 56 e 57, podem ser visualizados no APÊNDICE G (página 177).

Observando os fatores de segurança das Figuras 56 e 57, é possível perceber que os taludes apresentam condições satisfatórias de estabilidade, visto que mesmo os fatores de segurança mais baixos tiveram valores muito próximos de 1,5 (ABNT-NBR 11682, 2009). Esses valores foram observados durante as análises e se optou por mantê-los, uma vez que o objetivo foi observar, em termos relativos, a contribuição das plantas aos fatores de segurança e conseqüentemente à estabilidade de taludes.

Na comparação das Figuras 56 e 57 observa-se que a contribuição das plantas aos fatores de segurança aumenta conforme aumenta a inclinação dos taludes. Para inclinações menores, que representam taludes mais estáveis, a influência das plantas sobre os fatores de segurança é pequena<sup>25</sup>. Além disso, verifica-se que a contribuição das plantas em termos absolutos é bastante pequena e, em algumas condições, quase indistinguível. Contudo, a contribuição das plantas fica evidente quando observada em termos relativos.

Na condição que foi avaliada a campo por meio dos ensaios de resistência ao cisalhamento direto *in situ*, ou seja, na densidade de 6 plantas/m<sup>2</sup> e contribuição até 20 cm de profundidade, foram observados aumentos no fator de segurança no talude de 45° (condição mais usual em obras) que variaram de 0,7% no 1° ano a 2,7% no 5° ano. Para a mesma densidade de plantas, considerando contribuição das raízes até 50 cm de profundidade, foram observados valores de contribuição que variaram de 1,8% no 1° ano a 8,0% no 5° ano de desenvolvimento a campo. Dada a simples variação nas profundidades de contribuição das plantas de 20 cm para 50 cm, os aumentos nos fatores de segurança foram consideráveis.

Em linhas gerais, considerando a profundidade de 20 cm (Figura 56), a contribuição nos fatores de segurança de um talude de 60° de inclinação (pior condição) variou de 0,8% (1° ano) a 3,9% (5° ano) para 6 plantas/m<sup>2</sup>, de 1,9% (1° ano) a 8,7% (5° ano) para 12 plantas/m<sup>2</sup> e de 2,4% (1° ano) a 12,2% (5° ano) para 18 plantas/m<sup>2</sup>. Para a mesma inclinação de talude, considerando a profundidade de 50 cm (Figura 57), os valores de contribuição das plantas variaram de 2,3% (1° ano) a 11,8% (5° ano) para 6 plantas/m<sup>2</sup>, de 4,9% (1° ano) a 20,6% (5° ano) para 12 plantas/m<sup>2</sup> e de 7,0% (1° ano) a 30,0% (5° ano) para 18 plantas/m<sup>2</sup>.

---

<sup>25</sup> Isso não significa que não tenham efeitos consideráveis na proteção de margens de pouca inclinação em cursos de água nos períodos de cheia. Nesta condição, a parte aérea das plantas herbáceas e arbustivas tende a reduzir em muito a solicitação sobre a superfície do solo realizada pela energia do fluxo, evitando a desagregação e o carreamento de grandes quantidades de sedimentos.

Figura 56 – Efeito da densidade e da idade das plantas na estabilidade de taludes com diferentes inclinações, considerando o reforço do solo até a profundidade de 20 cm, trabalhada nos ensaios de campo. A curva em cor azul representa o solo sem raízes e as curvas em cor vermelha representam, em ordem crescente, o solo com raízes de *Phyllanthus sellowianus* 1, 2, 3, 4 e 5 anos após o plantio.

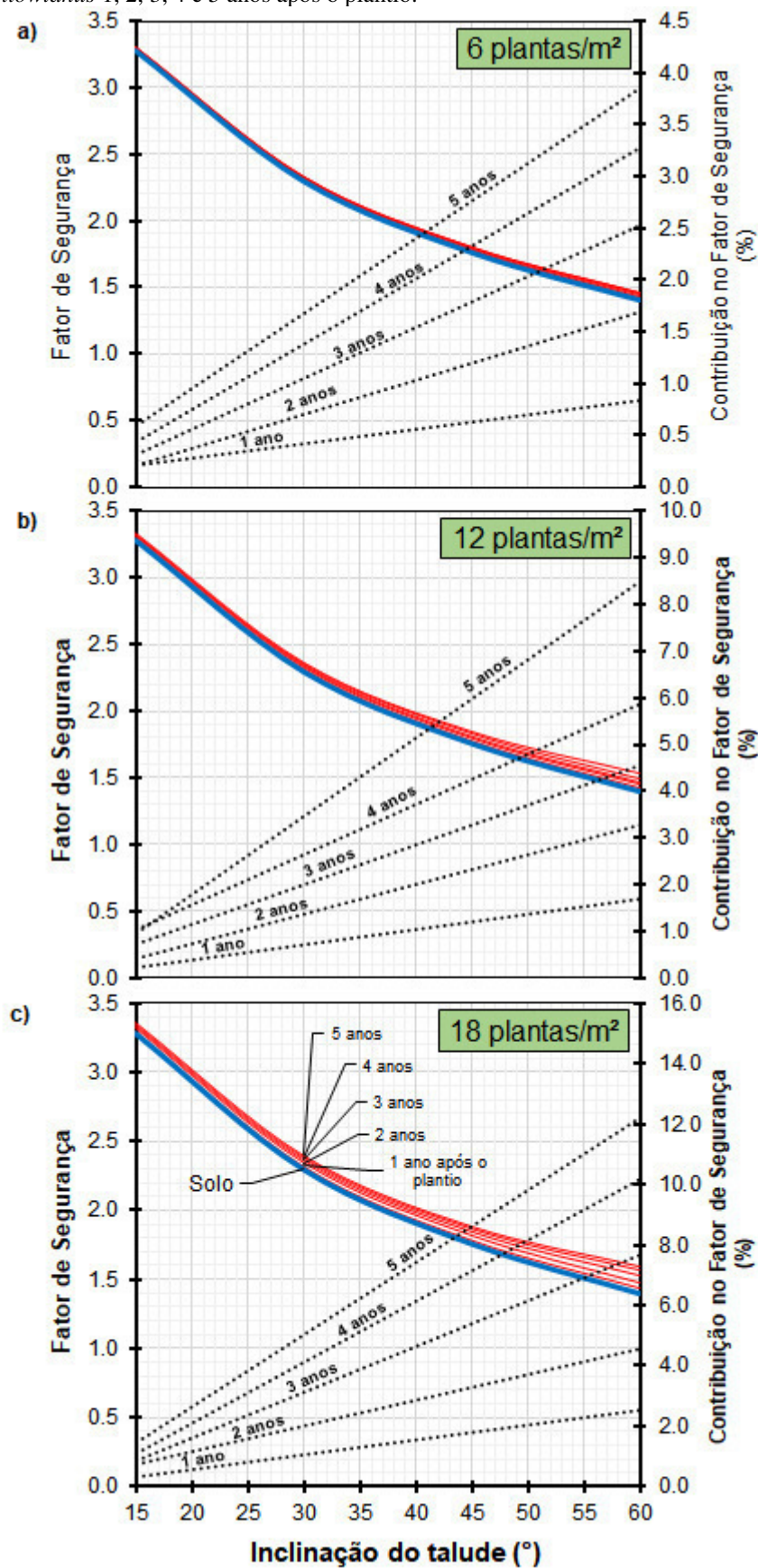
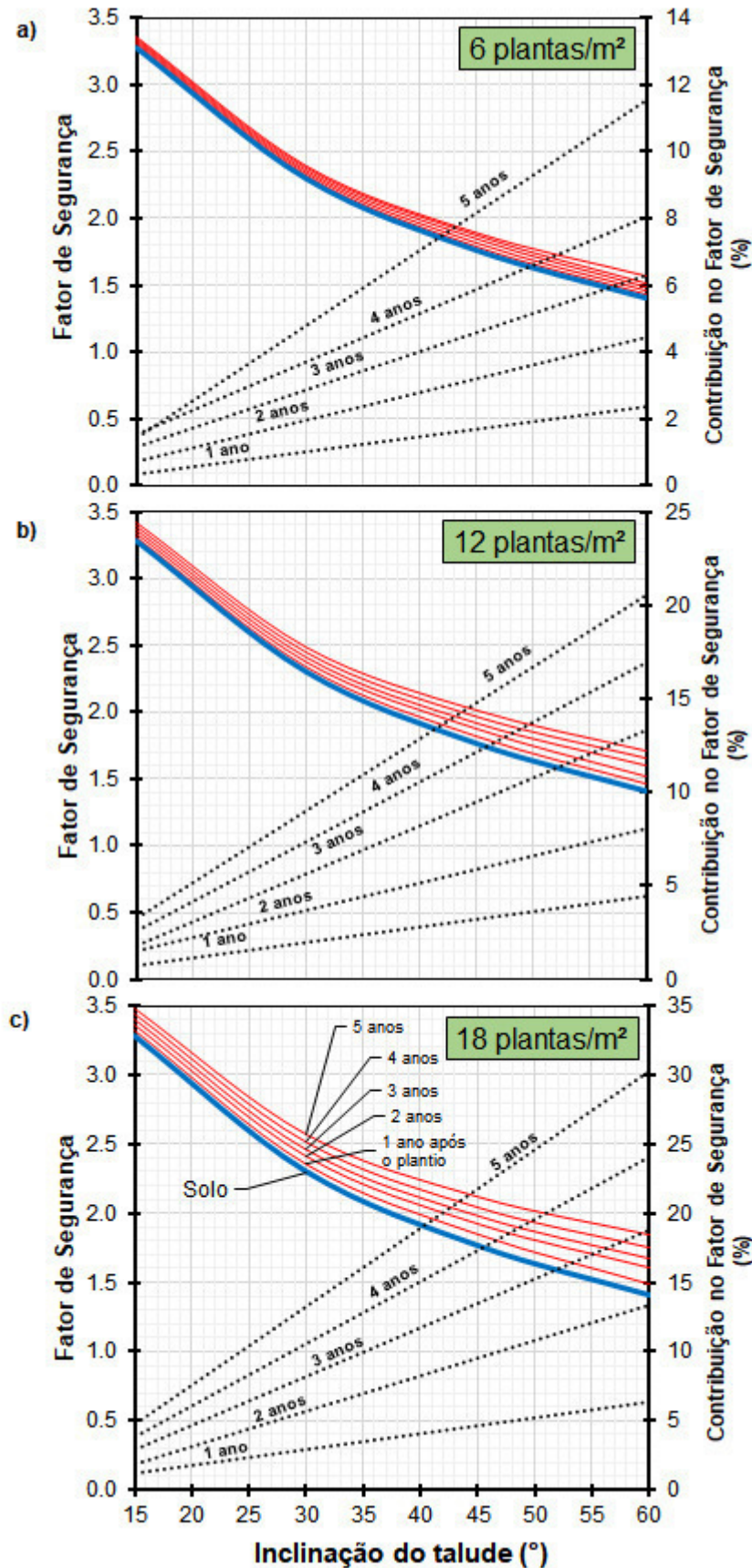


Figura 57 – Efeito da densidade e da idade das plantas na estabilidade de taludes com diferentes inclinações, considerando o reforço do solo até a profundidade de 50 cm. A curva em cor azul representa o solo sem raízes e as curvas em cor vermelha representam, em ordem crescente, o solo com raízes de *Phyllanthus sellowianus* 1, 2, 3, 4 e 5 anos após o plantio.



A análise conjunta das contribuições das plantas nas profundidades de 20 e 50 cm indicam que o simples aumento do número de plantas/m<sup>2</sup> pode melhorar consideravelmente a estabilidade de um talude com inclinações mais acentuadas. Nesse caso, informações apresentadas nos mesmos moldes das Figuras 56 e 57 podem ser utilizadas como indicativos no dimensionamento de obras de Engenharia Natural, buscando a escolha de número mais adequado de densidade de plantas a ser assumido em um determinado projeto de proteção e/ou estabilização de taludes. Para esse tipo de decisão devem ser considerados, por exemplo, a disponibilidade de grande quantidade de material vegetativo na região, a técnica a ser empregada (estacaria viva, banquetas vegetadas, siltação, muro de suporte vivo, etc.), fatores econômicos e exigências de tempo para que as plantas assumam o papel principal na estabilização do talude. Contudo, é importante ressaltar a importância de se ter cautela no uso desse tipo de informação, visto que as mesmas somente são adequadas a condições semelhantes às que foram avaliadas, seja de clima, solo, espécie, forma de propagação e/ou técnica de avaliação.

A título de exemplo, os efeitos da ausência e da presença de plantas (aos 5 anos e a 50 cm de profundidade) sobre um talude com ruptura circular são representados de maneira esquemática na Figura 58.

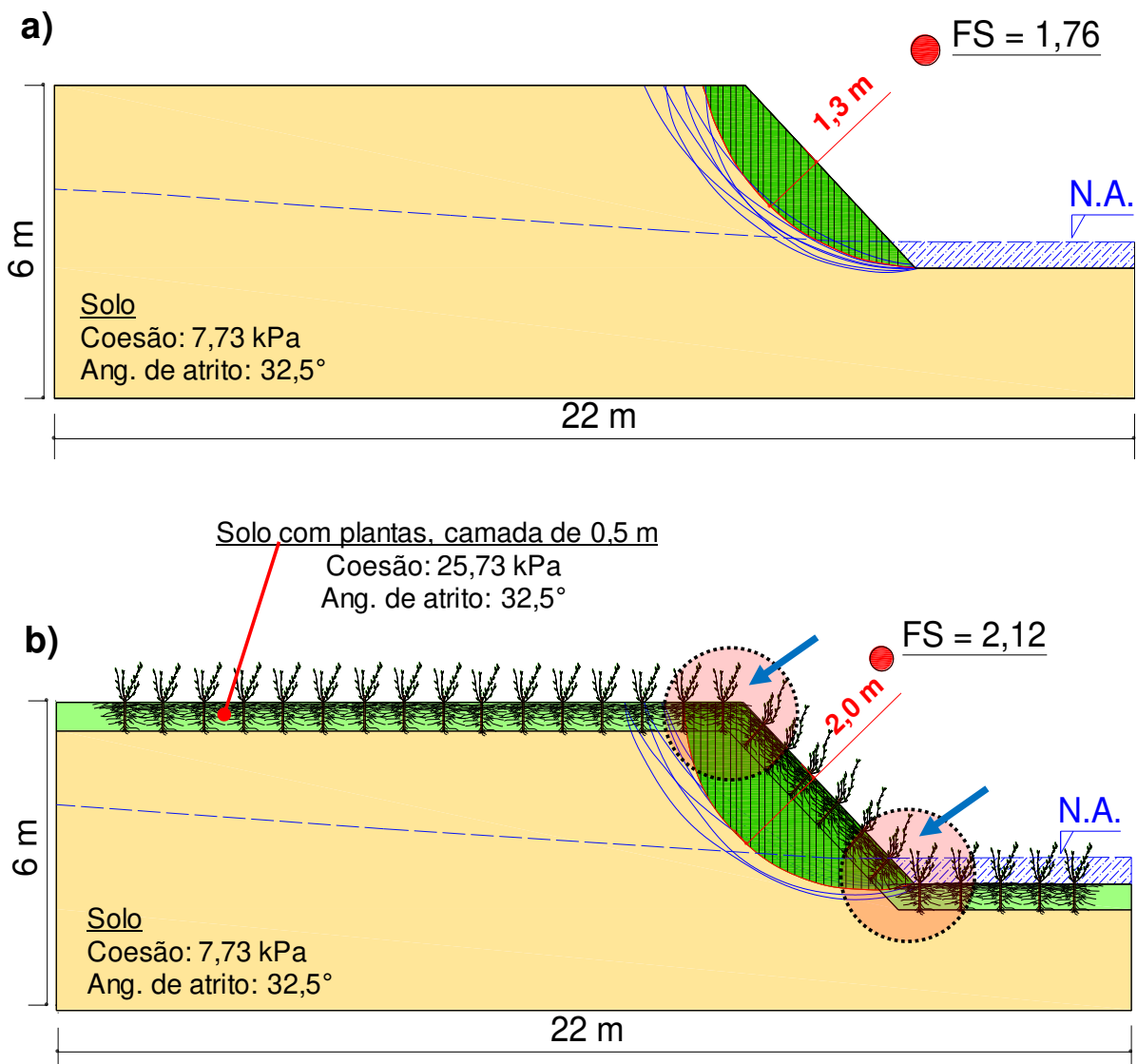
No talude sem plantas, Figura 58a, observa-se que mesmo sem plantas, a estabilidade do solo é bastante alta, uma vez que o menor valor de segurança apresentado foi de 1,76. Normalmente, em uma abordagem conservadora, um projeto de Engenharia Natural busca um fator de segurança de no mínimo 1,5. Ainda na Figura 58a, observa-se que a maior profundidade da superfície de ruptura circular é de aproximadamente 1,3 m e ocorre aproximadamente no centro do talude.

No talude com plantas, Figura 58b, observa-se o efeito da camada de 0,5 m de estacas e raízes sobre o talude constituído por material de coesão relativamente baixa. O aumento da resistência do solo ao cisalhamento é verificado através do aumento no fator de segurança (FS), que passa a ser de 2,12. Trata-se do menor fator de segurança encontrado para diversas superfícies potenciais de ruptura testadas (na figura aparecem 7, mas no total foram 605). A partir do centro do talude, a superfície potencial de ruptura encontra-se a 2 m de profundidade. O efeito da proteção superficial, representado por 0,5 m de raízes e estacas, atuou afastando a superfície de ruptura para o interior do talude. Esse efeito foi favorável à estabilidade.

A posição que as plantas ocupam no talude também pode influenciar a maneira como contribuem para a estabilização. Isso pode ser observado na Figura 58b, nos destaques no topo e na base do talude. As extremidades são os locais em que a superfície de ruptura se encontra

em menor profundidade, e por isso é mais fácil de ser alcançada e ultrapassada pelas raízes. Somente se essa condição for cumprida as plantas podem contribuir efetivamente para a estabilidade de um talude (WU, 2013).

Figura 58 – Representação esquemática da estabilidade de taludes de 45° de inclinação sem (a) e com plantas de *Phyllanthus sellowianus* (b). O valor de coesão para solo com raízes foi estimado para a densidade de 18 plantas/m<sup>2</sup>, para 5 anos de desenvolvimento a campo. As linhas vermelhas indicam a posição da superfície de ruptura com o menor fator de segurança calculado. No solo sem raízes, as linhas azuis representam superfícies de ruptura potenciais com FS>1,76, enquanto no solo com raízes as linhas azuis representam linhas potenciais de ruptura com FS>2,12. As setas indicam os principais pontos de contribuição das raízes para a estabilidade do talude



No topo do talude, onde podem ocorrer fendas de tração, as raízes são solicitadas por tração e seguram a massa de solo evitando o deslizamento (SCHWARZ et al., 2010b; SCHWARZ et al. 2012; SCHWARZ et al. 2015). Na base do talude, plantas sofrem compressão



e atuam como anteparos, auxiliando na contenção da massa de solo (ALI et al., 2013; Schwarz et al., 2015). No eixo do talude com ruptura circular, a profundidade da superfície de ruptura é sempre maior e as raízes tendem a demorar mais tempo para alcançá-la. Essa é uma limitação temporária (pois as raízes crescem), mas pode ser contornada na realização de intervenções biotécnicas com o uso de estacas vivas de maior comprimento. Além de *P. sellowianus*, espécies reófitas como *Gymnanthes schottiana* Müll. Arg. e *Salix humboldtiana* Willd. são exemplos de plantas com excelentes características biotécnicas (SUTILI, 2007), que também têm capacidade de fornecer estacas vivas com mais de 1 m de comprimento.

A distribuição homogênea e densa de raízes de uma mesma espécie tende, devido às características morfológicas, a atingir a mesma profundidade no solo (COPPIN e RICHARDS, 2007). Essa característica pode não ser interessante para a estabilização de solos, pois a profundidade máxima de alcance das raízes pode estabelecer uma superfície preferencial de ruptura. A solução para essa condição é o uso de diversas espécies que tenham sistema radiciais com características morfológicas diferentes, o que permite a ocupação de camadas de solos com profundidades distintas, além de diferentes formas de entrelaçamento lateral entre raízes. Sendo assim, existe uma tendência de que a utilização de diversas espécies em uma obra de estabilização seja tecnicamente mais eficiente.

### 3 Considerações finais

Nas estimativas e projeções realizadas, a estabilidade dos taludes foi positivamente influenciada pelo desenvolvimento e densidade de plantas. Os taludes sem plantas, portanto, apresentaram os menores fatores de segurança.

Para um ano de desenvolvimento a campo, a contribuição absoluta das plantas para a estabilidade de taludes foi pequena. Contudo, a relativização se mostrou útil para a comparação das diferenças entre solos com e sem plantas.

A apresentação das informações de contribuição das plantas ao fator de segurança de taludes em gráficos de dupla entrada se mostrou uma forma rápida de avaliar as possibilidades de uma determinada espécie para um projeto de estabilização de talude. Essa forma de sumarizar informações certamente será útil na seleção de espécies para aplicação em técnicas de Engenharia Natural.

Mesmo com relativamente pouco tempo de desenvolvimento, as plantas tiveram efeito considerável sobre os fatores de segurança dos taludes testados. Para o período de um ano, a contribuição sobre o fator de segurança de um talude de 60° (pior condição) foi da ordem de

0,8% a 2,3% para 6 plantas/m<sup>2</sup>, enquanto para a densidade de 18 plantas/m<sup>2</sup> foi da ordem de 2,4% a 7,0%.

O comportamento geral da relação entre desenvolvimento das plantas e fator de segurança sugere que a estabilidade dos taludes deve aumentar ao longo do tempo enquanto as taxas de crescimento forem crescentes. Nesse caso, acréscimos nos valores de fator de segurança podem estagnar (estabilizar) quando as plantas atingirem a maturidade ou começarem a competir por água e nutrientes.

## APÊNDICE G – Exemplos das análises de estabilidade de taludes conduzidas para solo com e sem raízes de plantas de *P. sellowianus*

Figura 59 – Exemplos de análises de estabilidade de taludes conduzidas para o solo sem raízes. a) talude com inclinação de 15°; b) talude com inclinação de 30°; c) talude com inclinação de 45°; d) talude com inclinação de 60°

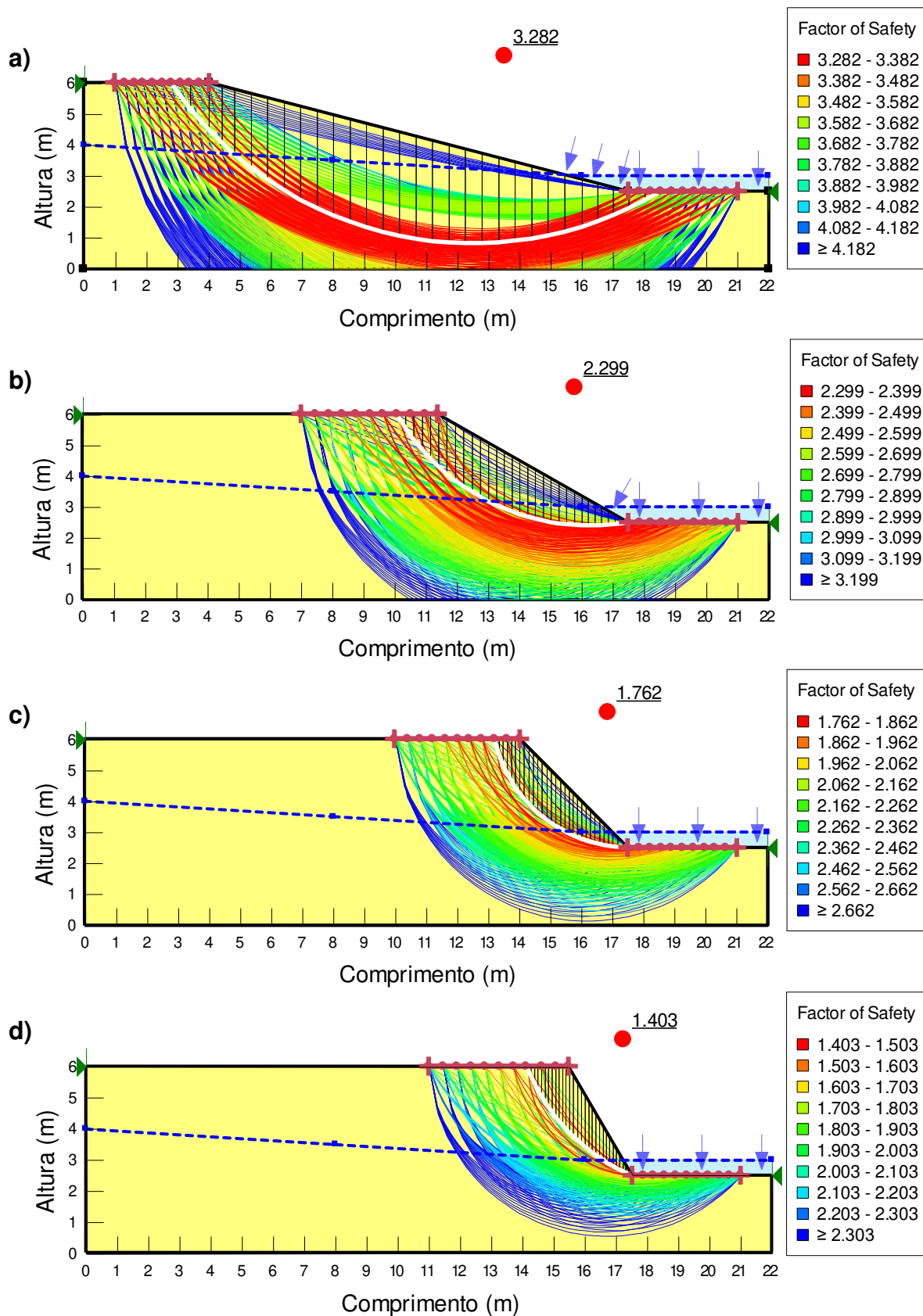


Figura 60 – Exemplos de análises de estabilidade de taludes conduzidas para o solo com raízes de *P. sellowianus*, para a densidade de 6 plantas/m<sup>2</sup>, com contribuição homogênea das plantas até 0,2 m de profundidade, 1 ano após o plantio. a) talude com inclinação de 15°; b) talude com inclinação de 30°; c) talude com inclinação de 45°; d) talude com inclinação de 60°

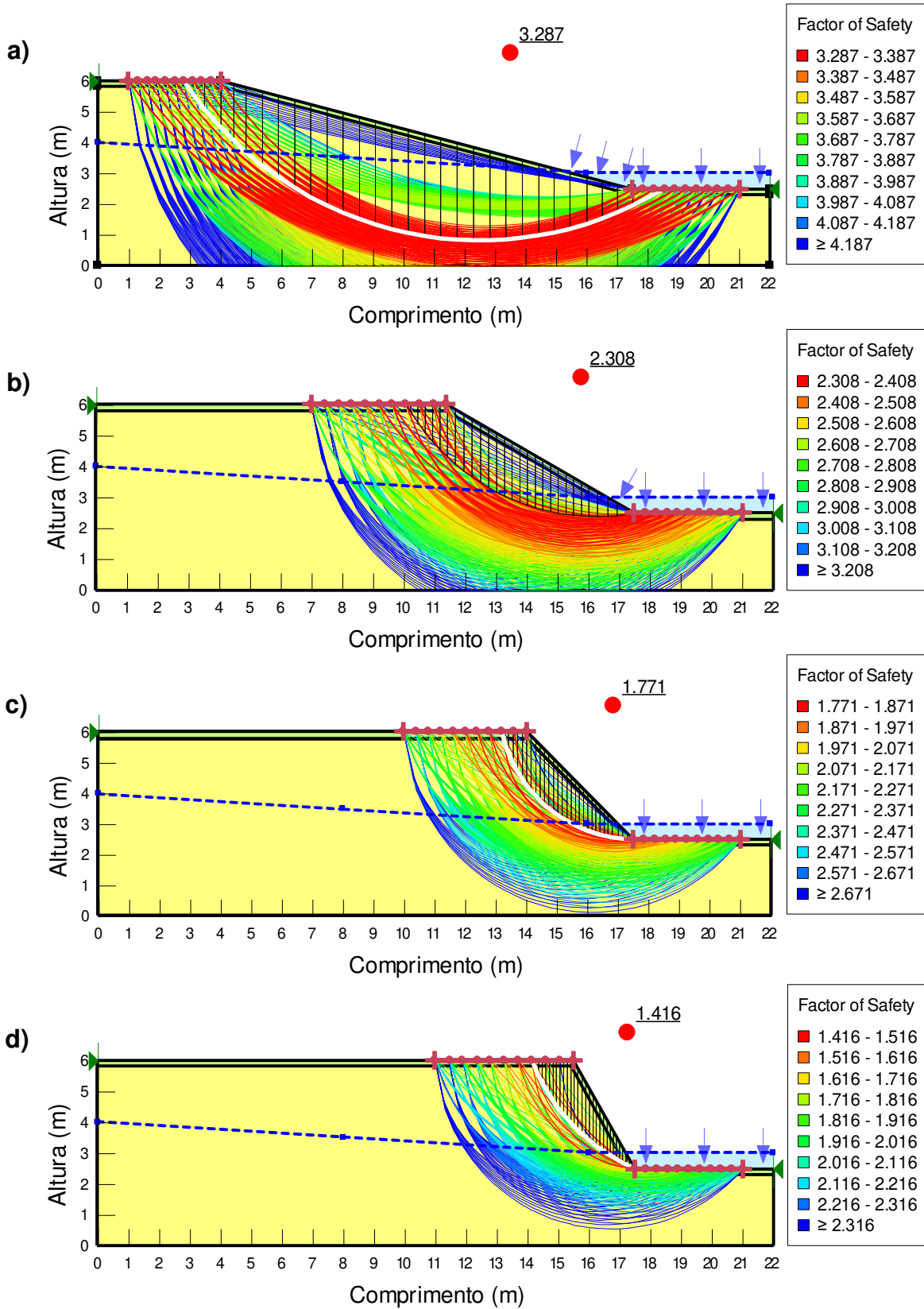


Figura 61 – Exemplos de análises de estabilidade de taludes conduzidas para o solo com raízes de *P. sellowianus*, para a densidade de 6 plantas/m<sup>2</sup>, com contribuição homogênea das plantas até 0,5 m de profundidade, 1 ano após o plantio. a) talude com inclinação de 15°; b) talude com inclinação de 30°; c) talude com inclinação de 45°; d) talude com inclinação de 60°

