

IGOR PINHEIRO DA ROCHA

**EROSÃO EM TALUDE DA MARGEM DO BAIXO SÃO FRANCISCO
E CONTRIBUIÇÃO DE RAIZES NA RESISTÊNCIA AO
CISALHAMENTO DO SOLO**

RECIFE - PE

2014

IGOR PINHEIRO DA ROCHA

**EROSÃO EM TALUDE DA MARGEM DO BAIXO SÃO FRANCISCO
E CONTRIBUIÇÃO DE RAIZES NA RESISTÊNCIA AO
CISALHAMENTO DO SOLO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Área de Concentração: Engenharia de Água e Solo, da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Agrícola.

Orientador: Prof. Dr. Mário Monteiro Rolim

Co-Orientador: Prof. Dr. Francisco Sandro Rodrigues Holanda

RECIFE - PE

2014

**EROSÃO EM TALUDE DA MARGEM DO BAIXO SÃO FRANCISCO
E CONTRIBUIÇÃO DE RAIZES NA RESISTÊNCIA AO
CISALHAMENTO DO SOLO**

IGOR PINHEIRO DA ROCHA

Tese defendida e aprovada em 28 de fevereiro de 2014 pela Banca Examinadora:

ORIENTADOR

Prof. Dr. Mario Monteiro Rolim (UFRPE)

EXAMINADORES

Prof. Dr. Francisco Sandro Rodrigues Holanda (UFS)

Profa. Dra. Thais Emanuelle Monteiro dos Santos (UFPE)

Profa. Dra. Elvira Maria Regis Pedrosa (UFRPE)

Prof. Dr. Veronildo Souza de Oliveira (UFRPE)

RECIFE - PE

2014

“

*Whether you think you can, or
you think you can't, you're
right.*

Henry Ford

Recriar é a meta
de um tipo especial
de tradução:
a tradução-arte
mas para chegar à
re-criação
é preciso identificar-se
profundamente
com o texto original
e ao mesmo tempo
não barateá-lo
enfrentar todas as suas
dificuldades
tentar reconstituir
a criação
a partir de cada palavra
som por som
tom por tom
é uma questão de forma
mas também
é uma questão de alma

”
Augusto de Campos

A todos os professores que tive na vida, especialmente meus pais.

Dedico.

A minha esposa e filha.

Ofereço.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela permanente companhia e providências;

A minha família, em especial minha mãe, a minha esposa e minha filha, por todo amor, dedicação e compreensão;

Aos velhos amigos, pelas palavras de incentivo e aos novos amigos que fiz ao longo do curso, pelos momentos compartilhados de aprendizado e descontração;

Aos companheiros da república *Mama África* Celestino Jolamo, Max Henrique e Nadielan Lima, pelos verdadeiros momentos de partilha e fraternidade;

Aos colegas da TRANSPETRO/ES, pela formidável convivência profissional e ações embrionárias deste trabalho de pesquisa;

Aos Professores Fabrício Jaques Sutili (UFSM), Luciana Dias Thomas (UFES) e Elvidio Gavassoni Neto (UFPR), pelo incentivo e disponibilidade em contribuir com a construção deste trabalho;

Ao Professor Francisco Sandro Holanda (UFS) e a todos os membros do Grupo de Pesquisa em Gestão Hidroambiental do Baixo São Francisco (Pesquisadores, Bolsistas e Auxiliares de campo), por acolher tão bem este trabalho e por não medir esforços para enfrentar com tanto esmero os desafios de sua execução;

A Professora Ana Paula Prata e a Bióloga M.Sc. Ana Cecília da Cruz Silva, pelo auxílio na identificação das espécies no Herbário ASE da UFS.

Ao Professor Erinaldo Hilário Cavalcante e aos Assistentes de Pesquisa do Laboratório de Geotecnia e Pavimentação (UFS) José Willami dos Santos e Washington dos Santos, pela confiança e horas de trabalho dedicadas a este estudo;

Aos Professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal Rural de Pernambuco, pelo zelo e empenho nos ensinamentos dos saberes científicos;

Ao Professor Mário Rolim, pela orientação deste trabalho e pelos ensinamentos acadêmicos;

A Fundação de Apoio à Pesquisa e à Inovação Tecnológica do Estado de Sergipe (FAPITEC), pela aprovação do Projeto de cooperação acadêmica entre a UFS, UFSM e UFRPE para ações de ensino e pesquisa em bioengenharia de solos, que viabilizou parte das atividades de pesquisa deste trabalho.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	2
LISTA DE TABELAS.....	3
RESUMO.....	4
ABSTRACT.....	5
INTRODUÇÃO GERAL.....	6
OBJETIVO GERAL.....	8
CAPÍTULO 1. REVISÃO DE LITERATURA.....	10
O Baixo São Francisco.....	10
Solos aluviais.....	10
Erosão marginal.....	13
Resistência ao cisalhamento do solo.....	14
Estabilidade de taludes.....	16
Reforço do solo por raízes.....	17
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	20
CAPÍTULO 2. MAGNITUDE E VARIAÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DA EROÇÃO MARGINAL EM UM TALUDE DO BAIXO SÃO FRANCISCO.....	29
RESUMO.....	29
ABSTRACT.....	29
INTRODUÇÃO.....	30
MATERIAIS E MÉTODOS.....	31
Descrição da área de estudo.....	31
Coleta de dados de perda de solo.....	32
Coleta de dados hidrológicos.....	33
i. Cota, vazão, velocidade do fluxo e área da seção molhada.....	33
ii. Precipitação.....	34
RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	35
CONCLUSÕES.....	41
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	42
CAPÍTULO 3. RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE UM SOLO ALUVIAL COM E SEM A PRESENÇA DE RAÍZES.....	46
RESUMO.....	46
ABSTRACT.....	46
INTRODUÇÃO.....	47
MATERIAIS E MÉTODOS.....	48
Histórico da área de estudo.....	49
Seleção das espécies vegetais.....	50
Coleta das amostras de solo.....	51
Caracterização do solo.....	52
Ensaio de cisalhamento direto.....	52
Delineamento experimental.....	53
RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	54
Cisalhamento direto.....	55
CONCLUSÕES.....	67
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	68

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Esquema de instalação dos pinos no talude, adaptado de Fernandez (1996).	32
Figura 2.	Croqui do levantamento batimétrico, posição das seções de medição e linhas de coleta de dados dos pinos e estacas.	34
Figura 3.	Magnitude do processo erosivo nas 24 linhas de medição ao longo do período de avaliação.	36
Figura 4.	Histograma da precipitação mensal acumulada para o ano de 2013, precipitação esperada na estação pluviométrica convencional de Propriá (INMET, 2009) e Taxa de erosão mensal acumulada para o ano de 2013 no sítio experimental.	38
Figura 5.	Perfis transversais do trecho experimental, nas quatro seções batimétricas.	39
Figura 6.	Valores de vazão e cota observados no trecho experimental.	40
Figura 7.	Localização da área de estudo.	49
Figura 8.	Coleta das amostras indeformadas de solo no sítio experimental. A Escavação da trincheira, B aplicação de parafina no bloco de solo, C remoção da 1ª caixa com solo e D aspecto da trincheira antes da coleta das últimas caixas.	51
Figura 9.	Corpo de prova sendo esculpido do bloco de solo indeformado, A e B com segmentos de raiz, C e D sem raízes.	53
Figura 10.	Corpos de prova contendo raízes das espécies (A) <i>Sesbania virgata</i> , na profundidade 0,25 a 0,50 m e (B) <i>Mimosa pigra</i> , na profundidade 0,75 a 1,0 m.	56
Figura 11.	Deformação horizontal dos corpos de prova com raiz das espécies (A) <i>Sesbania virgata</i> , na profundidade 0,25 a 0,50 m, e (B) <i>Mimosa pigra</i> , na profundidade 0,75 a 1,0 m, submetidos às tensões normais 5, 11, 21 e 42 kPa.	57
Figura 12.	Corpo de prova da profundidade 0,75 a 1,0 m apresentando elevado índice de vazios.	60
Figura 13.	Tensão normal e cisalhante para os corpos de prova com e sem raízes da espécie <i>Solanum paniculatum</i> , nas profundidades 0 a 0,25 (A), 0,25 a 0,50 (B), 0,50 a 0,75 (C) e 0,75 a 1,0 m (D).	61
Figura 14.	Tensão normal e cisalhante para os corpos de prova com e sem raízes da espécie <i>Sesbania virgata</i> , nas profundidades 0 a 0,25 (A), 0,25 a 0,50 (B), 0,50 a 0,75 (C) e 0,75 a 1,0 m (D).	63
Figura 15.	Tensão normal e cisalhante para os corpos de prova com e sem raízes da espécie <i>Mimosa pigra</i> , nas profundidades 0 a 0,25 (A), 0,25 a 0,50 (B), 0,50 a 0,75 (C) e 0,75 a 1,0 m (D).	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.	Volume de solo erodido (m^3) nas 24 linhas de medição do sítio experimental durante o ano de 2013.	35
Tabela 2.	Granulometria do solo nas seções e nas profundidades 0 a 20, 20 a 40 e 40 a 60 cm.	37
Tabela 3.	Parâmetros geométricos e hidrológicos da área de estudo.	41
Tabela 4.	Caracterização do solo dos corpos de prova próximos das espécies <i>Solanum paniculatum</i> , <i>Sesbania virgata</i> e <i>Mimosa pigra</i>	54
Tabela 5.	Valores de coesão (c em kPa), ângulo de atrito interno do solo (ϕ°) e peso específico inicial (D_s em $kg\ dm^{-3}$) resultantes dos ensaios de cisalhamento direto para corpos de prova com e sem raiz das espécies <i>Solanum paniculatum</i> , <i>Sesbania virgata</i> e <i>Mimosa pigra</i>	55
Tabela 6.	Valores médios de coesão (c em kPa) e ângulo de atrito interno do solo (ϕ°) para os corpos de prova com e sem raízes.	58
Tabela 7.	Comparação das equações de regressão de resistência ao cisalhamento do solo, após linearização, usando-se o procedimento de Snedecor e Cochran (1989) para os corpos de prova sem raízes (SR) e com raízes (CR), nas profundidades de 0 a 0,25, 0,25 a 0,5, 0,5 a 0,75 e 0,75 a 1,0 m.	66

RESUMO

ROCHA, I. P. **Erosão em talude da margem do Baixo São Francisco e contribuição de raízes na resistência ao cisalhamento do solo**. 2014. 78f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2014.

A região do Baixo São Francisco tem experimentado um processo histórico de exploração não sustentável dos seus recursos naturais, compreendendo diferentes agroecossistemas, cada um, constituído por múltiplas relações entre solo, água, vegetação, macro e microrganismos, que interagem em grande medida à diversidade de seus componentes. Atualmente, as margens do rio apresentam contínuos trechos com vegetação ciliar suprimida e taludes expostos a severos processos erosivos. Quantificar a magnitude destes processos é uma das formas de entender o funcionamento deste hidrossistema para melhor poder conservar seus recursos. Foi realizado o monitoramento da atividade morfológica num trecho do rio São Francisco, de onde foram coletadas amostras indeformadas de solo para análise de resistência ao cisalhamento em laboratório, comparando as amostras unicamente com solos com aquelas permeadas com raízes das espécies *Solanum paniculatum*, *Sesbania virgata* e *Mimosa pigra*. A perda de solo total foi de 35,26 m³, enquanto a magnitude da perda de solo variou mensalmente de 0,00 a 24.300 mm ano⁻¹, e totalizou 475.396,07 mm ano⁻¹. As características hidrodinâmicas e geométricas do curso d'água, como a vazão e proximidade do talvegue à margem são apontados como principais responsáveis por este processo erosivo. As espécies apresentaram comportamentos distintos em relação ao efeito das raízes sobre os atributos estudados. *M. pigra* apresentou os maiores valores de coesão nas profundidades 0,25 a 0,50 m e 0,50 a 0,75 m.

Palavras-chave: Movimentos de massa; Vazão; Perda de solo; Coesão de raízes; Ângulo de atrito interno; Atributos físicos do solo.

ABSTRACT

ROCHA, I. P. **Riverbank erosion at the lower São Francisco river and root contribution to the soil shear strength**. 2014. 78f. Thesis (Doctorate in Agricultural Engineering). Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2014.

The lower São Francisco river has experienced a historical process of non-sustainable exploration of its natural resources, comprising different agroecosystems, each one composed by relationships between soil, water, vegetation, macro and micro-organisms that interact largely due to the diversity of its components. Nowadays, the riparian vegetation is sparse and the riverbanks are under severe erosion processes. Quantifying the magnitude of these processes is one of the ways to understand the workings of this hydric system to achieve the conservancy of its natural resources. The monitoring of the geomorphological activity of the bank was performed at a stretch from the São Francisco River, where undisturbed soil samples were also collected and the direct shear strength tests was performed at the laboratory, comparing the samples just containing soil with the samples permeated by roots of the species *Solanum paniculatum*, *Sesbania virgata* and *Mimosa pigra*. The total soil loss was 35.26 m³, while the magnitude of soil loss ranged monthly from 0.00 to 24,300 mm year⁻¹, and summed 475,396.07 mm year⁻¹. Hydrodynamic and geometric characteristics of the river, such as flow and proximity of the thalweg of the riverbank are indicated out as the main responsible for this erosive process. The vegetal species showed distinct behaviors in relation to the effect of roots on the soil attributes cohesion and internal friction angle. *M. pigra* presented the highest values of cohesion in the 0.25 to 0.50 m and 0.50 to 0.75 m depths.

Keywords: Mass failure; Flow; Soil loss; Root cohesion; Internal friction angle; Physical soil attributes.

INTRODUÇÃO GERAL

Nas últimas décadas a busca por tecnologias ecologicamente mais adequadas para recuperar ambientes degradados tornou-se muito importante. Uma nova forma de desenvolvimento econômico vem sendo construído a fim de criar melhorias no modo de vida das gerações futuras, incorporando nestas os conceitos de produção, agricultura e desenvolvimento sustentável, aliados às técnicas ambientais para recuperar os ambientes naturais e agroecossistemas já degradados.

Pesquisadores ao redor do mundo têm apontado sinais que indicam que uma mudança de paradigma está ocorrendo de dentro para fora da engenharia, enquanto profissão, passando a incorporar abordagens ecológicas ao que antes era concebido somente pela engenharia convencional sem considerar qualquer elemento vivo da natureza.

Embora seja um conceito antigo, Mitsch e Jørgensen (2003) trouxeram à tona a discussão sobre o termo engenharia ecológica, que envolve a criação e recuperação de ecossistemas sustentáveis, agregando valor para os seres humanos e para a natureza. Assim, a Engenharia Ecológica, também conhecida como engenharia natural ou bioengenharia de solos, que combina a ciência básica e aplicada para a restauração, construção, ou concepção dos ecossistemas aquáticos e terrestres. A combinação de práticas tradicionais de engenharia com critérios ecológicos tem efeito imediato, além de promover uma estruturação do solo a longo prazo que possibilita o desenvolvimento da vegetação na área (LI; EDDLEMAN, 2002). Tais técnicas para estabilizar solos e controlar erosão vêm figurando gradativamente na literatura desde os primeiros trabalhos de Schiechl (1973) até as publicações técnicas e científicas (GRAY; SOTIR, 1996; SCHIECHTL; STERN, 1996; SCHIECHTL; STERN, 1997; NORRIS; GREENWOOD, 2003; USDA–NRCS, 2007; ZEH, 2007; CAMPBELL et al., 2008; MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE, 2008; ROBINSON et al., 2008; BURRI et al., 2009; REY, 2009; STOKES et al., 2010; ZHAI et al., 2010; HOLANDA; ROCHA, 2011; REUBENS et al., 2011; SUTILI et al., 2012).

Pahl-Wostl (1995) argumentou que há duas maneiras de um sistema, qualquer que seja ele, ser organizado: por hierarquia (organização imposta) ou por auto-organização. A organização imposta, tal qual a maioria das abordagens de engenharia convencional, resulta em estruturas rígidas e com pouco potencial de adaptação à mudanças, característica altamente desejável para projetos de engenharia onde a previsibilidade de

estruturas seguras e confiáveis são necessárias. Já a auto-organização, desenvolve conexões flexíveis, com um potencial muito maior para a adaptação a situações variáveis (condições meteorológicas, temperatura, luminosidade, etc.), como requerem a maior parte dos projetos de recuperação de áreas degradadas, ramo de aplicação da engenharia ecológica.

Em ambientes tropicais a maior parte das perdas de solo ocorre em áreas que tiveram sua cobertura vegetal original removida ou alterada, tendo como consequência a ocorrência de processos erosivos, tanto em taludes rodoviários, como em áreas de proteção permanente (topos de morro, encostas e margens de cursos d'água).

Simon et al. (2006) chamaram a atenção para o fato de o sistema radicular da vegetação possuir efeitos tanto mecânicos quanto hidrológicos sobre a estabilidade de taludes. Os efeitos mecânicos são em sua maioria benéficos. Por exemplo, quando o solo sofre solicitações de ruptura, as raízes mobilizam sua resistência à tração, de forma que as tensões cisalhantes que se desenvolvem na matriz do solo são transferidas para as fibras das raízes via interface de atrito ao longo do comprimento da raiz (GRAY; BARKER, 2004) ou simplesmente através da resistência mecânica à tração (ENNOS, 1990).

Uma vez que as raízes ancoram-se ao solo para dar suporte a parte aérea da planta, possibilitam ao solo ter sua matriz reforçada. Os solos são considerados fortes sob compressão, porém fracos sob tração e, inversamente, as raízes das plantas são fracas à compressão, mas fortes à tração, ou seja, a combinação entre raízes e a matriz do solo resulta em um corpo mais resistente.

Há tempos, cientistas do solo reconhecem que terras recobertas com vegetação possuem maior resistência às perdas de solo quando comparadas às desnudas. No entanto, a quantificação da parcela de efetiva contribuição da vegetação, especialmente do sistema radicular, no reforço de solos ainda é uma informação escassa, sobretudo para as vegetações em condições tropicais. Para essa finalidade, devem-se conhecer as características técnicas da vegetação para o seu melhor aproveitamento (SUTILI, 2007), com ênfase para seu potencial uso em obras de engenharia natural.

Assim, o primeiro capítulo traz uma ampla e atual revisão do estado da arte dos temas surgentes ao longo do desenvolvimento deste trabalho. Os demais capítulos foram construídos após exaustiva coleta de dados em campo e em laboratório. O segundo investiga a magnitude e os mecanismos de controle do processo erosivo num Neossolo Flúvico situado à margem direita do rio São Francisco. Enquanto o terceiro se propõe

investigar a resistência ao cisalhamento do solo deste mesmo talude fluvial, na presença e ausência de raízes das principais espécies arbustivas que nele ocorrem.

A união e compilação destes capítulos tem o intuito de fornecer conhecimento experimental para ampliar o arcabouço de soluções para o grave problema da erosão em taludes.

OBJETIVO GERAL

Quantificar a taxa de recuo de um trecho da margem direita do rio São Francisco, em seu baixo curso, e investigar a influência das raízes de espécies vegetais tropicais nos atributos físicos coesão e ângulo de atrito interno do solo, por meio da sua resistência ao cisalhamento.

CAPÍTULO 1

REVISÃO DE LITERATURA

CAPÍTULO 1. REVISÃO DE LITERATURA

O Baixo São Francisco

O Baixo São Francisco estende-se do município de Paulo Afonso (BA) à foz, no Oceano Atlântico, estando presente nos Estados da Bahia, Pernambuco, Sergipe e Alagoas. A altitude varia de 200 m até o nível do mar, embora algumas serras atinjam 500 m (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2006).

O baixo curso abrange uma área de 19.986,67 km², equivalente a 3,14% da área total da bacia. No Estado de Sergipe ocupa área de drenagem de 7.181 km², sendo 5.619 km² na região semiárida, 616 km² na região agreste, 946 km² na região litorânea, abrangendo 22 municípios do Estado de Sergipe (CODEVASF, 1999).

Entre os municípios de Própria (SE) e Neópolis (SE), o vale fluvial desenvolve-se sobre a unidade morfoestrutural composta por terrenos sedimentares mesozoicos, enquanto o relevo circundante é constituído por tabuleiros costeiros. A partir deste ponto, o rio corre sobre terrenos quaternários, no qual se desenvolveu uma feição do tipo deltaica, formada por depósitos aluviais e litorâneos que constituem a planície costeira (FONTES, 2002).

O clima da região é quente, do tipo semiúmido, com temperatura média anual de 25 °C, e apresenta estação chuvosa entre os meses de março e setembro com precipitação pluvial de 800 a 1.300 mm, ou seja, no inverno, enquanto no restante da bacia as chuvas se verificam no verão (BRASIL; OEA, 2004).

O perfil longitudinal do Baixo São Francisco pode ser dividido em dois trechos com declividades distintas. O primeiro está entre Paulo Afonso (BA) e Piranhas (AL), e possui aproximadamente 65 km de extensão, onde ocorre uma declividade média de 1,8 m km⁻¹, já o segundo, de Piranhas até a foz, possui cerca de 200 km de extensão com declividade média de 0,5 m km⁻¹ (FONTES, 2002).

Solos aluviais

Quanto a origem, os solos podem ser denominados residuais ou sedimentares. São chamados de solos residuais aqueles que, através do processo de intemperismo, se formam diretamente sobre sua rocha matriz. Com o tempo, estes solos sofrem a ação de agentes erosivos (e.g. chuva, vento, gelo, etc.), são transportados através de córregos e rios, e, finalmente, são depositados na forma de sedimentos no fundo de lagos ou mares. Este processo pode ocorrer por milhares ou milhões de anos, sendo as camadas mais profundas destes solos submetidas a compressão, ou consolidação, devido a contínua deposição de

camadas adicionais. Os solos formados desta forma são chamados de solos sedimentares ou solos transportados (KNAPPETT; CRAIG, 2012; WESLEY, 2009).

Solos aluviais são tipicamente encontrados em níveis topográficos que são inundados periodicamente pela elevação de águas superficiais ou subterrâneas, a exemplo de planícies de inundações e deltas de rios, assim como planícies costeiras (PLASTER, 2013). De acordo com Young (1980), na zona climática tropical os processos de formação destes solos podem ser divididos entre os de sedimentação, os de formação inicial do solo (pedogênese), os processos esperados para esta zona climática, e os processos específicos para solos de aluvião.

Diversos autores concordam que a sedimentação ocorre onde a velocidade de carreamento dos sedimentos pela água é reduzida, desta forma, o tamanho das partículas depositadas são totalmente dependentes da velocidade do fluxo (CHRISTOFOLETTI, 1981; ROSGEN, 1994; ROBERT, 2003; JAIN, 2014).

É possível observar a evidência deste fenômeno num vale aluvial através da variação na granulometria dos sedimentos encontrados em diferentes componentes geomorfológicos da planície de inundação, com a predominância de sedimentos arenosos grosseiros em canais trançados, areias finas e siltes na porção principal da planície, e argilas em pântanos, brejos, lagoas marginais e outras depressões (WRIGHT; MARRIOTT, 1993; MIALL, 2014).

Em deltas, as croas e outras formações elevadas formam padrões de ramificação e, quando em regime de baixa maré, a dimensão de lagoas e pântanos é relativamente mais extensa que em outros trechos do rio (YOUNG, 1980). De forma geral, este tipo de relevo aluvial positivo por sedimentação é criado através de uma gama de escalas de espaço e tempo (LEWIN; ASHWORTH, 2014), isto faz com que ocorra a formação de bolsões de sedimentos espacialmente desuniformes, que caracteriza a heterogeneidade acentuada dos atributos físico-químicos destes solos (BRIDGE, 2003; HORN et al., 2012).

Relativos a formação inicial do solo, ocorrem os processos denominados maturação e homogeneização do solo. O processo de maturação afeta principalmente as argilas e possui forte influencia sobre suas propriedades de resistência. Segundo Breemen e Buurman (2003) este termo foi designado em analogia ao processo de maturação de queijos, quando ao pressionar uma massa inicialmente úmida com sólidos de leite ocorre a expulsão da água, seguida por um período de mais perda de água por evaporação. Assim, quando submersa, a fração argila se encontra ligeiramente comprimida, saturada, quimicamente na forma reduzida e com baixa capacidade de suporte de carga.

No entanto, quando a porção de argila é submetida a condição de drenagem e evaporação do excesso de água, ocorre o desenvolvimento de fendas de secagem, e perda de uma parte da sua matéria orgânica por oxidação, o que leva a sua consolidação e retração, com um conseqüente aumento da sua resistência mecânica. Ao lado destas alterações ocorre a oxidação de alguns compostos de ferro para formas férricas. O processo de amadurecimento é irreversível, uma vez consolidada a argila não vai absorver a mesma quantidade de água, se novamente saturada (PONS; ZONNEVELD, 1965).

O processo de homogeneização é a eliminação das características deposicionais das camadas de solo, principalmente estrutural, mas também as características de composição química. Os principais agentes atuantes são biológicos: raízes de plantas, insetos e microrganismos. Em longo prazo, a translocação da própria fração argila passa a atuar como agente neste processo (YOUNG, 1980). Segundo o autor, quando solos de várzeas permanecem submersos por um período superior a quatro meses, seus constituintes, em especial silte e argila, se apresentam na coloração cinza, evidenciando sua redução química. Este material pode ser derivado por translocação do solo ou depositado quando o solo está submerso.

Em se tratando de solos tropicais, o fator climático, principalmente o regime de precipitação, possui forte influencia na variabilidade espacial das propriedades químicas em grandes áreas (NANSON; CROKE, 1992; WRIGHT; MARRIOTT, 1993). Nas zonas áridas deste ecossistema as reações químicas são normalmente alcalinas e observa-se comumente a presença de calcrete e solos aluviais salinos (KHADKIKAR et al., 1998). Nas regiões climáticas com um regime de savana, incluindo as regiões de monções, os solos aluviais são caracterizados por serem neutros a fracamente alcalinos, podendo ocorrer concreções de carbonato de cálcio em profundidade (SARMIENTO; MONASTERIO, 1975). Já nas zonas com elevada precipitação (zona úmida), existem vários tipos de solos aluviais gleisados e aqueles os quais o aluvião mais velho foi lixiviado, as reações químicas podem transformá-los em moderadamente ácido (YOUNG, 1980).

Localmente, solos aluviais podem variar de acordo com o tipo de rocha matriz dentro da bacia produtora dos seus sedimentos. Isto certamente afeta a textura e outras propriedades físico-químicas do solo, incluindo os minerais de argila. Nesta escala, no entanto, a principal diferenciação dos solos aluviais se deve a diferença entre os perfis de solos compostos predominantemente por textura grossa, média ou fina, e entre aqueles com

lençol freático mais elevado ou mais baixo. Estas propriedades são determinadas pelos processos de sedimentação (WESLEY, 2009).

No Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2013) os solos que estão nestas áreas são classificados como NESSOSOLOS FLÚVICOS, e, como todo NEOSSOLO, são solos jovens, pouco evoluídos, constituídos por material mineral ou orgânico com menos de 20 cm de espessura, e não apresentam qualquer tipo de horizonte B diagnóstico. Ocorrem em ambientes específicos, dispostos em camadas de sedimentos aluviais e apresentam caráter flúvico, horizonte glei, ou horizontes de coloração pálida, variegada ou com mosqueados abundantes ou comuns de redução, se ocorrem abaixo do horizonte A, deve estar a profundidades superiores a 150 cm.

Para EMBRAPA (2013) o caráter flúvico é um atributo diagnóstico utilizado exclusivamente para a identificação de solos formados por sedimentos de natureza aluvionar, desde que estes apresentem pelo menos um dos seguintes requisitos: distribuição irregular do conteúdo de carbono orgânico em profundidade, não relacionada a processos pedogenéticos; e/ou camadas estratificadas em 25% ou mais do volume do solo.

Já o horizonte glei, de acordo com a mesma publicação, é um horizonte diagnóstico, com menos de 15% de plintita, que está fortemente associado a influencia do lençol freático durante algum período ou todo o ano, a não ser que tenha sido artificialmente drenado, apresentando evidências de processos de redução, com ou sem segregação de ferro.

Conforme visto, as características elencadas anteriormente fazem com que os solos aluviais (Neossolos Flúvicos) apresentem padrões variados na distribuição espacial dos seus atributos físico-químicos que são significativamente influenciados por alguns fatores ambientais, como o clima, topografia, fonte de sedimentos e padrão de deposição, sendo que cada um deste fator opera em uma escala diferente (CHEN et al., 1997; MCKENZIE; RYAN, 1999).

Erosão marginal

Em um canal natural, os fatores que mais diretamente afetam o grau de estabilidade das margens, a taxa de avanço e a duração da erosão marginal são as características hidrodinâmicas do fluxo nas proximidades das margens, a geometria do canal, as ondas provocadas pelo vento e os fatores climáticos e biológicos (SIMON et al., 2000; HENSHAW et al., 2012). A partir de uma mesma situação hidrodinâmica, a erosão de uma

margem passa a depender, sobretudo, das características do talude (altura, geometria, estrutura, propriedades mecânicas de seus constituintes).

A intensidade do processo erosivo está vinculada às magnitudes dos eventos climáticos, principalmente à intensidade do vento e dos eventos hidrológicos, bem como a variação da vazão, a variação da cota e a velocidade do fluxo. Isso, associado aos atributos físicos do talude em cada trecho do rio, faz com que as taxas erosivas sejam maiores em determinadas épocas do ano e em trechos específicos (HOLANDA et al., 2005; ROCHA et al., 2013).

A taxa de erosão e o recuo da linha da margem estão diretamente relacionados à energia da onda incidente no talude. Rocha et al. (2013) em estudos realizados no Baixo São Francisco, atribuíram as alterações em seções transversais principalmente a ação do embate das ondas na base do talude marginal.

Resistência ao cisalhamento do solo

Um dos atributos mais importantes para caracterizar os solos quanto a resistência à erosão é a associação entre coesão e ângulo de atrito das suas partículas sólidas, resultando na resistência ao cisalhamento (ORTIGÃO, 2007; BRAIDA et al., 2007). A resistência foi definida por Silva e Cabeda (2005) como a tensão máxima cisalhante que o solo pode suportar sem sofrer ruptura. É influenciada pela forma e distribuição de partículas do solo, estrutura, densidade, teor de água, tipo de argilomineral, tipo e quantidade de cátions presentes e forças de repulsão e atração entre partículas (McCORMACK e WILDING, 1979; THORNE, 1981; BRAIDA et al., 2007).

Lebert e Horn (1991) explicam que em solos arenosos, a resistência ao cisalhamento depende basicamente do atrito entre as partículas, distribuição de diâmetro dos grãos e grau de compactação do solo. Enquanto que para solos argilosos, a resistência ao cisalhamento depende não só do atrito entre partículas, mas também da coesão do solo e da sua estabilidade estrutural.

A resistência do solo ao cisalhamento (τ) pode ser expressa pela equação de Coulomb (Equação 1).

$$\tau = c + \sigma \tan \Phi \quad (1)$$

Na equação, os parâmetros c e Φ representam a coesão e o ângulo de atrito entre as partículas do solo, respectivamente. Rocha et al. (2002) e Silva et al. (2004) explicam que estes parâmetros são intrínsecos ao solo, sendo determinados por suas propriedades e

atributos, tais como textura, estrutura, teor de matéria orgânica, densidade, mineralogia e teor de água.

A coesão pode ser definida como a força de atração entre as superfícies das partículas do solo. Parker et al. (2008) explicam que a coesão pode ser dividida em coesão específica e coesão aparente. A primeira é resultado do efeito dos agentes cimentantes, como teor de óxidos de Fe e Al e de argilas silicatadas, bem como o resultado da atração entre partículas próximas por forças eletrostáticas (MITCHELL; SOGA, 2005). A coesão aparente, normalmente é atribuída à solos não saturados e pode ser definida como o resultado da tensão superficial da água nos poros do solo, formando menisco capilares de água entre as partículas dos solos aproximando-as. Muitas vezes emprega ao solo uma coesão que não é própria dele, porém quando o mesmo perde umidade a coesão aparente diminui (FREDLUND; RAHARDJO, 1993).

Ângulo de atrito é o ângulo máximo que a força transmitida ao solo pode fazer com a força normal à superfície de contato, sem que haja o cisalhamento do solo no plano de ruptura (LAMBE, 1951). Este ângulo representa as características friccionais entre as partículas do solo, e é dependente de fatores como densidade do solo, percentagem e tipo de argilomineral, tamanho e forma dos grãos de areia do solo. O ângulo de atrito interno é alterado quando a densidade do solo é modificada. Braida et al. (2007) identificaram menores valores de ângulo de atrito para amostras com maiores teores de matéria orgânica. Da mesma forma, quanto maior for a presença da fração argila, menor será o ângulo de atrito interno das partículas do solo (Al-SHAYEA, 2001; SILVA e CARVALHO, 2007; PARKER et al., 2008).

O método mais empregado para aferir a resistência ao cisalhamento de solos foi proposto por Lambe (1951), denominado de Direct Shear Test (DST) – Teste de Cisalhamento Direto – que consiste no deslizamento da metade superior do corpo de prova do solo em relação à inferior, determinando-se, assim, para cada tensão normal (σ_n) aplicada à superfície de deslizamento, o valor da força cortante (τ) necessária para provocar a deformação contínua do solo até à ruptura do corpo de prova.

Hooke (1979) comenta que um dos fatores contribuintes para a erosão das margens de rios é a umidade do solo. Parker et al. (2008) explicam que isto ocorre porque quando o teor de água está elevado aumenta o efeito lubrificante entre as partículas de solo, fazendo com que as mesmas estejam mais separadas. Neste sentido os solos aluviais estão mais susceptíveis a erosão fluvial por apresentarem baixa coesão e plasticidade (THORNE,

1981). Este fenômeno é mais comum na base do talude marginal, pois é área que está em contato direto com a lâmina d'água.

Os resultados encontrados por Arvidsson et al. (2001), Silva e Cabeda (2005) e Braida et al. (2007) evidenciam o efeito da umidade na coesão do solo. Fredlund e Rahardjo (1993) explicam que a diminuição do teor de água no solo reduz a distância entre as partículas, havendo um consequente aumento da atração entre elas, resultando num acréscimo da coesão do solo.

Com relação a densidade do solo, Zhang et al. (2001), Rocha et al. (2002) e Silva e Cabeda (2005) identificaram maiores valores da resistência ao cisalhamento nos solos cultivados em relação aos solos ainda não mecanizados. Segundo os autores, este fato pode estar relacionado ao tráfego de máquinas nas atividades de cultivo, uma vez que o aumento da densidade aproxima as partículas do solo e faz com que o ângulo de atrito interno seja reduzido.

Estabilidade de taludes

O processo de erosão das margens de rios também está intimamente relacionado à composição do seu solo e propriedades mecânicas correspondentes. O solo marginal é classificado como coesivo ou não coesivo, e pode incluir várias camadas de solo. Estabilidade de margens coesas depende de inúmeras variáveis como as propriedades do solo e estrutura (VAN KLAVEREN; MCCOOL, 1998), as condições de umidade (SIMON et al., 2000), e as forças eletroquímicas complexas entre partículas coesivas, fluxo e vegetação (PIZZUTO et al., 2010; WYNN; MOSTAGHIMI, 2006).

Uma previsão razoável da erosão marginal pode ser fornecida por avaliações qualitativas dos diversos elementos que influenciam na estabilidade das margens do rio (HUNT, 1990). Os vários mecanismos de erosão das margens geralmente se enquadram em dois grupos principais: remoção de material e falência da massa.

O primeiro grupo apresenta remoção direta de solo da margem pela ação física do fluxo de água e dos sedimentos que ele carrega. A erosão em *piping* é uma forma deste tipo de erosão, que envolve a remoção de partículas de solo em subsuperfície, ocorrendo a formação de canais semelhantes a tubos com livre saída. Já o solapamento da base do talude fluvial é caracterizado pela contínua remoção do material da margem, ocorre uma alteração na declividade do talude com sobrepeso da massa de solo e alteração do seu ângulo de inclinação.

O segundo grupo, que inclui colapso e afundamento da margem, é caracterizado pela instabilidade de grandes massas de solo do talude, que tombam no córrego ou rio em eventos individuais. Falência de massa é, muitas vezes, dominante em regiões de baixo curso de grandes rios e frequentemente ocorrem em associação com a remoção dos taludes mais baixos. Deslizamentos de terra ou falência de massa ocorrem quando as forças promotoras de instabilidade são maiores do que aquelas que promovem a estabilidade de taludes (CONFORTH, 2005), que interagem com a geometria do canal do rio e com o fluxo de água, governando o transporte de sedimentos no rio (BERTRAND, 2010).

Reforço do solo por raízes

A vegetação é reconhecida pela comunidade científica, desde os tempos mais remotos, como um agente extremamente eficiente para proteger o solo do impacto das gotas de chuva (efeito *splash*) e reduzir a velocidade do escoamento superficial que pode resultar em erosão, em seus diversos níveis. Além disso, nas últimas décadas muitos cientistas também passaram a reconhecê-la como um importante elemento para aumentar significativamente a resistência ao cisalhamento do solo, esta assertiva pode ser verificada nos trabalhos de Gray e Sotir (1996), Operstein e Frydman (2000), Baets et al. (2007), Norris et al. (2008), Fan e Lai (2014), dentre outros.

Com relação à estabilidade de taludes, as características mais importantes das plantas são aquelas que se encontram sob o solo, como a morfologia e topologia do sistema radicular, que possuem forte influência sobre a resistência ao cisalhamento do solo (DANJON; REUBENS, 2008; MAFIAN et al., 2009).

Segundo Mao et al. (2012), no que diz respeito à coesão emprestada pelas raízes ao solo, a densidade de raízes e características arquitetônicas são, provavelmente, mais importantes do que as características mecânicas da raiz, muito embora, segundo os autores, corroborados por Genet et al. (2005), a rigidez e a resistência à tração da raiz sejam as principais características que influenciam a resistência ao cisalhamento do solo.

Yen (1987) propôs cinco tipos de arquitetura do sistema radicular baseado no comportamento de ramificação das raízes. Para o autor, os tipos que oferecem os maiores benefícios para a estabilização de taludes e resistência eólica são aqueles que possuem a maior parte das suas raízes dispostas de forma alongada horizontalmente.

Reubens et al. (2007) classificaram a arquitetura do sistema radicular com base nas características morfológicas da planta, e concluíram, concordando com os encontrados por Operstein e Frydman (2000), Gray e Barker (2004) e Genet et al. (2005), que espécies que

apresentam denso enraizamento de raízes finas (promovem resistência tênsil à camada superior do solo) combinado com raízes grossas e profundas (promovem flexibilidade e resistência ao cisalhamento do solo) são mais eficientes contra rupturas superficiais em taludes.

Mesmo quando o plano de corte é forçado como nos ensaios de cisalhamento direto, as características da arquitetura da raiz nas posições acima e abaixo do plano de cisalhamento podem desempenhar um papel importante sobre as propriedades mecânicas do solo (GHESTEM et al., 2014). Os autores explicam que as raízes grossas oferecem flexão em relação ao plano de ruptura, quando estão acima deste, no entanto, quando abaixo, aquelas perpendiculares à direção do plano são as que mais contribuem para a resistência ao cisalhamento do solo, efetivamente atuando como tirantes.

O reforço de um plano de deslizamento por uma raiz grossa é influenciado principalmente pelas seguintes características arquitetônicas no plano de intersecção: área da seção transversal da raiz, ângulo da raiz em relação ao plano de ruptura, comprimento médio das raízes e comprimento total de raízes após o ponto de intersecção (WU et al., 1988; WU, 1995).

A influência destas características arquitetônicas e de parâmetros do solo na tensão de ancoragem das raízes foi investigada através de modelagem numérica (DUPUY et al., 2005), que estabeleceu relações entre análises direcionadas tanto ao solo como também para as plantas. Os resultados mostraram que a resistência proporcionada pelo elemento raiz pode ser bem correlacionada com o número de ramos no padrão de enraizamento.

Para Fan e Chen (2010) a arquitetura do sistema radicular desempenha papel importante no comportamento mecânico de solos com raízes. Estes autores investigaram cinco espécies com os tipos de arquitetura radicular proposto por Yen (1987) e estabeleceram a correlação entre o incremento de resistência ao cisalhamento e a força tênsil das raízes por unidade de solo.

No que diz respeito à resistência ao cisalhamento do solo permeado com raízes, mecanicamente, as raízes formam uma rede dentro do solo, tornando-se o principal elemento de resistência (HUAT; KAZEMIAN, 2010). Dessa forma, os tipos e as propriedades das raízes são fundamentais para determinar seu reforço contra cisalhamentos em solos.

No entanto, a resistência ao cisalhamento adicionada pelas raízes depende da orientação e do número de raízes em relação ao plano de ruptura, de modo que, quanto maior a concentração de raiz atravessando o plano de ruptura, maior será o incremento de

resistência ao cisalhamento, conseqüentemente, o reforço que o solo receberá contra deslizamentos de terra (ABE; ZIEMER, 1991; DANJON; REUBENS, 2008).

A coesão do solo é crucial no cisalhamento do solo, em muitos casos, foi reconhecido que a raiz da planta contribuiu para o aumento da coesão global do solo (WU et al., 1988; OPERSTEIN; FRYDMAN, 2000; REUBENS et al., 2007). Zhang et al. (2010) constatou que aumento do teor de água no solo diminui a coesão do solo. Com a presença de raiz, no entanto, o processo de evapotranspiração do conteúdo de água no solo aprimora o processo de sucção matricial, contribuindo, assim, para o aumento no fator de segurança, especialmente em terrenos inclinadas (POLLEN-BANKHEAD; SIMON, 2010).

Abdullah et al. (2011) estudaram as características de resistência ao cisalhamento do solo das raízes de três espécies de plantas tropicais (*Acacia mangium*, *Dillenia suffruticosa* e *Leucaena leucocephala*). No entanto, resgatando os achados de Abe e Zimer (1991), para *D. suffruticosa* os autores encontraram uma quantidade de raízes localizadas no plano de ruptura inferior à necessária para oferecer resistência ao cisalhamento, apesar de a espécie ter apresentado alta densidade de comprimento da raiz. Por outro lado, os indivíduos de *A. mangium* e *L. leucocephala* com maior diâmetro da raiz obtiveram elevados valores de resistência ao cisalhamento do solo devido ao fato de as longas raízes verticais atingir o plano de corte.

Tosi (2007) e Wu (2013) explicaram que raízes finas possuem uma resistência à tração muito maior em comparação às raízes grossas, pois, elas tendem a emprestar sua elasticidade máxima durante a solicitação do esforço, elevando a resistência ao cisalhamento do solo. Estas raízes atuam como elementos de tração dentro da matriz do solo, enquanto as raízes de grande diâmetro também podem atuar como tirantes que conectam o horizonte superficial a porções de solos estáveis subjacentes ou adjacentes (DANJON; REUBENS, 2008).

Abdullah et al. (2011) afirmam que este recurso ajuda a raiz a interseção do plano de deslizamento e reduz a probabilidade de movimento que leva a deslizamento de terra. Mais ainda, sugerem que plantas, tais como *D. suffruticosa* são adequadas para ser utilizadas como um reforço na base do talude, onde as raízes tenderiam a melhorar a coesão, enquanto espécies como *A. mangium* e *L. leucocephala* tendem a ancorar melhor o solo no meio do talude, onde a penetração profunda da raiz principal (pivotante) cruza o plano de corte.

Contudo, a depender do tipo de vegetação, sua presença também pode interferir negativamente na estabilidade de taludes. Genet et al. (2010) afirmaram que, em longo

prazo, a estabilidade de um talude pode ser afetada pela posição das árvores no mesmo. Os autores explicaram que, se a porção inferior do talude estiver desprovida de vegetação e a porção superior possuir uma cobertura vegetal densa, existe a probabilidade de o peso da vegetação na parte superior resultar em uma redução no fator de segurança (FS) do talude, que é uma medida do risco de colapso de um talude.

Norris et al. (2008) consideram estáveis aqueles taludes com fator de segurança acima de 1,3. Por outro lado, Genet et al. (2010) concluíram também que a carga adicional fornecida pelo peso da vegetação na parte inferior do talude pode aumentar sua estabilidade, aumentando o seu fator de segurança.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDULLAH, M. N.; OSMAN, N.; ALI, H. F. Soil-root Shear Strength Properties of Some Slope Plants. **Sains Malaysiana**, v. 40, n. 10, p. 1065–1073, 2011.

ABE, K.; ZIEMER, R. R. Effect of tree roots on a shear zone: modeling reinforced shear stress. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 21, n. 7, p. 1012–1019, 1991.

AL-SHAYEA, N. A. The combined effect of clay and moisture content on the behavior of remolded unsaturated soils. **Engineering Geology**, v. 62, p. 319-342, 2001.

ARVIDSSON, J.; TRAUTNER, A.; VAN DEN AKKER, J.J.H.; SCHJONNING, P. Subsoil compaction caused by heavy sugarbeet harvesters in southern Sweden. II. Soil displacement during wheeling and model computations of compaction. **Soil and tillage research**, v. 60, p. 79-89, 2001.

BAETS, S.; POESEN, J.; KNAPEN, A.; BARBERÁ, G. G.; NAVARRO, J. A. Root characteristics of representative Mediterranean plant species and their erosion-reducing potential during concentrated runoff. **Plant and Soil**, v. 294, n. 1-2, p. 169–183, 2007.

BERTRAND, F. **Fluvial erosion measurements of streambank using Photo-Electronic Erosion Pins (PEEP)**. 2010. 111f. Dissertação (Mestrado em Civil and Environmental Engineering). University of Iowa, Iowa City, 2010.

BRAIDA, J. A.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; SOARES, J. M. D. Coesão e atrito interno associados aos teores de carbono orgânico e de água de um solo franco arenoso. **Ciência Rural**, v. 37, n. 6, p. 1646-1653, 2007.

BREEMEN, N.; BUURMAN, P. **Soil Formation**. 2. ed. Dordrecht: Springer Netherlands, 2003. 404p.

BRIDGE, J. S. **Rivers and Floodplains: Forms, Processes and Sedimentary Record**. Malden: Blackwell, 2003. 504p.

- BURRI, K.; GRAF, F.; BÖLL, A. Revegetation measures improve soil aggregate stability : a case study of a landslide area in Central Switzerland. **Forest Snow and Landscape Research**, v. 82, n. 1, p. 45–60, 2009.
- CAMPBELL, S. D. G.; SHAW, R.; SEWELL, R. J.; WONG, J. C. F. **Guidelines for soil bioengineering applications on natural terrain guidelines for applications on natural terrain**. Hong Kong, 2008.
- CHEN, Z.-S.; HSIEH, C.-F.; JIANG, F.-Y.; HSIEH, T.-H.; SUN, I.-F. Relations of soil properties to topography and vegetation in a subtropical rain forest in southern Taiwan. **Plant Ecology**, v. 132, n. 2, p. 229–241, 1997.
- CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia fluvial**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1981. 312p.
- CODEVASF - COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO DO VALE DO SÃO FRANCISCO E PARNAÍBA. **Inventário dos Projetos de Irrigação**. 3. ed. Brasília, 1999. 224p.
- BRASIL; OEA - ORGANIZAÇÃO DOS ESTADOS AMERICANOS. **Projeto de Gerenciamento Integrado das Atividades Desenvolvidas em Terra na Bacia do São Francisco**: Programa de Ações Estratégicas para o Gerenciamento Integrado da Bacia do Rio São Francisco e da sua Zona Costeira – PAE. Relatório Final. Brasília: TODA Desenho e Arte, 2004. 333p.
- CONFORTH, D. H. **Landslides in practice**: investigations, analysis and remedial/preventive options in soils. Hoboken: John Wiley & Sons, 2005. 624p.
- DANJON, F.; REUBENS, B. Assessing and analyzing 3D architecture of woody root systems, a review of methods and applications in tree and soil stability, resource acquisition and allocation. **Plant and Soil**, v. 303, n. 1-2, p. 1-34, 2008.
- DUPUY, L.; FOURCAUD, T.; STOKES, A. A Numerical Investigation into the Influence of Soil Type and Root Architecture on Tree Anchorage. **Plant and Soil**, v. 278, n. 1-2, p. 119–134, 2005.
- EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 2013. 353p.
- ENNOS, A. R. The Anchorage of Leek Seedlings: The Effect of Root Length and Soil Strength. **Annals of Botany**, v. 65, n. 4, p. 409–416, 1990.
- FAN, C.; CHEN, Y. The effect of root architecture on the shearing resistance of root-permeated soils. **Ecological Engineering**, v. 36, n. 6, p. 813–826, 2010.
- FAN, C. C.; LAI, Y. F. Influence of the spatial layout of vegetation on the stability of slopes. **Plant and Soil**, v. 377, n. 1-2, p. 83–95, 2014.
- FONTES, L. C. S. **Erosão marginal no baixo curso do rio São Francisco: um estudo de caso de impactos geomorfológicos à jusante de grandes barragens**. 2002. 321f.

Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente). Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2002.

FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H. **Soil mechanics for unsaturated soils**. New York: John Wiley, 1993. 544p.

GENET, M.; STOKES, A.; SALIN, F.; et al. The Influence of Cellulose Content on Tensile Strength in Tree Roots. **Plant and Soil**, v. 278, n. 1-2, p. 1–9, 2005.

GENET, M.; STOKES, A.; FOURCAUD, T.; NORRIS, J. E. The influence of plant diversity on slope stability in a moist evergreen deciduous forest. **Ecological Engineering**, v. 36, n. 3, p. 265–275, 2010.

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. 1-2, p. 43–61, 2014.

GRAY, D. H.; BARKER, D. Root-soil mechanics and interactions. In: J. J. BENNETT; A. SIMON (Eds.); **Riparian vegetation and fluvial geomorphology**. New York: American Geophysical Union, p.113–123, 2004.

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

HENSHAW, A. J.; THORNE, C. R.; CLIFFORD, N. J. Identifying causes and controls of river bank erosion in a British upland catchment. **Catena**, v. 100, p. 107–119, 2012.

HOLANDA, F. S. R.; SANTOS, L. G. C.; SANTOS, C. M. CASADO, A. P. B.; PEDROTTI, A.; RIBEIRO, G. T. Riparian vegetation affected by bank erosion in the lower São Francisco river, Northeastern Brazil. **Revista Árvore**, v. 29, n. 2, p. 327–336, 2005.

HOLANDA, F. S. R.; ROCHA, I. P. Streambank Soil Bioengineering Approach to Erosion Control. In: A. Carpi (Ed.). **Progress in Molecular and Environmental Bioengineering – From Analysis and Modeling to Technology Applications**. Rijeka: InTech, p.553–576, 2011.

HOOKE, J. M. An analysis of the processes of river bank erosion. **Journal of Hydrology**, v. 42, n. 1-2, p. 39–62, 1979.

HORN, J. D.; FIELDING, C. R.; JOECKEL, R. M. Revision of Platte River Alluvial Facies Model Through Observations of Extant Channels and Barforms, and Subsurface Alluvial Valley Fills. **Journal of Sedimentary Research**, v. 82, n. 2, p. 72–91, 2012.

HUAT, B. B. K.; KAZEMIAN, S. Study of root theories in green tropical slope stability. **Electronic Journal of Geotechnical Engineering**, v. 15, p. 1424–1429, 2010.

HUNT, E. Judgment assessment of slopes in tropical climates. **Solos e Rochas - Revista Brasileira de Geotecnia**, v. 13, p. 46-64, 1990.

- JAIN, S. Streams. In: S. Jain (Ed.); **Fundamentals of Physical Geology**. New Delhi: Springer India, p.165–210, 2014.
- KHADKIKAR, A. S.; MERH, S. S.; MALIK, J. N.; CHAMYAL, L. S. Calcretes in semi-arid alluvial systems: formative pathways and sinks. **Sedimentary Geology**, v. 116, n. 3-4, p. 251–260, 1998.
- KNAPPETT, J.; CRAIG, R. F. **Craig's Soil Mechanics**. 8 ed. Abingdon: Spon press, 2012. 464p.
- LAMBE, T. W. **Soil testing for engineers**. New York: John Wiley, 1951. 165p.
- LEBERT, M; HORN, T. A method to predict the mechanical strength of agricultural soils. **Soil and Tillage Research**, v. 19, p. 275-286, 1991.
- LEWIN, J.; ASHWORTH, P. J. The negative relief of large river floodplains. **Earth-Science Reviews**, v. 129, p. 1–23, 2014.
- LI, M.; EDDLEMAN, K. E. Biotechnical engineering as an alternative to traditional engineering methods A biotechnical streambank stabilization design approach. **Landscape and urban planning**, v. 60, p. 225–242, 2002.
- MAFIAN, S.; HUAT, B. B. K.; GHIASI, V. Evaluation on Root Theories and Root Strength Properties in Slope Stability. **European Journal of Scientific Research**, v. 30, n. 4, p. 594–607, 2009.
- MAO, Z.; SAINT-ANDRÉ, L.; GENET, M.; et al. Engineering ecological protection against landslides in diverse mountain forests: Choosing cohesion models. **Ecological Engineering**, v. 45, p. 55–69, 2012.
- MCCORMACK, D. E.; WILDING, L. P. Soil properties influencing strength of Cranfield and Geeburg soils. **Soil Science Society of American Journal**, v. 43, n.1, p.167-173, 1979.
- MCKENZIE, N. J.; RYAN, P. J. Spatial prediction of soil properties using environmental correlation. **Geoderma**, v. 89, n. 1-2, p. 67–94, 1999.
- MIALL, A. Autogenic Processes: Avulsion and Architecture. In: A. Miall (Ed.); **Fluvial Depositional Systems**. p.69–119, 2014. Cham: Springer International Publishing.
- MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE. **Le génie végétal: Un manuel technique au service de l'aménagement et de la restauration des milieux aquatiques**. Paris: La Documentation française, 2008. 290p.
- MITCHELL, J. K.; SOGA, K. **Fundamentals of soil behavior**. 3. ed. New York: John Wiley, 2005. 592p.
- MITSCH, W. J.; JØRGENSEN, S. E. Ecological engineering: A field whose time has come. **Ecological Engineering**, v. 20, n. 5, p. 363–377, 2003.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Caderno da Região Hidrográfica do São Francisco**. Brasília: MMA, 2006. 146p.

NANSON, G. C.; CROKE, J. C. A genetic classification of floodplains. **Geomorphology**, v. 4, n. 6, p. 459–486, 1992.

NORRIS, J. E.; GREENWOOD, J. R. In-situ shear box and root pull-out apparatus for measuring the reinforcing effects of vegetation. **Field Measurements in Geomechanics**. p.593–597, 2003.

NORRIS, J. E.; STOKES, A.; MICKOVSKI, S. B.; et al. (EDS.). **Slope Stability and Erosion Control: Ecotechnological Solutions**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2008.

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

ORTIGÃO, J. A. R. **Introdução à mecânica dos solos dos estados críticos**. 3. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2007. 386p.

PAHL-WOSTL, C. **The Dynamic Nature of Ecosystems: Chaos and Order Entwined**. Chichester: John Wiley and Sons, 1995. 280p.

PARKER, C.; SIMON, A.; THORNE, C. R. The effects of variability in bank material properties on riverbank stability: Goodwin Creek, Mississippi. **Geomorphology**, v. 101, n. 4, p. 533-543, 2008.

PIZZUTO, J.; O'NEAL, M.; STOTTS, S. On the retreat of forested, cohesive riverbanks. **Geomorphology**, v. 116, n 3-4, p. 341-352, 2010.

PLASTER, E. **Soil Science and Management**. 6. ed. Cengage Learning, 2013. 544p.

POLLEN-BANKHEAD, N.; SIMON, A. Hydrologic and hydraulic effects of riparian root networks on streambank stability: Is mechanical root-reinforcement the whole story? **Geomorphology**, v. 116, n. 3-4, p. 353–362, 2010.

PONS, L. J.; ZONNEVELD, I. **Soil ripening and soil classification: Initial soil formation of alluvial deposits with a classification of the resulting soils**. Wageningen: H. Veenman, 1965. 126p.

REUBENS, B.; POESEN, 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.

REUBENS, B.; MOEREMANS, C.; POESEN, J.; et al. Tree species selection for land rehabilitation in Ethiopia: from fragmented knowledge to an integrated multi-criteria decision approach. **Agroforestry Systems**, v. 82, n. 3, p. 303–330, 2011.

REY, F. A strategy for fine sediment retention with bioengineering works in eroded marly catchments in a mountainous mediterranean climate (Southern ALPS, France). **Land Degradation & Development**, v. 20, n. 2, p. 210–216, 2009.

- ROBERT, A. **River processes: an introduction to fluvial dynamics**. London: Hodder Arnold, 2003. 232p.
- ROBINSON, B. H.; BISCHOFBERGER, S.; STOLL, A.; et al. Plant uptake of trace elements on a Swiss military shooting range: uptake pathways and land management implications. **Environmental pollution**, v. 153, n. 3, p. 668–76, 2008.
- ROCHA, W. W.; DIAS JUNIOR, M. S.; LIMA, J. M.; MIRANDA, E. E. V.; SILVA, A. R. DE INTEMPERISMO DE CINCO SOLOS NA REGIÃO DE LAVRAS (MG). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, p. 297–303, 2002.
- ROCHA, I. P.; HOLANDA, F. S. R.; ARAÚJO FILHO, R. N.; CASADO, A. P. B.; BANDEIRA, A. A. Meteorological and hydrological variables on occurrence of riverbank erosion along lower São Francisco river. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 2, p. 137–144, 2013.
- ROSGEN, D. L. A classification of natural rivers. **Catena**, v. 22, n. 3, p. 169–199, 1994.
- SARMIENTO, G.; MONASTERIO, M. A Critical Consideration of the Environmental Conditions Associated with the Occurrence of Savanna Ecosystems in Tropical America. In: F. B. Golley; E. Medina (Eds.); **Tropical Ecological Systems**, Ecological Studies. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, v. 11, p.223–250, 1975.
- SCHIECHTL, H. M. **Sicherungsarbeiten im Landschaftsbau: Grundlagen, Lebende Baustoffe, Methoden**. Muenchen: Callwey, 1973. 244p.
- SCHIECHTL, H. M.; STERN, R. **Ground Bioengineering Techniques: For Slope Protection and Erosion Control**. Cambridge: Wiley-Blackwell, 1996. 176p.
- SCHIECHTL, H. M.; STERN, R. **Water Bioengineering Techniques: for Watercourse Bank and Shoreline Protection**. Cambridge: Wiley-Blackwell, 1997. 208p.
- SILVA, A. J. N.; CABEDA, M. S. V. Influência de diferentes sistemas de uso e manejo na coesão, resistência ao cisalhamento e óxidos de Fe, Si e Al em solo de tabuleiro costeiro de Alagoas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 3, p. 447-457, 2005.
- SILVA, A. J. N.; CARVALHO, F. G. Coesão e resistência ao cisalhamento relacionadas a atributos físicos e químicos de um Latossolo Amarelo de tabuleiro costeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 5, p.853-862, 2007.
- SILVA, A. M.; SCHULZ, H. E.; CAMARGO, P. B. **Erosão e hidrossedimentologia em bacias hidrográficas**. São Carlos: RiMa Editora, 2004. 140p.
- SIMON, A.; POLLEN, N.; LANGENDOEN, E. Influence of two woody riparian species on critical conditions for streambank stability: upper Truckee river, California. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 42, n. 1, p. 99–113, 2006.
- SIMON, A.; CURINI, A.; DARBY, S. E.; LANGENDOEN, E. J. Bank and near-bank processes in an incised channel. **Geomorphology**, v. 35, n. 3-4, p. 193–217, 2000.

STOKES, A.; SOTIR, R.; CHEN, W.; GHESTEM, M. Soil bio- and eco-engineering in China: past experience and future priorities. **Ecological Engineering**, v. 36, n. 3, p. 247–257, 2010.

SUTILI, F. J. **Bioengenharia de solos no âmbito fluvial do sul do Brasil**, 2007. 94f. Tese (Doutorado em Engenharia Natural). Universität für Bodenkultur, Wien, 2007.

SUTILI, F. J.; DENARDI, L.; DURLO, M. A.; RAUCH, H. P.; WEISSTEINER, C. Flexural behaviour of selected riparian plants under static load. **Ecological Engineering**, v. 43, n. 1, p. 85–90, 2012.

THORNE, C. R. Field measurements of rates of bank erosion and bank material strength. In: Erosion and Sediment Transport Measurement Symposium, 1981, Florence. **Anais...** Florence: International Association of Hydrological Sciences, 1981. p. 503-512.

TOSI, M. Root tensile strength relationships and their slope stability implications of three shrub species in the Northern Apennines (Italy). **Geomorphology**, v. 87, n. 4, p. 268–283, 2007.

USDA–NRCS. Streambank Soil Bioengineering. **National Engineering Handbook: Part 654 - Stream Restoration Design**. Washington: USDA National Resources Conservation Service, p.1-76, 2007.

VAN KLAVEREN, R. W.; MCCOOL, D. K. Erodibility and critical shear of a previously frozen soil. **Transactions of the ASABE**, v. 41, n. 5, p. 1315-1321, 1998.

WESLEY, L. D. **Fundamentals of Soil Mechanics for Sedimentary and Residual Soils**. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2009. 464p.

WRIGHT, V. P.; MARRIOTT, S. B. The sequence stratigraphy of fluvial depositional systems: the role of floodplain sediment storage. **Sedimentary Geology**, v. 86, n. 3-4, p. 203–210, 1993.

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: R. P. C. Morgan; R. J. Rickson (Eds.); **Slope Stabilization and Erosion Control: A Bioengineering Approach**. London: E & FN Spon, p.221–264, 1995.

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

WYNN, T. M.; MOSTAGHIMI, S. Effects of riparian vegetation on streambank subaerial processes in Southwestern Virginia, USA. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 31, n. 4, p. 399-413, 2006.

YEN, C. P. Tree root patterns and erosion control. In: S. Jantawat (Ed.); International Workshop on Soil Erosion and its Countermeasures. **Anais...** . Bangkok: Soil and Water Conservation Society of Thailand, p.92–111, 1987

YOUNG, A. **Tropical Soils and Soil Survey**. Cambridge: Cambridge University Press, 1980. 480p.

ZEH, H. **Ingenieurbiologie – Handbuch Bautypen**. Zürich: VDF Hochschulverlag, 2007. 448p.

ZHAI, H.; CUI, B.; HU, B.; ZHANG, K. Prediction of river ecological integrity after cascade hydropower dam construction on the mainstream of rivers in Longitudinal Range-Gorge Region (LRGR), China. **Ecological Engineering**, v. 36, n. 4, p. 361–372, 2010. Elsevier B.V.

ZHANG, B.; ZHAO, Q. G.; HORN, R.; BAUMGARTL T. Shear strength of surface soil as affected by soil bulk density and soil water content. **Soil and tillage research**, v. 59, p. 97-106, 2001.

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, n. 1, p. 19–26, 2010.

CAPÍTULO 2

MAGNITUDE E VARIAÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DA EROSÃO MARGINAL EM UM TALUDE DO BAIXO SÃO FRANCISCO

CAPÍTULO 2. MAGNITUDE E VARIAÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DA EROÇÃO MARGINAL EM UM TALUDE DO BAIXO SÃO FRANCISCO

RESUMO

Processos erosivos ocorrem em rios como uma forma de ajuste hidrodinâmico. Após a regularização das suas águas para geração de energia, o rio São Francisco tem apresentado acelerado processo erosivo, sobretudo nas margens do seu baixo curso. Quantificar a magnitude deste processo, bem como sua variação no tempo e no espaço foi os objetivos deste trabalho. Utilizou-se o método dos pinos em um talude verticalizado, composto por Neossolo Flúvico, o qual foi monitorado mensalmente durante o ano de 2013, além da coleta de dados hidrológicos e meteorológicos. A perda de solo total foi de 35,26 m³, enquanto a magnitude da perda de solo variou mensalmente de 0,00 a 24.300 mm ano⁻¹, e totalizou 475.396,07 mm ano⁻¹. As características hidrodinâmicas e geométricas do curso d'água, como a vazão e proximidade do talvegue à margem são apontados como principais responsáveis por este processo erosivo.

Palavras-chave: Movimentos de massa; Vazão; Perda de solo.

ABSTRACT

Streams are under erosive process such as a hydrodynamic adjustment. After the construction of a sequence of hydroelectric dams for power generation, the São Francisco river had an increase on the erosion processes, mainly on the riverbank of its lower course. The aim of this work was to quantify the magnitude and the spatial and temporal variation of the erosive process. For that, it was used the erosion pins method in a vertical slope, composed of Fluvisoil, which was monitored monthly during the year 2013, alongside the acquisition of hydrological and meteorological data. The total soil loss was 35.26 m³, while the monthly magnitude of soil loss ranged from 0.00 to 24,300 mm.yr⁻¹, and totaled 475,396.07 mm.yr⁻¹. The hydrodynamic and geometric characteristics of the watercourse, such as discharge and the proximity of the riverbank from the thalweg are cited as the main responsible for this erosion process.

Keywords: Mass failure; River discharge; Soil loss.

INTRODUÇÃO

A dinâmica de um curso d'água depende de inúmeras variáveis, destacando-se a interação dos fatores físicos, meteorológicos, edáficos e cobertura vegetal, correlacionados com as ações antrópicas pregressas, como a construção de barragens nos seus canais, que implicam em mudanças nas suas condições naturais (ZHAI et al., 2010; DANG et al., 2010; EGGER et al., 2012; ROCHA et al., 2013).

As modificações na dinâmica fluvial acentuam os processos erosivos no leito e nas margens do canal fluvial (ROSGEN, 1994). Os movimentos de massa ocorridos nos taludes marginais do Baixo São Francisco tem grande importância como agentes atuantes na evolução do processo erosivo e pelas implicações socioeconômicas resultantes da perda de áreas produtivas.

O rio apresenta naturalmente uma dinâmica geomorfológica na busca de equilíbrio entre os processos de erosão e deposição. A supressão da vegetação ciliar associada à regularização da vazão, vem gradativamente promovendo a desestabilização dos taludes marginais desencadeando erosão, uma vez que apresentam um solo com muito baixa coesão. A ação constante das ondas provoca a retirada de material da base do talude (solapamento da base), tornando-o instável e sem sustentação (HOLANDA et al., 2007).

O uso prioritário das águas do São Francisco para a geração de energia a partir dos projetos hidrelétricos trouxe consequências que afetaram sua dinâmica fluvial e desencadearam diversos problemas socioambientais, causados principalmente pela regularização da vazão. As mais graves consequências ocorreram no baixo curso do rio, na região que divide os Estados de Sergipe e Alagoas, alterando sobretudo aos agroecossistemas produtivos instalados em suas margens (CASADO et al., 2002; HOLANDA et al., 2009).

Esta região, declarada pela agência ambiental *Conservation International* um dos 25 *hotspots* mundiais com alta prioridade para a conservação dada sua importância ecológica (MYERS et al., 2000), apresenta a supressão da vegetação ciliar como um dos principais problemas ambientais.

A exposição desses taludes desmatados, compostos por solo de muito baixa coesão, associado às condições meteorológicas locais e variáveis hidrológicas do curso d'água, tem resultado em grandes perdas de massa de solo devido aos processos erosivos das margens (HOLANDA et al., 2005, 2009).

Embora seja um fenômeno natural de ajuste dos canais fluviais, a erosão marginal é potencializada tanto por atividades antrópicas, como pelas próprias características hidrológicas do canal. Dentre as atividades antrópicas, destaca-se a operação de barragens que regulariza a vazão do rio (DANG et al., 2010; YAO et al., 2011; EGGER et al., 2012). No caso do Baixo São Francisco, em função da produção de energia, esta tem figurado entre as principais responsáveis por perdas de áreas agricultáveis e construções civis (HOLANDA et al., 2007, 2009).

A regularização da vazão do rio São Francisco faz com que a lâmina d'água permaneça na mesma cota por longos períodos, fazendo com que ondas incidam sempre sobre o mesmo local, onde a força exercida pela correnteza sobre as margens, potencializa os efeitos naquele nível do barranco e promove a remoção das partículas do solo (CASADO et al., 2002; ROCHA et al., 2013). De outro lado, as características hidrológicas que mais diretamente afetam o grau de estabilidade das margens, a taxa de avanço e a duração da erosão marginal são as dinâmicas do fluxo nas proximidades do talude, a geometria do canal, as ondas provocadas pelo vento e os fatores climáticos e biológicos (HENSHAW et al., 2012).

Os principais fatores que condicionam os processos de erosão, transporte e sedimentação nos rios são: a velocidade da corrente; as características físicas dos sedimentos, especificamente o seu tamanho, densidade e forma; a existência de acidentes ou obstáculos no leito e as variações da vazão do rio, que por sua vez, estão diretamente relacionadas com as variações climáticas (CHRISTOFOLETTI, 1981).

Este trabalho tem como objetivo quantificar a magnitude e a variação espaço-temporal das taxas de erosão da margem direita do Baixo São Francisco, e conhecer as principais causas e os controles desta variação.

MATERIAIS E MÉTODOS

Descrição da área de estudo

O sítio experimental é formado por solo classificado como Neossolo Flúvico, segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solo (EMBRAPA, 2013), está situado na margem direita do rio São Francisco, no município de Amparo de São Francisco, Sergipe. O clima da região é quente, do tipo semiúmido, com temperatura média anual de 25 °C, e apresenta estação chuvosa no inverno, entre os meses de março e setembro com precipitação de 800 a 1.300 mm (BRASIL; OEA, 2004).

O talude marginal possui aproximadamente 80 m de comprimento. Originalmente possuía 27° de inclinação, dimensões adquiridas em meados do ano de 2010 após intervenções para a instalação de experimentos com engenharia natural, ocasião em que todo o talude foi plantado com o capim vetiver. No entanto, no momento da instalação deste experimento, o mesmo se encontrava verticalizado e sem proteção em virtude do avanço do processo erosivo.

Coleta de dados de perda de solo

Para quantificação da perda de solo na face do talude foi adotado o método dos pinos de erosão (WOLMAN, 1959), que consiste na mensuração periódica da exposição de pinos metálicos inseridos na face de um talude.

Embora seja um método simples, tem sido amplamente utilizado por ser confiável e de baixo custo para medir esta variável em taludes verticalizados (HOOKE, 1979; LAWLER, 1993; HENSHAW et al., 2012; BAÇK et al., 2013).

Os pinos receberam uma camada de tinta zarcão para proteção contra corrosão, e duas camadas de tinta de cor semelhante a do solo do talude, para camuflá-los na margem e como protegê-los contra vandalismo. Na extremidade de cada pino foi fixada uma plaqueta de alumínio contendo a identificação do mesmo. Tais especificações seguem as recomendações de Fernandez (1990) para o estudo do processo erosivo em rios tropicais.

Ao total, foram instalados 99 pinos de aço com 1,0 m de comprimento e 0,006 m de diâmetro, distribuídos em 24 linhas horizontais, equidistantes 3,0 m, com espaçamento vertical de 0,5 m (HOOKE, 1979), formando uma malha regular 3,0 x 0,5 m (Figura 1).

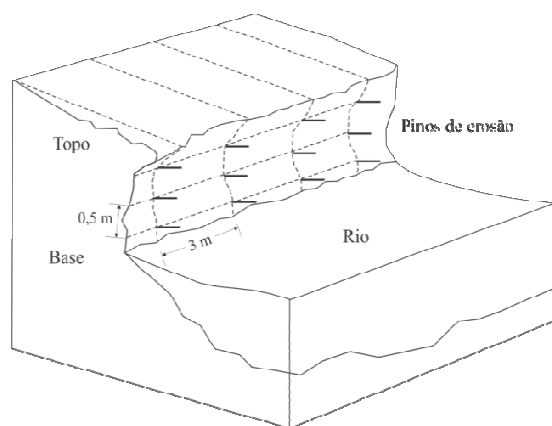


Figura 1. Esquema de instalação dos pinos no talude, adaptado de Fernandez (1996).

As medições mensais ocorreram entre janeiro de 2013 a janeiro de 2014, totalizando 13 coletas. Quando verificada a ausência de um pino, por perda de solo maior que seu comprimento ou por outra razão, o pino perdido foi substituído e o seu comprimento totalmente contabilizado como perda de solo (BAK et al., 2013).

A magnitude da erosão foi calculada após cada medição seguindo a Equação 1, proposta por Fernandez (1996):

$$ME = \frac{L_1 - L_0}{t} \quad (1)$$

Em que ME é a magnitude da erosão, expressa em mm ano^{-1} ; L_1 é o comprimento da parte exposta do pino no momento da leitura (mm); L_0 é o comprimento da parte exposta do pino rebatido após a leitura, convencionado em zero (mm); t é o tempo transcorrido (ano) entre cada medição.

O volume de solo perdido foi determinado multiplicando o comprimento do pino exposto por sua área representativa: $1,5 \text{ m}^2$ ($3,0 \times 0,5 \text{ m}$).

Coleta de dados hidrológicos

i. Cota, vazão, velocidade do fluxo e área da seção molhada

As séries históricas contendo os dados das variáveis vazão e cota foram obtidas junto à estação fluviométrica convencional de Propriá (49705000), coordenadas UTM 8.870.010,209 N e 738.236,275 E, Datum SAD69, Zona 24S, gerenciada pela Agência Nacional de Águas (ANA) e operada pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), para o ano de 2013, sendo os dados de cota amarrados à RN IBGE 2541U, localizada na ombreira direita da ponte que liga o município de Propriá, no Estado de Sergipe ao município de Porto Real do Colégio, no Estado de Alagoas, distante aproximadamente 15 km à jusante do sítio experimental.

Os dados de velocidade média do fluxo foram obtidos a partir da relação entre a vazão medida e a área da seção, conforme a Equação 2.

$$\bar{V} = Q/A \quad (2)$$

Onde \bar{V} é a velocidade média do fluxo (m.s^{-1}), Q é a vazão medida ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$) e A é a área da seção medida (m^2).

A área da seção molhada foi determinada após a realização de um levantamento batimétrico, conhecido o perfil transversal do leito principal do rio, entre a margem direita e uma ilha fluvial em frente ao sítio experimental. A partir de um perfil longitudinal

materializado na margem do rio com estacas, foram estabelecidas quatro seções equidistantes 18 m, conforme Santos et al. (2001) (Figura 2).

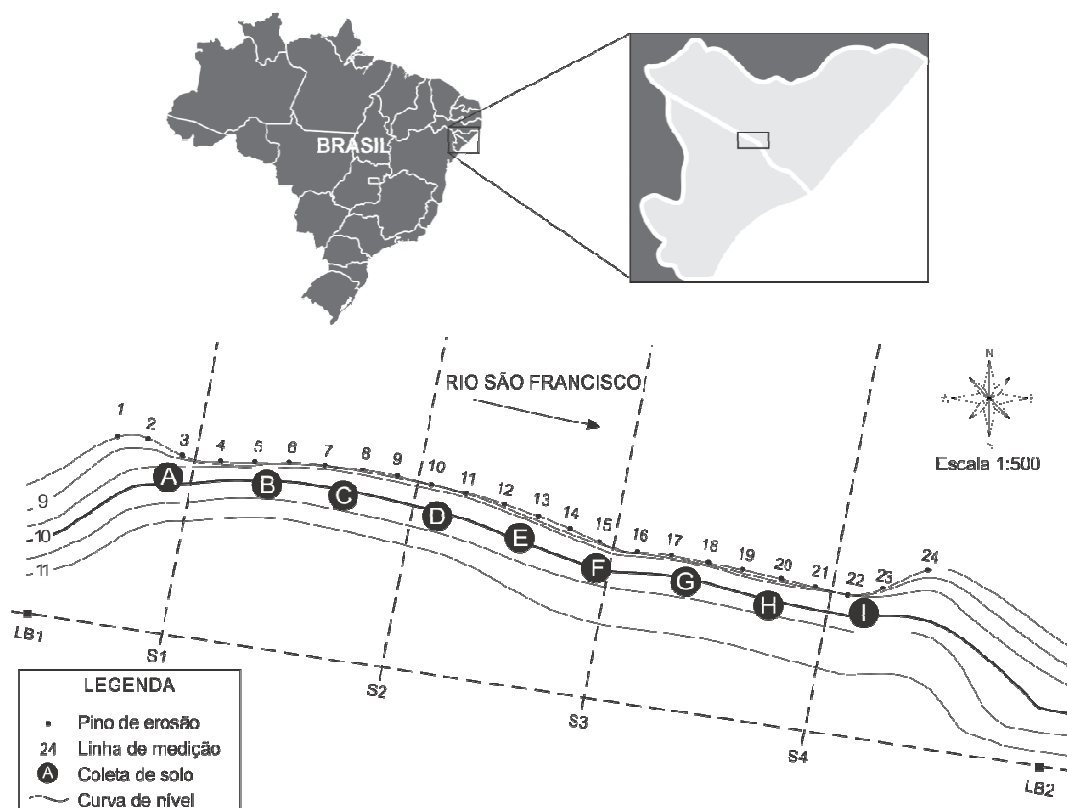


Figura 2. Croqui do levantamento batimétrico, posição das seções de medição e linhas de coleta de dados dos pinos e estacas.

ii. Precipitação

A série com os dados de precipitação foi obtida junto à estação pluviométrica convencional de Propriá (01036048), coordenadas UTM 8.869.978,450 N e 738.388,286 E, Datum SAD69, Zona 24S, gerenciada pela ANA e operada pela CPRM, no período compreendido entre os meses de janeiro a dezembro de 2013, da qual, a partir dos dados diários, foi possível elaborar o histograma da precipitação acumulada mensal e compará-lo à Normal Climatológica (1961-1991) desta estação (INMET, 2009).

Para verificar a influência da precipitação nos processos erosivos marginais do trecho experimental, os dados de precipitação foram confrontados com as taxas de recuo da margem.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O processo de erosão foi dominante sobre o processo de acreção no sítio experimental, pois apenas 1% das leituras evidenciou a ocorrência deste último durante o período de estudo.

Dos 99 pinos instalados no talude, 74 testemunharam erosão em algum momento. Somados, ao final do período avaliado, totalizaram o volume de 35,26 m³ de solo erodido (Tabela 1). Ainda que o volume total de solo erodido encontrado neste trabalho seja expressivo, é considerado pequeno se comparados àqueles encontrados por Holanda et al. (2007) ao investigar o processo erosivo poucos quilômetros a jusante do sítio experimental.

Tabela 1. Volume de solo erodido (m³) nas 24 linhas de medição do sítio experimental durante o ano de 2013.

Linha de pinos	Volume de solo (m ³)	Linha de pinos	Volume de solo (m ³)	Linha de pinos	Volume de solo (m ³)	Linha de pinos	Volume de solo (m ³)
S1		S2		S3		S4	
1	0,00	7	0,00	13	1,74	19	1,70
2	0,19	8	0,04	14	0,91	20	1,08
3	0,38	9	1,62	15	0,73	21	0,30
4	0,33	10	7,64	16	1,97	22	0,32
5	0,12	11	8,48	17	0,58	23	0,06
6	0,03	12	5,96	18	0,46	24	0,62
Total*	1,05 (3%)		23,74 (67%)		6,38 (18%)		4,09 (12%)

* Valores entre parênteses representam a porcentagem do total de solo perdido.

A seção transversal S2 (Figura 2) foi a que apresentou maior perda, contabilizando 23,74 m³ de solo erodido, 67% do total; enquanto as seções S3 e S4 de 6,38 e 4,09 m³ de solo, 18 e 12% do total, respectivamente, e a S1, menor volume de solo erodido, apenas 1,05 m³, 3% do total.

Todas as leituras apresentaram perda de solo. O processo erosivo se deu principalmente no terço inferior ou no terço médio do talude, ocorrendo na forma de corrasão da base ou devido à queda de blocos de solo. Este resultado indica que o principal agente erosivo deste trecho do rio está situado nas cotas mais próximas ao nível d'água. Além disso, o monitoramento mensal permitiu constatar que o processo erosivo apresentou variabilidade espacial e temporal (Figura 3).

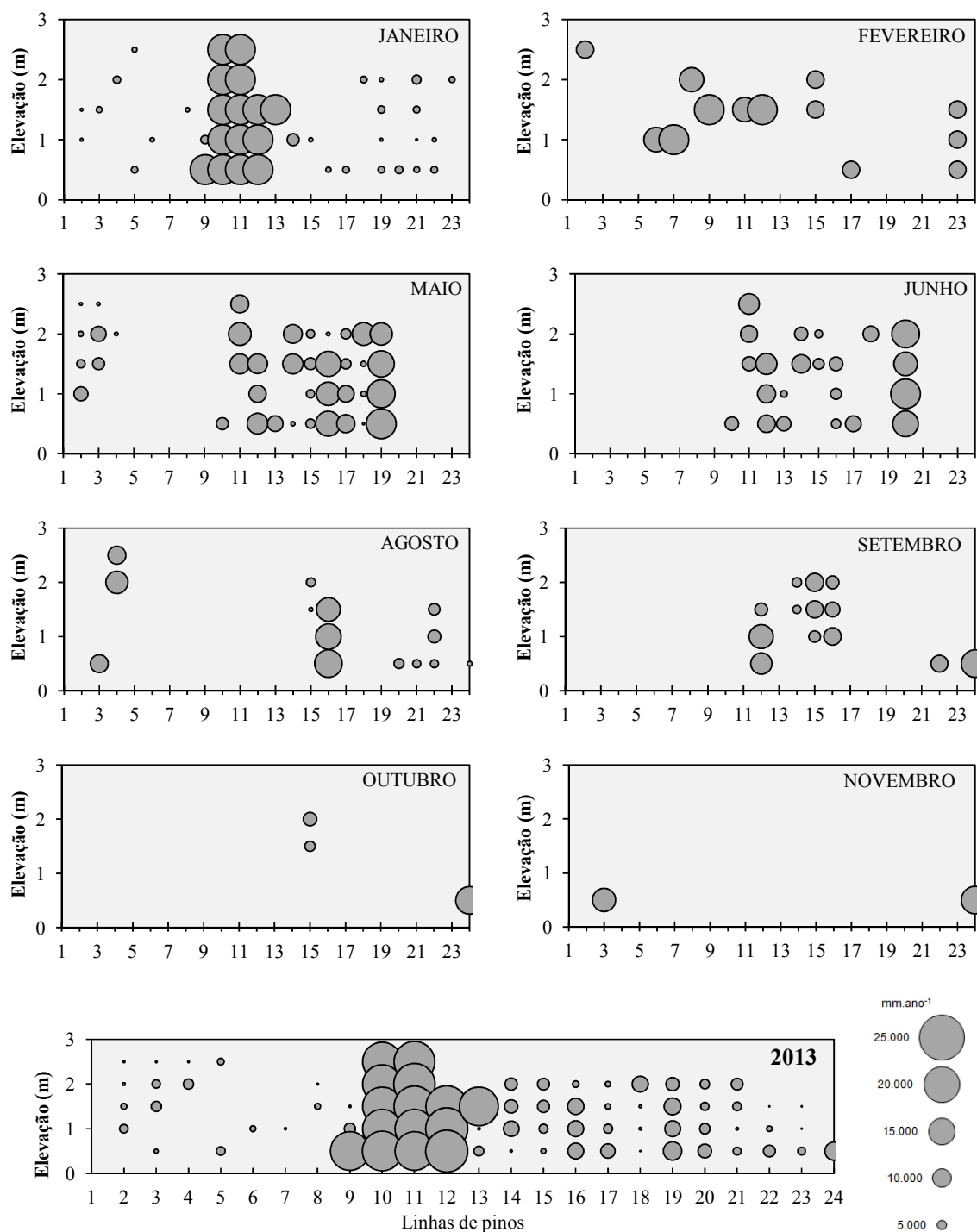


Figura 3. Magnitude do processo erosivo nas 24 linhas de medição ao longo do período de avaliação.

A magnitude da perda de solo variou mensalmente de 0,00 a 24.300 mm ano⁻¹, e totalizou 475.396,07 mm ano⁻¹, sendo os maiores valores observados nas seções S2 e S3 no mês de janeiro, enquanto os meses de março, abril, julho e dezembro não apresentaram

atividade de perda de solo. A explicação para a variabilidade espacial do processo erosivo, mesmo num pequeno trecho de margem como o estudado, é dada pelo alto grau de variabilidade nos parâmetros de resistência do solo devido à estratificação das margens em camadas coesivas e não coesivas nas seções monitoradas (Tabela 2). Comportamento semelhante foi observado nos trabalhos de Henshaw et al. (2012) e Grove et al. (2013) que atribuíram à granulometria do solo a variação espacial nos quantitativos de perda de solo.

Tabela 2. Granulometria do solo nas seções e nas profundidades 0 a 20, 20 a 40 e 40 a 60 cm.

Granulometria do solo		Seção									
		S1		S2		S3			S4		
Ponto de coleta		A	B	C	D	E	F	G	H	I	
Frações granulométricas (g kg ⁻¹)	0 a 20 cm										
	Areia	436	947	478	746	860	584	588	532	475	
	Argila	286	2	215	26	84	142	166	189	205	
	Silte	278	51	307	228	56	274	246	279	320	
	20 a 40 cm										
	Areia	368	883	926	904	582	558	458	529	476	
	Argila	325	24	18	49	154	180	231	225	236	
	Silte	307	93	56	47	264	262	311	246	288	
	40 a 60 cm										
	Areia	423	955	475	889	649	616	547	351	515	
	Argila	304	1	248	50	126	226	262	314	228	
	Silte	273	44	277	61	225	158	191	335	257	

Os maiores valores da fração areia ocorreram nas seções S2 e S3, justamente nas quais a perda de solo foi maior. Claramente este resultado pode ser explicado pela fraca agregação do solo atribuída à fração areia. Este material, geotecnicaamente fraco, quando agrupado em uma camada espessa, cria um ambiente altamente favorável para a erosão das margens do rio devido a natureza física de suas partículas incidir num elevado índice de vazios, que o torna mais vulnerável a ações de agentes externos ao solo (HOOKE, 1979). Lambe (1951) explica que quanto maior a compactação da fração areia (menor índice de vazios), maior será a agregação, conseqüentemente sua resistência ao cisalhamento.

Comportamento semelhante também foi constatado por Fox e Felice (2013), ao encontrar velocidade de ruptura em solos arenosos entre 3 e 10 vezes maior que em solos com elevados teores de silte e argila, quando submetidos à condições semelhantes de experimentação. De modo análogo, Arvind et al. (2012) afirmaram que os materiais que compõem as margens do rio Brahmaputra são altamente suscetíveis à erosão devido ao seu alto teor de umidade, baixo teor de silte e argila, assim como fração arenosa mal graduada.

As taxas de erosão do sítio experimental parecem não ter correlação com as precipitações que ocorreram na região, pois mais de 83% das perdas de solo ocorreu fora

do período chuvoso (Figura 4). Fox e Wilson (2010) e Rocha et al. (2013) concluíram que as chuvas que caem neste região são de baixa intensidade e, quando associadas a solos com boa capacidade de drenagem, dificultam a ocorrência de erosão laminar.

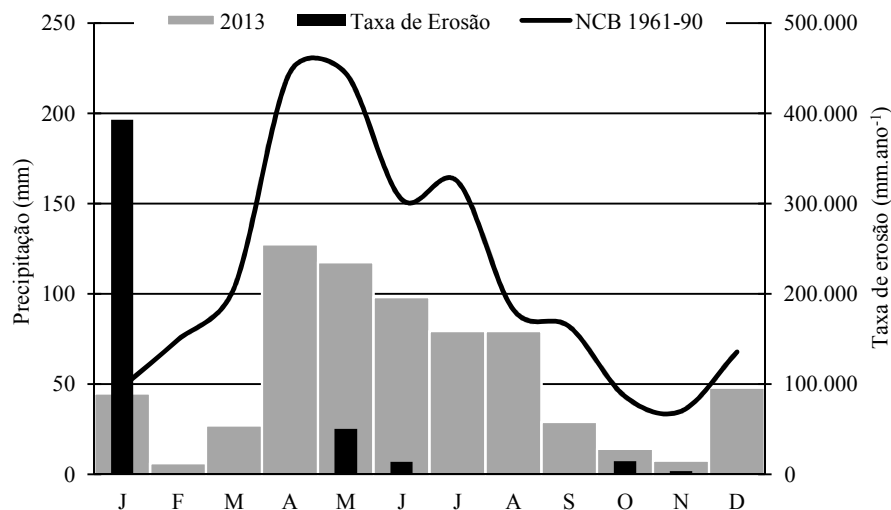


Figura 4. Histograma da precipitação mensal acumulada para o ano de 2013, precipitação esperada na estação pluviométrica convencional de Propriá (INMET, 2009) e taxa de erosão mensal acumulada para o ano de 2013 no sítio experimental.

Observou-se que 2013 foi um ano considerado seco na região do Baixo São Francisco, com volume total de precipitação igual a 677,7 mm, aproximadamente metade do volume esperado 1.302,0 mm. Contudo, a distribuição da precipitação seguiu o padrão hidrológico esperado, com os meses mais chuvosos entre abril e agosto, e os mais secos entre setembro e março.

A geometria do leito do rio se alterou ao longo do sítio experimental, demonstrando intensa atividade geomorfológica neste trecho do rio (CHRISTOFOLETTI, 1981), e também explica as diferentes distâncias entre a margem direita do rio e o talvegue (Figura 5).

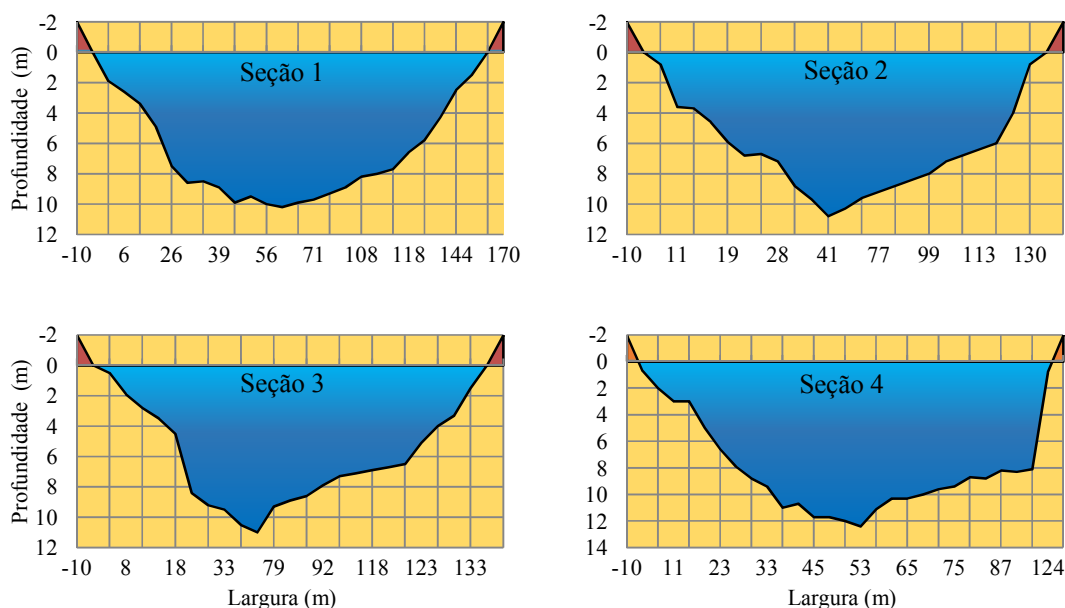


Figura 5. Perfis transversais do trecho experimental, nas quatro seções batimétricas.

A menor distância entre o talvegue e a margem na seção S2 contribuiu para a maior taxa de perda de solo nesta seção. Isto ocorreu porque a zona de maior profundidade do leito, onde se concentra o núcleo de maior velocidade e turbulência do fluxo, confere maior aporte de energia cinética transferida para o solo da margem. Em termos físicos, esta energia é a principal componente no processo de desestabilização dos taludes marginais.

Resultados semelhantes foram encontrados por Michalková et al. (2011) e Engel e Rhoads (2012). Os autores sugeriram que a erosão das margens era governada pelas magnitudes da velocidade e turbulência do fluxo próximo à margem, mas elencaram outros fatores influentes na migração lateral da margem, como: remoção da vegetação ciliar, operação de barragens, redução do aporte de sedimentos e inconstância na vazão.

A vazão oscilou durante o período analisado, apresentando picos de vazão nos meses de janeiro, abril e agosto de 2013 (Figura 6).

As descargas fluviais no trecho regularizado do rio São Francisco são governadas pela operação das barragens para geração de energia (ROCHA et al., 2013). Este fator antrópico, mesmo além do escopo deste trabalho, deve ser considerado relevante, pois atua diretamente sobre a vazão do rio, conseqüentemente sobre a velocidade do fluxo.

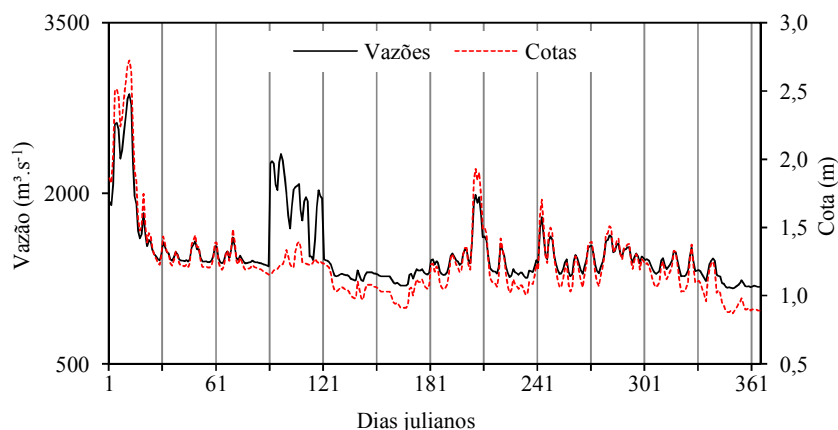


Figura 6. Valores de vazão e cota observados no trecho experimental.

O aumento da vazão refletiu o aumento da velocidade do fluxo, fator que explica o registro de maiores taxas erosivas no período de cheia, quando as vazões são maiores do que nos demais períodos, concordando com Leopold (1953).

Da mesma forma, a baixa oscilação da cota do rio nos meses fevereiro, março, abril, maio, junho, outubro, novembro e dezembro, quando seu valor variou entre 1,0 e 1,5 m, pode ter contribuído para a desestabilização do talude marginal e vir a gerar movimentos de massa num futuro próximo. Holanda et al. (2007) condicionaram o recuo da margem em determinados pontos do rio à permanência do fluxo d'água com velocidade constante, com mínima variação da cota, por um longo período.

Sob a ótica de que o mecanismo de falha do talude é determinado pelas propriedades de engenharia dos solos e que os processos de deposição e erosão das margens são controlados pelos processos fluviais (DANG et al., 2010; EGGER et al., 2012; ROCHA et al., 2013), confirma-se, a relevância das características hidrodinâmicas e geométricas do canal para a magnitude do processo erosivo.

Os parâmetros geométricos área molhada, perímetro molhado e raio hidráulico apresentaram pequenas variações entre as seções, sendo a S2 a que apresentou menores valores para área e perímetro molhado. A distância da margem direita ao talvegue teve grande variação entre as seções, sendo menor em S2 (Tabela 3).

Associando as taxas de perda de solo da seção S2 aos parâmetros geométricos e hidrológicos, Tabela 3, especialmente a velocidade máxima do fluxo, observa-se que esta seção apresentou a maior velocidade do fluxo, evidentemente influenciada pela menor área da seção molhada.

Tabela 3. Parâmetros geométricos e hidrológicos da área de estudo.

Seção	Área molhada (m)	Perímetro molhado (m)	Distância da margem direita ao talvegue (m)	Velocidade máxima do fluxo (m.s ⁻¹)	Velocidade mínima do fluxo (m.s ⁻¹)
S ₁	107,91	158,03	60,0	26,6	11,0
S ₂	97,22	134,04	42,0	29,6	12,2
S ₃	98,96	137,80	63,0	29,0	12,0
S ₄	99,41	130,09	53,0	28,9	11,9

É possível deduzir que a elevada velocidade do fluxo, encontrada no mês de janeiro de 2013, quando ocorreu a maior vazão, aumentou a turbulência do fluxo na proximidade da margem direita, especialmente na seção S2.

Com isso, a velocidade do fluxo pode ser considerada um fator primordial para a evolução das taxas de erosão nos meses que apresentaram picos de vazão, pois, de maneira geral, seu aumento se deu de forma proporcional ao volume de solo erodido, principalmente quando o talude se apresentava constituído por material arenoso, semelhante aos encontrados por Luppi et al. (2009).

Os resultados encontrados por Biron et al. (2004) sugerem que os valores da taxa de erosão marginal são maiores em regiões onde as velocidades são mais fortes, o que neste trabalho ocorreu mais próximo da margem direita do que da ilha fluvial. Assim, supõe-se que as velocidades observadas na seção S2 também estejam relacionadas a um aumento da capacidade de erosão do leito do rio.

Com isso, a hipótese mais plausível que explica a magnitude e variação do processo erosivo neste sítio experimental é a que relaciona a velocidade do fluxo às fracas propriedades de engenharia do material que compõe sua margem.

CONCLUSÕES

A magnitude da perda de solo foi considerada pequena quando comparada com trabalhos na mesma região de estudo.

O processo erosivo variou espacial e temporalmente e se desenvolveu nos terços inferior e médio do talude, na forma de corrasão da base e queda de blocos de solo.

As características hidrodinâmicas e geométricas do canal foram relevantes no processo erosivo, sendo a proximidade do talvegue a principal responsável pela perda de solo na seção S2.

As maiores taxas de erosão estão relacionadas aos meses que apresentaram maiores valores de vazão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARVIND, P.; RAJIB, G.; DEVA, B.; ANANTA, N.; CHANDAN, M. River Bank Erosion and Restoration in the Brahmaputra River in India. **The Clarion**, v. 1, n. 1, p. 2277–1697, 2012.

BAK, Ł.; MICHALIK, A.; TEKIELAK, T. The relationship between bank erosion, local aggradation and sediment transport in a small Carpathian stream. **Geomorphology**, v. 191, p. 51–63, 2013.

BIRON, P. M.; ROBSON, C.; LAPOINTE, M. F.; GASKIN, S. J. Comparing different methods of bed shear stress estimates in simple and complex flow fields. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 29, n. 11, p. 1403–1415, 2004.

CASADO, A. P. B.; HOLANDA, F. S. R.; ARAUJO FILHO, F. A. G.; YAGUIU, P. Bank erosion evolution in São Francisco River. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, n. 1, p. 231–239, 2002.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia fluvial**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1981. 312p.

BRASIL; OEA - ORGANIZAÇÃO DOS ESTADOS AMERICANOS. **Projeto de Gerenciamento Integrado das Atividades Desenvolvidas em Terra na Bacia do São Francisco**: Programa de Ações Estratégicas para o Gerenciamento Integrado da Bacia do Rio São Francisco e da sua Zona Costeira – PAE. Relatório Final. Brasília: TODA Desenho e Arte, 2004. 333p.

DANG, T. H.; COYNEL, A.; ORANGE, D.; et al. Long-term monitoring (1960-2008) of the river-sediment transport in the Red River Watershed (Vietnam): temporal variability and dam-reservoir impact. **The Science of the total environment**, v. 408, n. 20, p. 4654–64, 2010.

EGGER, G.; POLITTI, E.; WOO, H.; et al. Dynamic vegetation model as a tool for ecological impact assessments of dam operation. **Journal of Hydro-environment Research**, v. 6, n. 2, p. 151–161, 2012.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 2013. 353p.

ENGEL, F. L.; RHOADS, B. L. Interaction among mean flow, turbulence, bed morphology, bank failures and channel planform in an evolving compound meander loop. **Geomorphology**, v. 163-164, p. 70–83, 2012.

FERNANDEZ, O. V. Q. **Mudanças no canal fluvial do rio Paraná e processos de erosão nas margens região de Porto Rico, PR**. 1990. 86f. Dissertação (Mestrado em Geociências Análise Ambiental). Instituto de Geociências e Ciências Naturais, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 1990.

FERNANDEZ, O. V. Q. O método dos pinos na quantificação da erosão marginal em rios e reservatórios. Anais do Simpósio Nacional de Geomorfologia. **Anais...** p.160-163, 1996. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia.

FOX, G. A.; FELICE, R. G. Bank undercutting and tension failure by groundwater seepage: predicting failure mechanisms. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 39, n. 6, p. 758-765, 2014.

FOX, G. A.; WILSON, G. V. The Role of Subsurface Flow in Hillslope and Stream Bank Erosion: A Review. **Soil Science Society of America Journal**, v. 74, n. 3, p. 717, 2010.

GROVE, J. R.; CROKE, J.; THOMPSON, C. Quantifying different riverbank erosion processes during an extreme flood event. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 38, p. 1393–1406, 2013.

HENSHAW, A. J.; THORNE, C. R.; CLIFFORD, N. J. Identifying causes and controls of river bank erosion in a British upland catchment. **Catena**, v. 100, p. 107–119, 2012.

HOLANDA, F. S. R.; SANTOS, L. G. C.; SANTOS, C. M. CASADO, A. P. B.; PEDROTTI, A.; RIBEIRO, G. T. Riparian vegetation affected by bank erosion in the lower São Francisco river, Northeastern Brazil. **Revista Árvore**, v. 29, n. 2, p. 327–336, 2005.

HOLANDA, F. S. R.; SANTOS, C. M.; CASADO, A. P. B.; BANDEIRA, A. A.; OLIVEIRA, V. A.; FONTES, L. C. S.; ROCHA, I. P.; ARAÚJO FILHO, R. N.; GÓIS, S. S.; VIEIRA, T. R. S. Análise multitemporal e caracterização dos processos erosivos no Baixo São Francisco Sergipano. **Revista brasileira de geomorfologia**, v. 8, n. 2, p. 85-94, 2007.

HOLANDA, F. S. R.; ISMERIM, S. S.; ROCHA, I. P. Environmental Perception of the São Francisco Riverine Population in Regards to Flood Impact. **Human Ecology**, v. 28, n. 1, p. 37–46, 2009.

HOOKE, J. M. An analysis of the processes of river bank erosion. **Journal of Hydrology**, v. 42, n. 1-2, p. 39–62, 1979.

INMET - INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Normais Climatológicas do Brasil 1961-1990**. Brasília: INMET, 2009.

LAMBE, T. W. **Soil testing for engineers**. New York: John Wiley, 1951. 165p.

LAWLER, D. M. The measurement of river bank erosion and lateral channel change: A review. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 18, n. 9, p. 777–821, 1993.

LEOPOLD, L. B. Downstream change of velocity in rivers. **American Journal of Science**, v. 251, n. 8, p. 606–624, 1953.

LUPPI, L.; RINALDI, M.; TERUGGI, L. B.; DARBY, S. E.; NARDI, L. Monitoring and numerical modelling of riverbank erosion processes: a case study along the Cecina River (central Italy). **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 34, n. 4, p. 530–546, 2009.

MICHALKOVÁ, M.; PIÉGAY, H.; KONDOLF, G. M.; GRECO, S. E. Lateral erosion of the Sacramento River, California (1942-1999), and responses of channel and floodplain lake to human influences. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 36, n. 2, p. 257–272, 2011.

MYERS, N.; MITTERMEIER, R. A.; MITTERMEIER, C. G.; FONSECA, G. A. B.; KENT, J. Biodiversity hotspots for conservation priorities. **Nature**, v. 403, p. 853–858, 2000.

ROCHA, I. P.; HOLANDA, F. S. R.; ARAÚJO FILHO, R. N.; CASADO, A. P. B.; BANDEIRA, A. A. Meteorological and hydrological variables on occurrence of riverbank erosion along lower São Francisco river. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 2, p. 137–144, 2013.

ROSGEN, D. L. A classification of natural rivers. **Catena**, v. 22, n. 3, p. 169–199, 1994.

SANTOS, I.; FILL, H. D.; GUGAI, M. R. V. B. **Hidrometria aplicada**. Curitiba: Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, 2001. 372p.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. 7 ed. Porto Alegre: UFRGS, 2007.

WOLMAN, M. G. Factors influencing erosion of a cohesive river bank. **American Journal Science**, v. 257, p. 204–216, 1959.

YAO, Z.; TA, W.; JIA, X.; XIAO, J. Bank erosion and accretion along the Ningxia–Inner Mongolia reaches of the Yellow River from 1958 to 2008. **Geomorphology**, v. 127, n. 1-2, p. 99–106, 2011.

ZHAI, H.; CUI, B.; HU, B.; ZHANG, K. Prediction of river ecological integrity after cascade hydropower dam construction on the mainstream of rivers in Longitudinal Range-Gorge Region (LRGR), China. **Ecological Engineering**, v. 36, n. 4, p. 361–372, 2010.

CAPÍTULO 3

RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE UM SOLO ALUVIAL COM E SEM A PRESENÇA DE RAÍZES

CAPÍTULO 3. RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE UM SOLO ALUVIAL COM E SEM A PRESENÇA DE RAÍZES

RESUMO

Espécies vegetais têm sido estudadas como elemento de reforço contra rompimentos em taludes, tanto pela proteção contra o impacto da chuva oferecida pela parte aérea, como pela ancoragem do solo pelo sistema radicular. Os principais atributos mecânicos que atestam este reforço no solo são a sua coesão e o seu ângulo de atrito interno, traduzidos na resistência ao cisalhamento. Este trabalho teve como objetivo investigar a influência da raiz de três espécies arbustivas nos atributos coesão e ângulo de atrito interno do solo de um talude na margem direita do rio São Francisco. Foram realizados ensaios de cisalhamento direto simples em corpos de prova com e sem raízes das espécies *Solanum paniculatum*, *Sesbania virgata* e *Mimosa pigra*, nas profundidades 0,0 a 0,25, 0,25 a 0,50, 0,50 a 0,75 e 0,75 a 1,0 m. As espécies se comportaram distintamente em relação ao efeito das raízes sobre os atributos estudados. *M. pigra* apresentou os maiores valores de coesão nas profundidades 0,25 a 0,50 m e 0,50 a 0,75 m.

Palavras-chave: Coesão de raízes; Ângulo de atrito interno; Erosão marginal.

ABSTRACT

Plant species have been studied as a reinforcement element against landslides at slopes, either to protect against the splash effect offered by shoots, or anchoring the soil by the root system. The main soil mechanical attributes that attest its reinforcement are the soil cohesion and internal friction angle, translated in shear strength. This work aimed to investigate the influence of roots from shrub species over the soil mechanical attributes cohesion and angle of internal friction of a riverbank slope at the São Francisco river. Simple direct shear tests were performed on specimens with and without roots of *Solanum paniculatum*, *Sesbania virgata* and *Mimosa pigra* at 0.0 to 0.25, 0.25 to 0.50, 0.50 to 0.75 and 0.75 to 1.0 m depth. The species showed different behavior in relation to the effect of roots on the soil mechanical attributes studied. *M. pigra* showed the highest values of cohesion find at 0.25 to 0.50 and 0.50 to 0.75 m depth.

Keywords: Root cohesion; Internal friction angle, Riverbank erosion.

INTRODUÇÃO

A estabilização de taludes marginais por meio do controle do processo erosivo demanda técnicas com possibilidade de ampla adaptação nas bacias hidrográficas, visando à promoção de melhorias estéticas, ecológicas e garantia da produção agrícola em áreas não degradadas e associadas a essas margens (HOLANDA; ROCHA, 2011).

Em trechos sedimentares, como no caso do Baixo São Francisco, é mais comum a ocorrência de taludes estratificados ou intercalados, devido ao processo natural de sedimentação. De acordo com Wesley (2009), este processo pode ocorrer ao longo de milhares de anos, estando as camadas mais antigas submetidas a compressão, devido a contínua deposição de camadas adicionais. Quando as camadas não coesivas são intercaladas com solos coesivos, o potencial de erosão é determinado pelas características do solo não coesivo (SAMADI et al., 2011).

Como alternativa viável para contenção de processos erosivos em encostas e margens de cursos d'água, espécies vegetais vêm sendo amplamente estudadas nos últimos anos, devido aos benefícios que suas características tanto da parte aérea, como do sistema radicular proporcionam ao solo, principalmente no que diz respeito a sua estabilidade (MAFIAN et al., 2009; ALI, 2010; ABDULLAH et al., 2011; FATTET et al., 2011; MA'RUF, 2012; SUTILI et al., 2012; FAN; LAI, 2014).

De forma geral, para a atividade específica de recomposição vegetal de taludes visando sua estabilização geotécnica, as espécies vegetais devem apresentar algumas características importantes para o seu desenvolvimento no local. Entre essas características estão o rápido crescimento, a tolerância à seca, sistema radicular profundo, crescimento vigoroso, ampla disponibilidade de sementes, facilidade na propagação, sobrevivência em condições de baixa fertilidade e eficácia na cobertura do solo (STOKES et al., 2009; PETRONE; PRETI, 2013).

O sistema radicular da vegetação possui efeitos mecânicos, em sua maioria benéficos, sobre a estabilidade de taludes (SIMON et al., 2006; POLLEN-BANKHEAD; SIMON, 2010). Quando o solo sofre solicitações de cisalhamento, as raízes mobilizam sua resistência à tração, funcionando como tirantes de contenção.

As tensões cisalhantes que se desenvolvem na matriz do solo são transferidas para as raízes (FAN; SU, 2008; FAN; CHEN, 2010), paralelamente, através da sua resistência mecânica à tração (BAETS et al., 2008; ABDI et al., 2010) ocorre o reforço do solo.

A resistência do solo ao cisalhamento (τ), expressa pela equação de Coulomb, é composta pelos parâmetros coesão e o ângulo de atrito entre as partículas do solo (LAMBE, 1951), que são intrínsecos ao solo e governados por suas propriedades e atributos, tais como textura, estrutura, teor de matéria orgânica, peso específico, mineralogia e teor de umidade.

Diversos autores concordam que o sistema radicular das plantas pode influenciar significativamente nos parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo (ABDULLAH et al., 2011; FAN; LAI, 2014; GHESTEM et al., 2014). Abernethy e Rutherford (2001) explicam que as raízes das plantas tendem a se unir ao solo formando uma massa monolítica que contribui para o aumento da resistência, pois fornece uma coesão aparente. Assim, se o solo contiver raízes, o aumento da resistência ao cisalhamento pode ser expresso como uma coesão adicional.

Segundo Mao et al. (2012), no que diz respeito à coesão emprestada pelas raízes ao solo, a densidade de raízes e características arquitetônicas são, provavelmente, mais importante do que as características mecânicas da raiz, muito embora, segundo os autores, corroborados por Genet et al. (2005), a rigidez e a resistência à tração da raiz sejam as principais características que influenciam a resistência ao cisalhamento do solo.

A investigação de quanto a resistência do solo aumenta com a introdução de raízes pode ser realizada diretamente *in situ* (GREENWOOD et al., 2006; FAN; SU, 2008; MAFIAN et al., 2009) ou através de ensaios laboratoriais como o cisalhamento direto (OPERSTEIN; FRYDMAN, 2000; COPPIN; RICHARDS, 2007; BAETS et al., 2008).

O objetivo deste trabalho foi investigar a influência da raiz de três espécies arbustivas nativas do baixo curso do rio São Francisco nos atributos coesão e ângulo de atrito interno do solo de um talude na margem direita do rio.

MATERIAIS E MÉTODOS

Os trabalhos foram realizados no sítio experimental situado à margem direita do rio São Francisco, no município de Amparo de São Francisco, Estado de Sergipe, formado por solo aluvial sedimentar, classificado por EMBRAPA (2013) como Neossolo Flúvico (Figura 7).

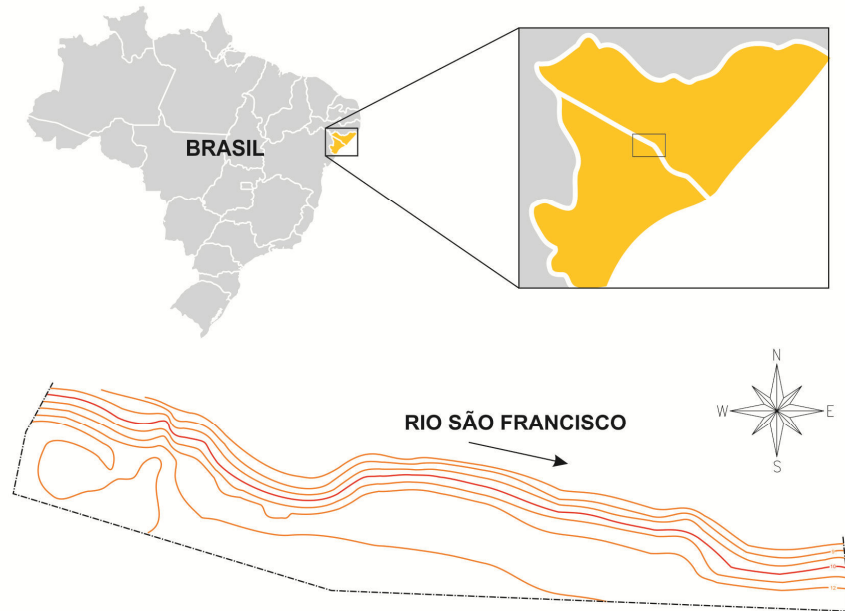


Figura 7. Localização da área de estudo.

O clima da região é quente, do tipo semiúmido, com temperatura média anual de 25 °C, e apresenta estação chuvosa no inverno, entre os meses de março e setembro com precipitação de 800 a 1.300 mm.

Histórico da área de estudo

Originalmente a área de estudo era dominada por vegetação ciliar nativa do bioma Mata Atlântica. Entretanto, nas últimas décadas esta vegetação foi gradativamente substituída pelo uso agrícola da terra, especialmente como pastagem plantada.

Em junho de 2010, foram instalados experimentos de engenharia natural na área. Para tanto, ocorreu intensa mobilização de terra em função das operações de corte e aterro mecanizado, tanto na planície como no talude fluvial, que passaram a apresentar as dimensões aproximadas de 200×30 m (comprimento \times largura) e 27° de inclinação, respectivamente. Nesta ocasião, a vegetação foi totalmente suprimida e parte do talude marginal plantado com o capim vetiver.

Em 2012, antes do início deste trabalho, foi possível verificar em toda a área a ocorrência de diversas espécies vegetais em função da dispersão de propágulos de áreas próximas.

Seleção das espécies vegetais

As espécies foram previamente selecionadas a partir da biogeografia local (FRANCO, 1983). Em seguida, foi realizado um censo vegetal exclusivo para as espécies de porte arbustivo, o qual contou com as etapas de coleta de material botânico, herborização e identificação dos espécimes no Herbário da Universidade Federal de Sergipe (ASE).

O censo apresentou uma lista com 10 espécies potenciais, no entanto, em razão da disponibilidade de indivíduos que apresentassem bom estado geral das plantas (PETRONE; PRETI, 2013) e da demanda de tempo para a escavação das trincheiras (BÖHM, 1979) para coleta dos blocos de solo, foram selecionadas somente as três espécies com maior frequência relativa (*Solanum paniculatum*, *Sesbania virgata* e *Mimosa pigra*).

Solanum paniculatum L. é uma espécie nativa do Brasil, conhecida vulgarmente por Jurubeba, é uma angiosperma da família botânica Solanaceae, perene, arbustiva, ereta, ramificada, de caule pubescente e armado de acúleos curvos, apresenta flores com pétalas brancas e anteras amarelas, com 1-2 metros de altura. Originalmente proveniente das regiões Norte e Nordeste, hoje ocorre em todo o território brasileiro como infestante de pastagens, lavouras perenes, pomares, à beira de estradas, carreadores e terrenos baldios. Ocorre normalmente em solos mais arenosos e secos, sendo difícil a sua erradicação (LORENZI, 2008).

Sesbania virgata (Cav.) Pers é uma espécie tropical, nativa do Brasil, pertencente à família botânica Fabaceae, que possui sinonímia botânica *Sesbania marginata* Benth. Vulgarmente conhecida como sesbânia, é uma planta perene, arbustiva de rápido crescimento. Possui entre 2 e 4 m de altura e ocorre naturalmente na margem de rios, planícies de inundações e em solos modificados (SIMÕES et al., 2008). Esta espécie produz grande quantidade de sementes com viabilidade a longo prazo que são dispersas em frutos indeiscentes na forma de vagens, e, tem sido utilizada para a revegetação de matas ciliares, controle de erosão do solo e recuperação de áreas degradadas (POTT; POTT, 1994).

Mimosa pigra L. é uma espécie tropical, nativa do Brasil, pertencente à família botânica Fabaceae, arbustiva, ereta, pode chegar até 6 m de altura. O caule apresenta espinhos de base com até 7 milímetros de comprimento, as folhas são bipinadas com até 16 pares de pinas como 5 cm de comprimento, as flores são lilás ou rosa. As sementes podem germinar durante todo o ano, ocorre geralmente em solo úmido, mas não inundado. Possui

rápido crescimento e a floração ocorre entre 4 e 12 meses após a germinação (LONSDALE et al., 1995).

De cada espécie foi escolhido o indivíduo que apresentou melhor estado geral da planta para ter parte do seu sistema radicular escavado e contido nas amostras de solo com segmentos de raízes, posteriormente submetidos ao ensaio de cisalhamento direto.

Coleta das amostras de solo

Sob a copa de cada indivíduo arbustivo foi escavada uma trincheira, da qual foram extraídos quatro blocos indeformados de solo com as dimensões $25 \times 25 \times 25$ cm, nas profundidades 0 a 0,25; 0,25 a 0,50; 0,50 a 0,75 e 0,75 a 1,00 m (Figura 8), perfazendo um total de 12 blocos, sendo 4 para cada espécie. Os blocos foram parafinados e acondicionados em caixas de madeira visando sua proteção e transporte.



Figura 8. Coleta das amostras indeformadas de solo no sítio experimental. A Escavação da trincheira, B aplicação de parafina no bloco de solo, C remoção da 1ª caixa com solo e D aspecto da trincheira antes da coleta das últimas caixas.

Caracterização do solo

Para cada bloco indeformado, os procedimentos de preparação e determinação dos teores de umidade das amostras foram conduzidos conforme a norma NBR 6457 (ABNT, 1986), as análises granulométricas foram realizadas de acordo com a norma NBR 7181 (ABNT, 1984a) e os ensaios para determinação dos limites de liquidez e plasticidade em concordância com as normas NBR 6459 (ABNT, 1984b) e NBR 7180 (ABNT, 1984c), respectivamente. Para a determinação da massa específica real das partículas foi utilizado o método prescrito na NBR 6508 (ABNT, 1984d).

Ensaio de cisalhamento direto

Os atributos físicos e mecânicos do solo: peso específico inicial e final, índice de vazios inicial e final, grau de saturação inicial e final, pico de resistência ao cisalhamento, coesão e ângulo de atrito interno, foram conhecidos a partir dos ensaios de cisalhamento direto simples consolidado e não drenado (CU).

Os ensaios foram conduzidos no Laboratório de Geotecnia e Pavimentação (GEOPAV) do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Sergipe em conformidade com a norma D6528 (ASTM, 2007), com o auxílio de uma prensa de cisalhamento direto convencional Marca Wille Geotechnik, modelo LO 2900. A velocidade horizontal de deslocamento utilizada nos ensaios seguiu a recomendação da norma, a qual exige que o tempo decorrido para o cisalhamento seja superior ao dobro do tempo para se obter 90% de consolidação do corpo de prova, determinado para cada ensaio, observou-se que a velocidade teria sido superior a $0,05 \text{ mm min}^{-1}$, desta forma, optou-se por padronizar os ensaios com esta velocidade de corte para otimização do tempo do ensaio.

Em cada bloco indeformado de solo, com o auxílio de anéis metálicos ($\text{Ø}=60 \text{ mm} \times \text{H}=20 \text{ mm}$) foram esculpidos 4 corpos de prova contendo somente o solo local e 4 corpos de prova contendo raízes das espécies selecionadas (Figura 9), submetidos às tensões normais (σ) de 5, 11, 21 e 42 kPa, respectivamente, determinadas em função do peso específico do solo e profundidade da amostra (STOKES; MATTHECK, 1996), que simulam os níveis médios de tensões geostáticas verticais efetivas para o talude estudado.

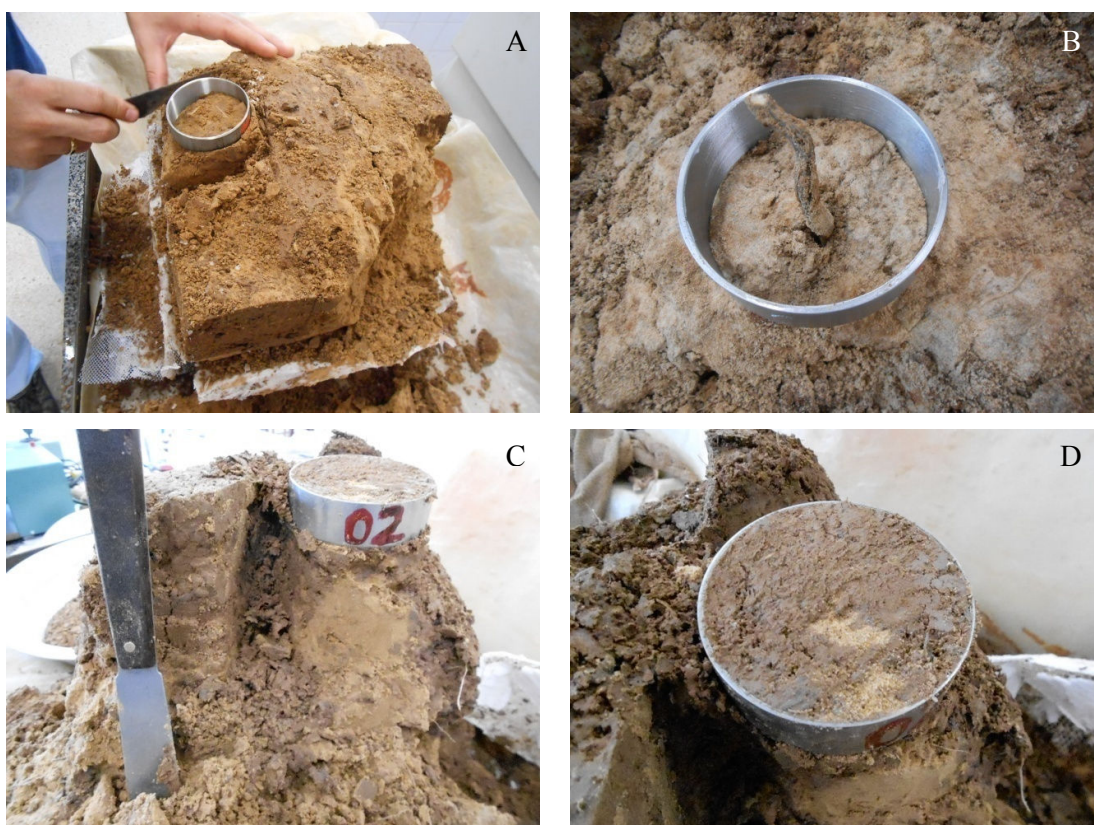


Figura 9. Corpo de prova sendo esculpido do bloco de solo indeformado, A e B com segmentos de raiz, C e D sem raízes.

Na fase de consolidação de cada ensaio, as leituras foram realizadas nos tempos de 0,6, 0,25, 0,5, 1, 2, 4, 8, 15, 30, 60, 90 e 120 minutos, com a amostra sendo saturada (sob inundação) aos 30 segundos. Já na fase de cisalhamento, as leituras foram realizadas a cada 0,5 minuto até o 5º minuto, a cada minuto até o 10º minuto, a cada 10 minutos até o 30º minuto e, deste tempo em diante, a cada 30 minutos, caracterizado o ensaio como Ensaio de Cisalhamento Direto Lento com pré-adensamento, medindo-se inclusive, as deformações alcançadas pelo solo.

Ao final do ensaio, para as diversas tensões normais aplicadas obteve-se a envoltória de resistência, que foi determinada utilizando-se a equação de Coulomb $\tau = c + \sigma \tan \theta$, permitindo encontrar os valores dos parâmetros coesão e ângulo de atrito interno do solo para os corpos de prova com e sem raízes.

Delineamento experimental

Para avaliação dos atributos físicos e mecânicos do solo: peso específico, coesão e ângulo de atrito interno, foi montado um experimento em delineamento de blocos

casualizados (DBC), com dois tratamentos (Com raízes e Sem raízes), 4 blocos (profundidades 0 a 0,25; 0,25 a 0,50; 0,50 a 0,75 e 0,75 a 1,00 m) e 4 repetições por bloco. Os resultados foram submetidos à análise de variância e as médias comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Ainda, foi realizada a análise de correlação entre as retas resultantes dos ensaios de cisalhamento direto nos corpos de prova com e sem raízes, utilizando o procedimento descrito em Snedecor e Cochran (1989).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O comportamento típico de solos aluviais estratificados é apresentar sobreposição de camadas com elevada variação granulométrica (USUGA et al., 2010), no entanto, este comportamento não foi observado nos perfis estudados. Embora tenha havido pequenas variações entre os constituintes do solo, todos os blocos apresentaram predominância da fração silte e foram classificados pelo Sistema Unificado de Classificação do Solo como CL, ou seja, Argila inorgânica com baixa compressibilidade (Tabela 4).

Tabela 4. Caracterização do solo dos corpos de prova próximos das espécies *Solanum paniculatum*, *Sesbania virgata* e *Mimosa pigra*.

Espécie	Prof. (m)	Granulometria (g kg ⁻¹)			LL	IP
		Pedregulho	Areia	Silte		
<i>Solanum paniculatum</i>	0 a 0,25	10	120	540	330	36
	0,25 a 0,5	0,0	120	510	370	46
	0,5 a 0,75	0,0	10	510	480	49
	0,75 a 1,0	0,0	120	580	300	38
<i>Sesbania virgata</i>	0 a 0,25	0,0	140	510	350	37
	0,25 a 0,5	0,0	130	390	480	38
	0,5 a 0,75	0,0	30	680	290	47
	0,75 a 1,0	0,0	100	640	260	39
<i>Mimosa pigra</i>	0 a 0,25	0,0	120	610	270	41
	0,25 a 0,5	10	140	520	330	41
	0,5 a 0,75	0,0	80	630	290	42
	0,75 a 1,0	0,0	20	560	420	47

Credita-se que a preponderância de solo siltoso esteja relacionada à mobilização de terra realizada no reapeçoamento do talude no ano de 2010, que alterou sua característica de deposição natural para uma característica de aterro. No entanto, por se tratar de um solo aluvial, principalmente num trecho sedimentar, existe a possibilidade que esta espessa camada siltosa pertença a um agrupamento de partículas de solo formado durante um longo período de deposição, onde a velocidade do fluxo d'água foi baixa.

Slaa et al. (2013) indicam que solos siltosos são complexos, pois ao mesmo tempo em que o silte é entendido como um material coesivo (e.g. estudos de erosão), do ponto de vista mineralógico é classificado como não coesivo, uma vez que são constituídos principalmente por quartzo e feldspato.

Cisalhamento direto

As espécies apresentaram comportamentos distintos em relação ao efeito das raízes sobre os atributos coesão, ângulo de atrito interno do solo e peso específico inicial, nas diferentes profundidades (Tabela 5).

Tabela 5. Valores de coesão (c em kPa), ângulo de atrito interno do solo (ϕ°) e peso específico inicial (D_s em kg dm^{-3}) resultantes dos ensaios de cisalhamento direto para corpos de prova com e sem raiz das espécies *Solanum paniculatum*, *Sesbania virgata* e *Mimosa pigra*.

Profundidade (m)		<i>S. paniculatum</i>		<i>S. virgata</i>		<i>M. pigra</i>	
		Com Raiz	Sem Raiz	Com Raiz	Sem Raiz	Com Raiz	Sem Raiz
0 a 0,25	c	8,1	8,5	5,6	5,0	11,7	8,8
	ϕ	15,6	30,8	39,2	21,9	33,4	40,1
	D_s	1,88 aA	1,89 aA	1,91 aA	1,86 aA	1,67 aA	1,74 aA
0,25 a 0,50	c	11,6	7,5	0,5	3,6	23,2	7,1
	ϕ	32,7	22,8	33,7	27,9	11,9	41,4
	D_s	1,86 aA	1,87 aA	1,86 aA	1,89 aA	1,58 aA	1,71 aA
0,50 a 0,75	c	11,6	8,1	12,4	15,8	21,3	18,0
	ϕ	25,7	33,5	19,3	28,5	11,6	25,9
	D_s	1,61aA	1,63 aA	1,63 aA	1,60 aA	1,58 aA	1,6 aA
0,75 a 1,0	c	7,4	0,07	13,7	5,8	9,3	14,6
	ϕ	15,9	16,4	22,0	34,2	22,6	34,9
	D_s	1,26 aB	1,32 aB	1,31 aB	1,33 aB	1,28 aB	1,31 aB

Médias com letras minúsculas iguais, na mesma linha, e letras maiúsculas iguais, na mesma coluna, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5%.

Para a espécie *Solanum paniculatum* os maiores valores de c foram encontrados nos corpos de prova com raiz, exceto na profundidade de 0 a 0,25 m, onde c foi maior nos corpos de prova sem raiz. Os valores de c dos corpos de prova sem raiz pouco variaram até a profundidade de 0,75 m, a partir da qual ocorreu a menor coesão encontrada neste trabalho: 0,07 kPa. O valor próximo de zero normalmente é atribuído a solos com baixíssima quantidade da fração argila (LAMBE; WHITMAN, 1979), o que não ocorreu (Tabela 4).

Por outro lado, ϕ foi sempre menor nos corpos de prova com raiz, com exceção da profundidade 0,25 a 0,50 m, na qual ϕ foi menor nos corpos de prova sem raiz.

Sesbania virgata foi a espécie que apresentou maior variação nos atributos c e ϕ , entre os corpos de prova com e sem raiz. Destaca-se, entretanto, o menor valor de c

encontrado entre os corpos de prova com raiz do experimento: 0,5 kPa, na profundidade de 0,25 a 0,50 m.

A espécie *Mimosa pigra* apresentou nas profundidades 0,25 a 0,50 m e 0,50 a 0,75 m os maiores valores de c entre os corpos de prova com raiz; enquanto ϕ foi sempre menor nos corpos de prova com raiz. Porém, destaca-se que os menores valores de c observados nos corpos de prova com raiz de *S. virgata* na profundidade 0,25 a 0,50 m, e de *M. pigra* na profundidade 0,75 a 1,0 m, em comparação a seus pares sem presença de raiz. Em ambos os casos, os resultados obtidos são incompatíveis com o elevado teor de finos encontrado nas respectivas amostras de solo (Tabela 4).

Considerando que durante os ensaios, todos os corpos de prova com e sem raiz foram submetidos à mesma condição de umidade (saturada), e que o solo contido nos pares de amostras (com e sem raiz) advinha do mesmo bloco extraído do campo, o comportamento incomum só poderia ser atribuído à raiz.

Após os ensaios, verificou-se que no corpo de prova de *S. virgata*, submetido à tensão normal de 11 kPa, um segmento de raiz com 4 mm de diâmetro encontrava-se exatamente no plano de ruptura e no mesmo sentido do corte. Enquanto o corpo de prova de *M. pigra*, também submetido à tensão normal de 11 kPa, apresentou raízes finas já em estado de decomposição (Figura 10).

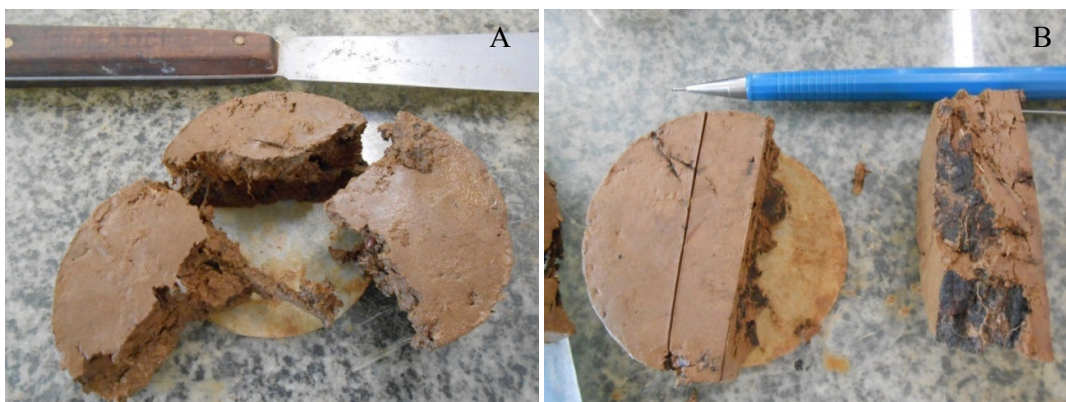


Figura 10. Corpos de prova contendo raízes das espécies (A) *Sesbania virgata*, na profundidade 0,25 a 0,50 m e (B) *Mimosa pigra*, na profundidade 0,75 a 1,0 m.

Diversos autores encontraram relações positivas entre a presença de raízes e o aumento da resistência ao cisalhamento do solo (MAFIAN, SASAN et al., 2009; ALI, 2010; ABDULLAH et al., 2011; FATTET et al., 2011; MA'RUF, 2012; FAN; LAI, 2014);

no entanto, observou-se que esta é uma relação frágil quando se avalia corpos de prova extraídos aleatoriamente em campo.

A premissa de que as raízes crescem perpendicular ao plano de corte (WU et al., 1979) pode não ser obedecida, mais ainda, a presença das raízes faz com que a fatia móvel do corpo de prova deslize com facilidade sobre a raiz, permitindo que a força cisalhante atue livre da resistência oferecida pelo atrito solo-solo, semelhante aos encontrados por Operstein e Frydman (2000) e Pollen e Simon (2005).

O comportamento anormal dos corpos de prova de *S. virgata* na profundidade 0,25 a 0,50 m e de *M. pigra* na profundidade 0,75 a 1,0 m, ambos submetidos à tensão normal de 11 kPa, pode ser verificado pelas menores deformações horizontal, quando comparada às deformações dos corpos de prova submetidos à tensão normal de 5 kPa, da qual se esperava menores valores de deformação horizontal (Figura 11).

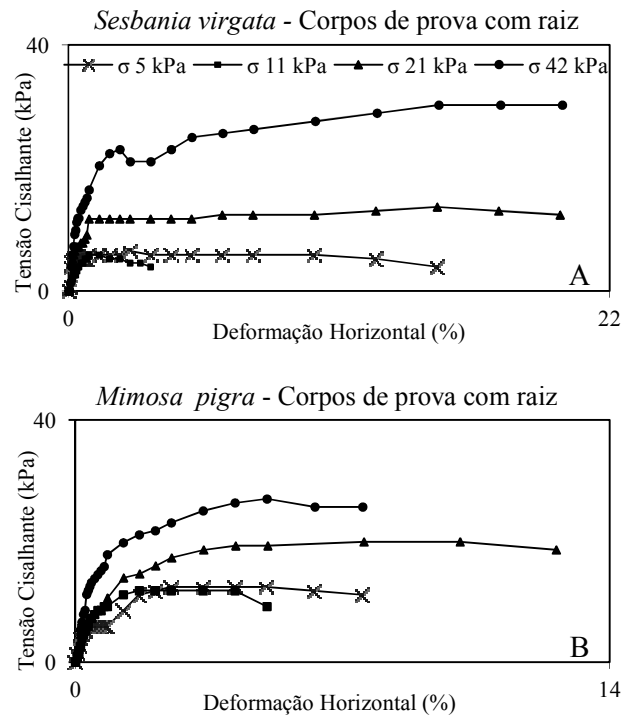


Figura 11. Deformação horizontal dos corpos de prova com raiz das espécies (A) *Sesbania virgata*, na profundidade 0,25 a 0,50 m, e (B) *Mimosa pigra*, na profundidade 0,75 a 1,0 m, submetidos às tensões normais 5, 11, 21 e 42 kPa.

Comparando as médias dos valores de c entre os tratamentos com e sem raiz, verifica-se que não há diferença significativa para este atributo, discordando dos valores encontrados por Comino et al. (2010) e Mao et al. (2012). Já para ϕ , os corpos de prova

sem raiz apresentaram valores médios superiores aos com raiz, na ordem de 30% (Tabela 6). Estes valores estão em conformidade com os encontrados por Zhang et al. (2013) e inferiores daqueles encontrados por Davoudi (2011), todos trabalhando com solos siltosos.

Tabela 6. Valores médios de coesão (c em kPa) e ângulo de atrito interno do solo (ϕ°) para os corpos de prova com e sem raízes.

	c (kPa)	ϕ ($^\circ$)
Com raiz	11,38 a	21,21 b
Sem raiz	8,57 a	29,86 a

Médias com letras minúsculas iguais, na mesma coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5%.

Como as plantas estudadas possuíam idade inferior a três anos, suas estruturas radiculares podem não ter se desenvolvido o suficiente para oferecer ao solo a maior contribuição à resistência ao cisalhamento. Isto ajudaria a explicar a não verificação de diferenças significativas no atributo coesão do solo entre os corpos de prova com e sem raiz. Normaniza et al. (2008), ao avaliarem o incremento de resistência ao cisalhamento *in situ*, descobriram que os valores de coesão do solo permeado com raízes só excederam os valores de c sem raízes após o pleno desenvolvimento da planta.

Com relação a ϕ , os resultados obtidos mostram que o atributo foi afetado pela presença de raízes, contrário aos achados de Waldron (1977) e Abdullah et al. (2011).

Sendo a envoltória de cisalhamento composta pelos coeficientes angular e linear da equação de Coulomb (LAMBE, 1951), qualquer constituinte que modifique a composição do corpo de prova, também irá alterar o valor destes coeficientes, e, conseqüentemente, os valores de c e ϕ . Uma evidência deste efeito pode ser observada na reta de regressão formada pelas envoltórias dos corpos de prova com raiz de *S. virgata* na profundidade 0,25 a 0,50 m, e de *M. pigra* na profundidade 0,75 a 1,0 m, submetidos à tensão normal de 11 kPa.

Na prática, embora as retas de regressão tenham apresentado bons ajustes ($R^2 = 0,9671$ e $R^2 = 0,9515$, respectivamente), os baixos valores de pico de resistência atingidos pelos corpos de prova subestimaram os valores dos interceptos de coesão e conseqüentemente induziu o maior valor de ϕ .

Além disso, já era esperado que a presença de raízes modificasse o comportamento da envoltória de cisalhamento por apresentar um material diferente do solo do corpo de prova, corroborando Davoudi (2006, 2011) que verificou redução nos valores de ϕ na

presença de raízes; segundo o autor, existe uma estreita relação deste atributo com o diâmetro da raiz.

Ao estudar a resistência ao cisalhamento de um solo residual natural (Latosolo Amarelo coeso típico), Silva e Carvalho (2007) verificaram correlação linear positiva e significativa entre c e o peso específico do solo, denotando dependência entre os atributos para este tipo de solo.

Todavia, os resultados deste trabalho mostram que o peso específico do solo não se correlacionou linearmente com a coesão, tampouco com o ângulo de atrito interno, diferentemente dos resultados obtidos por Rocha et al. (2002).

Outro aspecto relevante está relacionado ao peso específico do solo. Embora amplamente constituídos por finos, menores valores de peso específico foram encontrados nos corpos de prova extraídos dos blocos que estavam em maior profundidade (Tabela 5), apresentando diferença significativa entre as profundidades 0,0 a 0,75 e 0,75 a 1,0 m, e não diferindo estatisticamente entre os corpos de prova com e sem raízes. Esta baixa estruturação pode estar associada a alta concentração da fração silte, comum em solos menos intemperizados (ROCHA et al., 2002).

Além disso, o atrito solo-solo no plano de cisalhamento, que favorece o aumento da resistência do solo (QIANG et al., 2009) foi reduzido devido ao alto índice de vazios nos corpos de prova na profundidade 0,75 a 1,0 m.

Fatores biológicos, como a decomposição de raízes mortas e a presença de galerias, ninhos e câmaras de organismos da macrofauna do solo (insetos, térmitas, vermes, etc.), verificados em laboratório no momento da confecção dos corpos de prova no geral, são apontados como responsáveis por diminuir a resistência solo-solo (Figura 12).

A ausência de um padrão para explicar o efeito da presença das raízes nas espécies avaliadas pode ser verificada nas envoltórias de cisalhamento correspondentes a cada bloco de solo, nas profundidades estudadas (Figuras 13 a 15).



Figura 12. Corpo de prova da profundidade 0,75 a 1,0 m apresentando elevado índice de vazios.

Para a espécie *Solanum paniculatum*, na profundidade 0 a 0,25 m, o menor valor e o pico de resistência ao cisalhamento dos corpos de prova sem raiz alcançou 9,75 e 31,85 kPa, respectivamente. A diferença entre os valores responde pela inclinação da reta de regressão, que permitiu determinar os parâmetros c e ϕ para estes corpos de prova, 8,54 kPa e $30,81^\circ$, respectivamente. Já nos corpos de prova com raiz, o menor valor e o pico de resistência ao cisalhamento apresentados foram, respectivamente, 9,1 e 18,85 kPa, para as tensões normais de 5 e 42 kPa, que permitiu encontrar os valores de 8,1 kPa e $15,62^\circ$, para c e ϕ , respectivamente. Isto evidenciou que, nesta profundidade, tanto c , como ϕ são menores na presença de raiz desta espécie (Figura 13).

Na profundidade 0,25 a 0,50 m, os menores valores e os picos de resistência ao cisalhamento encontrados foram 8,5 e 25,5 kPa, respectivamente, para os corpos de prova sem raiz, e 12,39 e 38,49 kPa, respectivamente, para os corpos de prova com raiz. Os respectivos valores de c e ϕ para as amostras sem raiz, 7,57 kPa e $22,8^\circ$, e 11,6 kPa e $3,67^\circ$ para as amostras com raiz. Observou-se, nesta profundidade, menor valor de ϕ e maior valor de c na presença de raiz desta espécie.

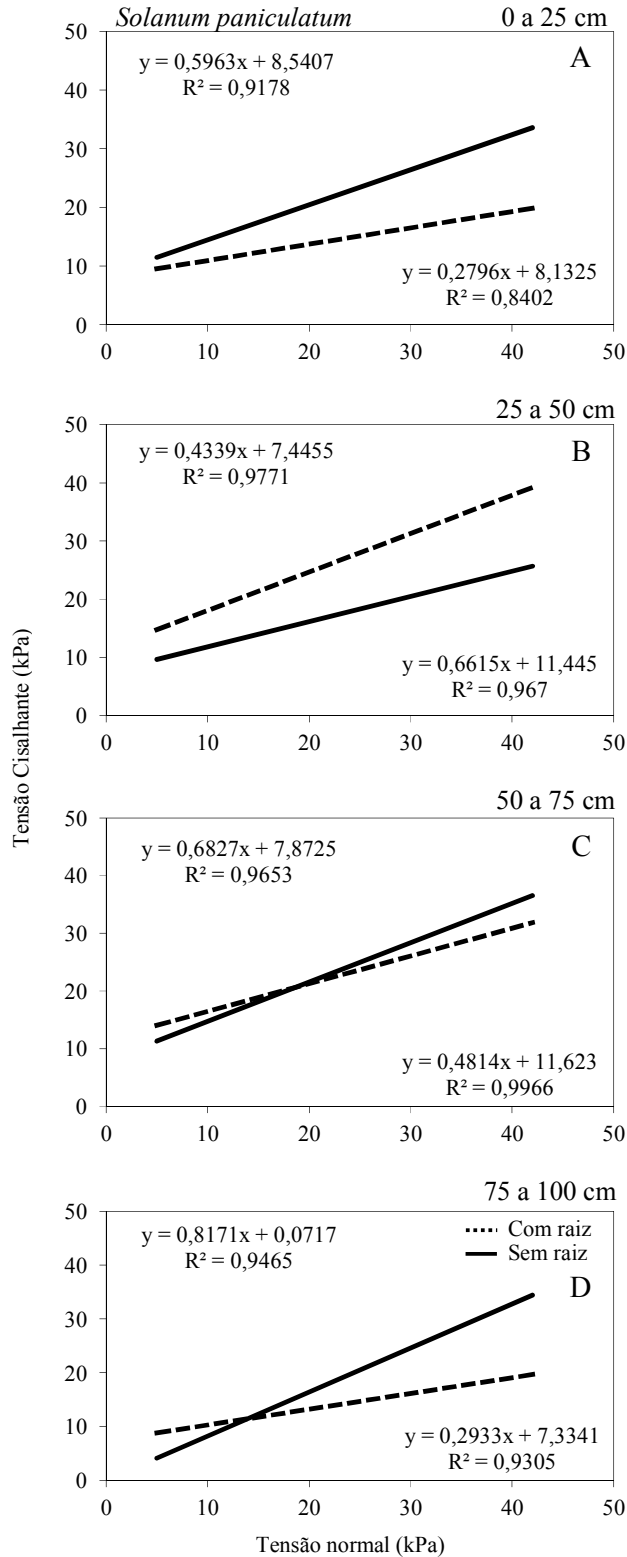


Figura 13. Tensão normal e cisalhante para os corpos de prova com e sem raízes da espécie *Solanum paniculatum*, nas profundidades 0 a 0,25 (A), 0,25 a 0,50 (B), 0,50 a 0,75 (C) e 0,75 a 1,0 m (D).

Na profundidade 0,50 a 0,75 m, os corpos de prova sem raiz apresentaram 10,4 kPa como menor valor de resistência, e pico de resistência ao cisalhamento igual a 35,36 kPa. Os corpos de prova com raiz apresentaram 13,65 kPa como menor valor de resistência, e pico de resistência ao cisalhamento igual a 31,85 kPa. Para os corpos de prova sem raiz, c e ϕ foram, respectivamente, 8,1 kPa e $33,5^\circ$; enquanto que para os corpos de prova com raiz foram, respectivamente, 11,6 kPa e $25,7^\circ$. Nesta profundidade, observou-se menor ϕ e maior valor de c na presença de raiz desta espécie.

Finalmente, na profundidade 0,75 a 1,0 m, o menor valor e o pico de resistência ao cisalhamento dos corpos de prova sem raiz alcançou 7,82 e 35,36 kPa, respectivamente, correspondendo às tensões normais de 5 e 42 kPa. O valor de c encontrado foi de 0,07 kPa, enquanto de ϕ foi igual a $16,37^\circ$. Nos corpos de prova com raiz, o menor valor e o pico de resistência ao cisalhamento apresentados foram, respectivamente, 7,2 e 19,05 kPa, com os valores de 7,33 kPa e $15,88^\circ$, para c e ϕ , respectivamente. Isto evidenciou que, nesta profundidade, ocorreu menor valor de ϕ e maior valor de c na presença de raiz desta espécie.

A espécie *Sesbania virgata* apresentou inclinações nas retas das envoltórias de cisalhamento bastante semelhantes entre corpos de prova com e sem raízes, em todas as profundidades, exceto para 0 a 25 cm (Figura 14).

Na profundidade 0,25 a 0,50 m, o menor valor e o pico de resistência ao cisalhamento dos corpos de prova sem raiz alcançou 5,85 e 26,65 kPa, respectivamente, correspondendo às tensões normais de 5 e 42 kPa. A inclinação da reta permitiu conhecer os parâmetros c , 3,65 kPa, e ϕ , para estes corpos de prova, $27,9^\circ$. Já nos corpos de prova com raiz, o menor valor e o pico de resistência ao cisalhamento apresentados foram, respectivamente, 6,5 e 30,2 kPa, para as tensões normais de 5 e 42 kPa, que permitiu encontrar os valores de 0,5 kPa e $33,75^\circ$, para c e ϕ , respectivamente. Isto evidenciou que, nesta profundidade c é menor e ϕ é maior na presença de raiz desta espécie.

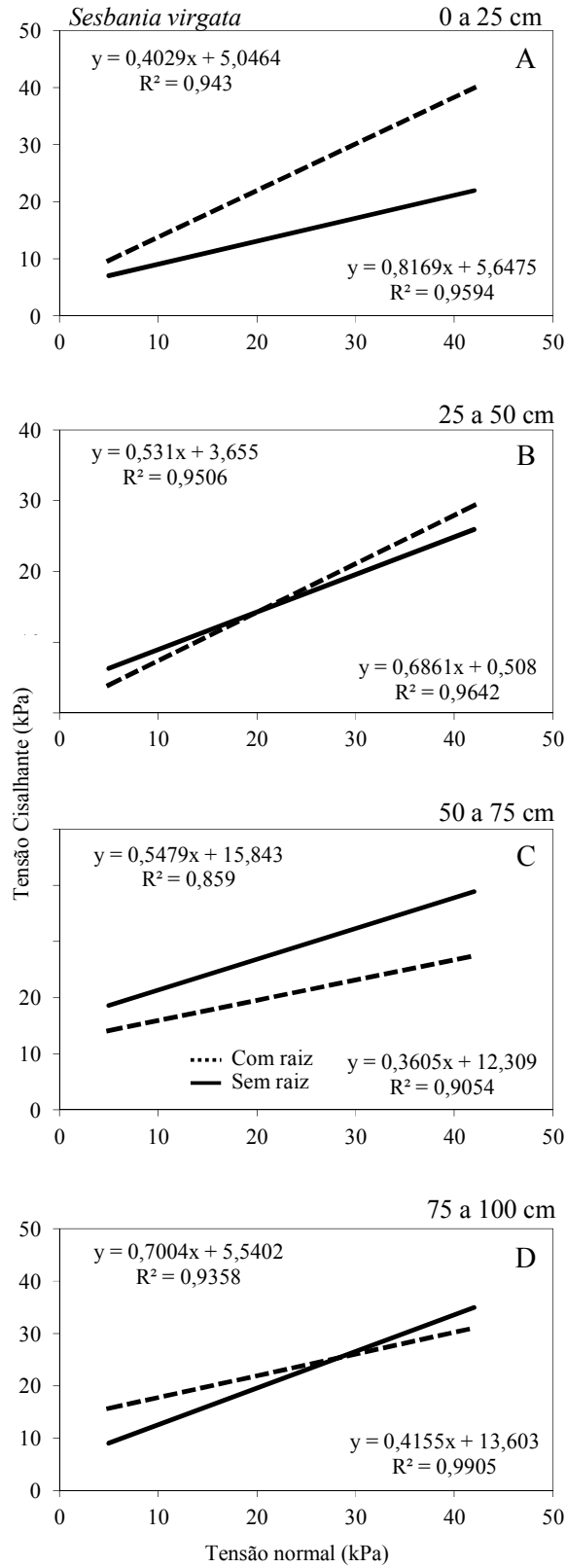


Figura 14. Tensão normal e cisalhante para os corpos de prova com e sem raízes da espécie *Sesbania virgata*, nas profundidades 0 a 0,25 (A), 0,25 a 0,50 (B), 0,50 a 0,75 (C) e 0,75 a 1,0 m (D).

Na profundidade 0,50 a 0,75 m, os menores valores e os picos de resistência ao cisalhamento encontrados foram 18,99 e 40,6 kPa, respectivamente, para os corpos de prova sem raiz, e 12,39 e 27,4 kPa, respectivamente, para os corpos de prova com raiz, igualmente correspondentes às tensões normal de 5 e 42 kPa. Com isso, foram conhecidos os respectivos valores de c e ϕ para as amostras sem raiz, 15,8 kPa e 28,5°, e 12,42 kPa e 19,32° para as amostras com raiz. Observou-se, nesta profundidade, menores valores de c e ϕ na presença de raiz desta espécie.

Na profundidade 0,75 a 1,0 m, o menor valor e o pico de resistência ao cisalhamento dos corpos de prova sem raiz alcançou 7,8 e 33,27 kPa, respectivamente, correspondendo às tensões normais de 5 e 42 kPa. A diferença entre estes valores responde pela inclinação da reta de regressão, que permitiu conhecer os parâmetros c , 5,79 kPa, e ϕ , para estes corpos de prova, 34,18°. Já os corpos de prova com raiz, o menor valor e o pico de resistência ao cisalhamento apresentados foram, respectivamente, 15,6 e 31,31 kPa, para as tensões normais de 5 e 42 kPa, que permitiu encontrar os valores de 13,72 kPa e 22,01°, para c e ϕ , respectivamente. Isto evidenciou que, nesta profundidade, ocorreu menor valor de ϕ e maior valor de c na presença de raiz desta espécie.

A espécie *Mimosa pigra* apresentou maiores valores de c nos corpos de prova com raiz até a profundidade de 0,75 m, a partir da qual a maior coesão foi atribuída ao corpo de prova sem raiz (Figura 15).

Na profundidade 0 a 0,25 m, o menor valor e o pico de resistência ao cisalhamento dos corpos de prova sem raiz alcançaram 13,0 e 45,02 kPa, respectivamente, correspondendo às tensões normais de 5 e 42 kPa. A diferença entre estes valores responde pela inclinação da reta de regressão, que permitiu conhecer os parâmetros c , 8,77 kPa, e ϕ , para estes corpos de prova, 40,05°. Já os corpos de prova com raiz, o menor valor e o pico de resistência ao cisalhamento apresentados foram, respectivamente, 14,95 e 39,66 kPa, para as tensões normais de 5 e 42 kPa, que permitiu encontrar os valores de 11,67 kPa e 33,43°, para c e ϕ , respectivamente. Nesta profundidade ocorreu menor valor de ϕ e maior valor de c na presença de raiz desta espécie.

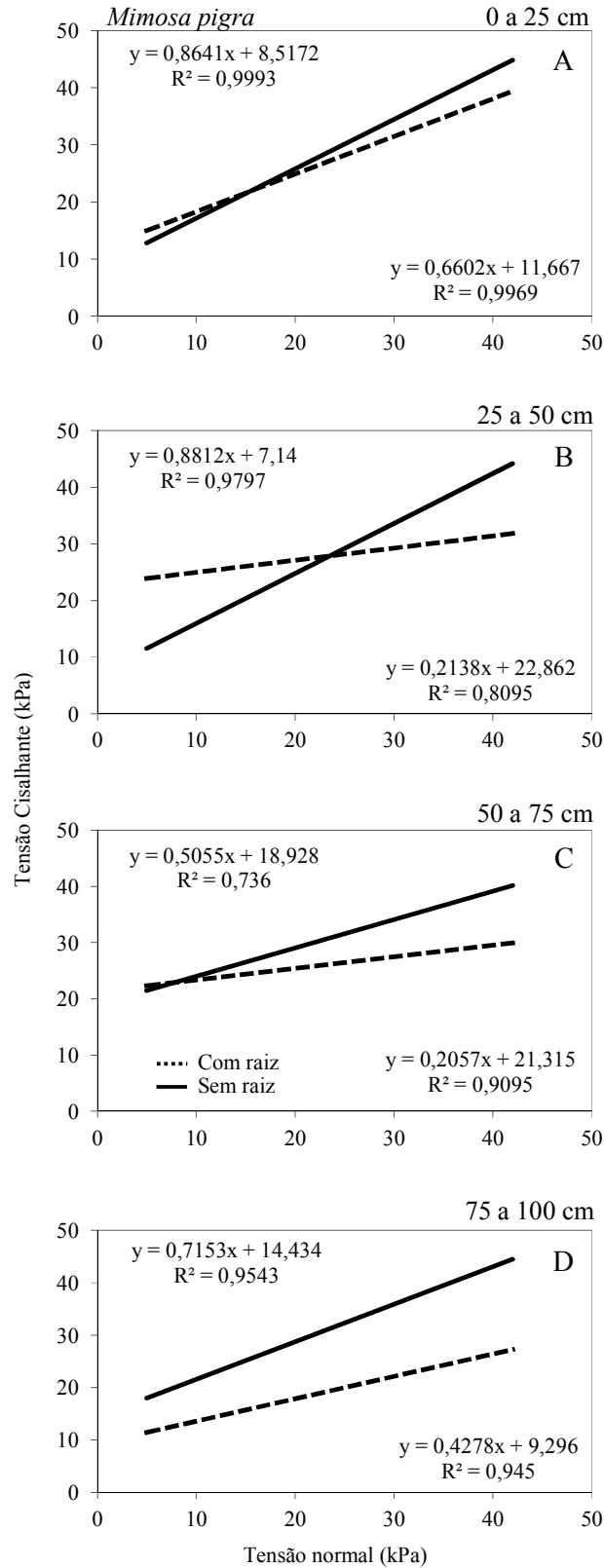


Figura 15. Tensão normal e cisalhante para os corpos de prova com e sem raízes da espécie *Mimosa pigra*, nas profundidades 0 a 0,25 (A), 0,25 a 0,50 (B), 0,50 a 0,75 (C) e 0,75 a 1,0 m (D).

Na profundidade 0,25 a 0,50 m, o menor valor e o pico de resistência ao cisalhamento dos corpos de prova sem raiz alcançou 12,35 e 43,56 kPa, respectivamente, correspondendo às tensões normais de 5 e 42 kPa. A inclinação da reta permitiu conhecer os parâmetros c , 7,14 kPa, e ϕ , para estes corpos de prova, 41,4°. Já nos corpos de prova com raiz, o menor valor e o pico de resistência ao cisalhamento apresentados foram, respectivamente, 22,83 e 30,55 kPa, para as tensões normais de 5 e 42 kPa, que permitiu encontrar os valores de 23,2 kPa e 11,89°, para c e ϕ , respectivamente. Nesta profundidade, c é maior e ϕ é menor na presença de raiz desta espécie.

Na profundidade 0,50 a 0,75 m, os corpos de prova sem raiz apresentaram 16,9 kPa como menor valor de resistência, e pico de resistência ao cisalhamento igual a 37,19 kPa. Já os corpos de prova com raiz apresentaram 22,83 kPa como menor valor de resistência, e pico de resistência ao cisalhamento igual a 30,56 kPa. Os valores de c e ϕ para os corpos de prova sem raiz foram, respectivamente, 18,0 kPa e 25,9°, enquanto que para os corpos de prova com raiz foram, respectivamente, 21,3 kPa e 11,6°. Assim, nesta profundidade, observou-se maior valor de c e menor ϕ na presença de raiz desta espécie.

Na profundidade 0,75 a 1,0 m, os menores valores e os picos de resistência ao cisalhamento encontrados foram 20,44 e 46,0 kPa, respectivamente, para os corpos de prova sem raiz, e 11,78 e 26,94 kPa, respectivamente, para os corpos de prova com raiz, igualmente correspondentes às tensões normal de 11 e 42 kPa. Com isso, foram conhecidos os respectivos valores de c e ϕ para as amostras sem raiz, 14,61 kPa e 34,89°, e 9,3 kPa e 22,63° para as amostras com raiz. Observou-se, nesta profundidade, menores valores de c e ϕ na presença de raiz desta espécie.

A comparação entre as envoltórias de cisalhamento através da análise de correlação mostrou que não existe diferença significativa ($P < 0,05$) entre as retas resultantes dos ensaios de cisalhamento direto obtidos a partir dos corpos com e sem raízes (Tabela 7).

Tabela 7. Comparação das equações de regressão de resistência ao cisalhamento do solo, após linearização, usando-se o procedimento de Snedecor e Cochran (1989) para os corpos de prova sem raízes (SR) e com raízes (CR), nas profundidades de 0 a 0,25, 0,25 a 0,5, 0,5 a 0,75 e 0,75 a 1,0 m.

Espécie	Pares	0 a 0,25	0,25 a 0,5	0,5 a 0,75	0,75 a 1,0
<i>Solanum paniculatum</i>	SR vs. CR	NS	NS	NS	NS
<i>Sesbania virgata</i>	SR vs. CR	NS	NS	NS	NS
<i>Mimosa pigra</i>	SR vs. CR	NS	NS	NS	NS

Entre os corpos de prova permeados com raízes, a espécie *Sesbania virgata* apresentou o maior pico de resistência ao cisalhamento, 41,61 kPa quando submetido ao carregamento de 42 kPa, na profundidade de 0 a 0,25 m. Já para os corpos de prova sem raízes, a espécie que apresentou maior pico de resistência foi *Mimosa pigra*, 46 kPa, quando submetido ao carregamento de 42 kPa, na profundidade de 0,75 a 1,0 m.

A posição das raízes em relação ao plano de cisalhamento influenciou neste comportamento, pois, conforme dito anteriormente, os corpos de prova foram esculpidos em posições aleatórias dentro dos blocos de solo, de modo a certificar somente a presença de raízes nos mesmos, porém sem conhecimento do direcionamento, do diâmetro e do nível de ramificação das raízes.

Zhang et al. (2010), trabalhando com corpos de prova siltosos e permeados com raízes de *Robinia pseudoacacia* em três formas de distribuição, perpendicular, paralela e cruzada em relação ao plano de corte, e encontraram que o efeito das raízes cruzadas, seguido das raízes perpendiculares ao plano de corte são os mais consideráveis para o reforço do solo.

Do mesmo modo, como as raízes são constituídas por elementos menos densos que o solo, espera-se que corpos de prova permeados por raízes apresentem menor peso específico do que aqueles que contenham apenas solo, influenciando diretamente na sua resistência ao cisalhamento (ROCHA et al., 2002).

Contudo, é válido destacar que o método de determinação da resistência ao cisalhamento do solo *in situ*, utilizado por Comino et al. (2010) e Mao et al. (2012), está sujeito a interferências do ambiente e, por esta razão, considera o sistema radicular como um todo e não apenas segmentos de raízes, como apresentado neste estudo.

Isto possibilita maior contato da superfície do solo com a superfície das raízes, e, conseqüentemente, maior fricção e maior resistência do solo (MCKENZIE et al., 2013). Os trabalhos que utilizam este método de investigação da resistência ao cisalhamento tendem a apresentar maiores valores de coesão e resistência do solo em amostras com raízes.

CONCLUSÕES

O tratamento sem raiz apresentou maiores valores de ϕ quando comparado ao tratamento com raiz na ordem de 30%.

As espécies apresentaram comportamentos distintos em relação ao efeito das raízes sobre os atributos c e ϕ .

Solanum paniculatum apresentou maiores valores de c para os corpos de prova com raiz em todas as profundidades, exceto na profundidade de 0 a 0,25 m. *Sesbania virgata* apresentou a maior variação nos atributos c e ϕ entre os corpos de prova com e sem raiz. *Mimosa pigra* apresentou os maiores valores de c deste trabalho nas profundidades 0,25 a 0,50 m e 0,50 a 0,75 m, ϕ sempre menor nos corpos de prova com raiz.

A posição e o estado da raiz influenciaram nos resultados dos testes de cisalhamento direto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDI, E.; MAJNOUNIAN, B.; RAHIMI, H.; ZOBEIRI, M. Inter and intra species variations of root tensile strength in some Hyrcanian species. First international conference of soil and root engineering relationship. **Anais...**, 2010. Ardebil: LANDCON1005.

ABDULLAH, M. N.; OSMAN, N.; ALI, H. F. Soil-root Shear Strength Properties of Some Slope Plants. **Sains Malaysiana**, v. 40, n. 10, p. 1065–1073, 2011.

ABERNETHY, B.; RUTHERFURD, 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.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: Solo. Análise granulométrica em solos. Rio de Janeiro, 1984a. 13p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180**: Solo. Determinação do limite de liquidez de solos. Rio de Janeiro, 1984b. 3p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459**: Solo. Determinação do limite de plasticidade e índice de plasticidade em solos. Rio de Janeiro, 1984c. 6p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6508**: Solo. Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984d. 8p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457**: Solo. Preparação de amostras para os ensaios de compactação e caracterização do solo. Rio de Janeiro, 1986. 9p.

ALI, F. Use of vegetation for slope protection: Root mechanical properties of some tropical plants. **International Journal of Physical Sciences**, v. 5, n. 5, p. 496–506, 2010.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D 6528**: Standard Test Method for Consolidated Undrained Direct Simple Shear Testing of Cohesive Soils. West Conshohocken, 2007. 9p.

BAETS, S.; POESEN, J.; REUBENS, B.; et al. Root tensile strength and root distribution of typical Mediterranean plant species and their contribution to soil shear strength. **Plant and Soil**, v. 305, n. 1-2, p. 207–226, 2008.

BÖHM, W. **Methods of Studying Root Systems**. Berlin: Springer-Verlag, 1979. 188p.

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. G. **Use of Vegetation in Civil Engineering**. 2. ed. London: CIRIA, 2007. 312p.

DAVOUDI, M. H. Influence of Willow Root Density on Shear Resistance Parameters in Fine Grain Soils using in situ Direct Shear Tests. **Research Journal of Environmental Sciences**, v. 5, n. 2, p. 157–170, 2011.

DAVOUDI, M. H. Effect of root diameter on cohesion and internal friction angle of soil. **Journal of Agriculture Engineering Research**, v. 7, p. 53–68, 2006.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 2013. 353p.

FAN, C. C.; LAI, Y. F. Influence of the spatial layout of vegetation on the stability of slopes. **Plant and Soil**, v. 377, n. 1-2, p. 83–95, 2014.

FAN, C.; SU, C. 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.; CHEN, Y. The effect of root architecture on the shearing resistance of root-permeated soils. **Ecological Engineering**, v. 36, n. 6, p. 813–826, 2010.

FATTET, M.; FU, Y.; GHESTEM, M.; et al. Effects of vegetation type on soil resistance to erosion: Relationship between aggregate stability and shear strength. **CATENA**, v. 87, n. 1, p. 60–69, 2011.

FRANCO, E. **Biogeografia do Estado de Sergipe**. Aracaju: UFS, 1983. 136p.

GENET, M.; STOKES, A.; FOURCAUD, T.; NORRIS, J. E. The influence of plant diversity on slope stability in a moist evergreen deciduous forest. **Ecological Engineering**, v. 36, n. 3, p. 265–275, 2010.

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. 1-2, p. 43–61, 2014.

GREENWOOD, J. R.; NORRIS, J. E.; WINT, J. Site Investigation for the Effects of Vegetation on Ground Stability. **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 24, n. 3, p. 467–481, 2006.

HOLANDA, F. S. R.; ROCHA, I. P. Streambank Soil Bioengineering Approach to Erosion Control. In: CARPI, A. (Ed.); **Progress in Molecular and Environmental Bioengineering – From Analysis and Modeling to Technology Applications**. Rijeka: InTech, p.553–576, 2011.

LAMBE, T. W. **Soil testing for engineers**. New York: John Wiley, 1951. 165p.

LAMBE, T. W.; WHITMAN, R. V. **Soil Mechanics, SI Version**. New York: John Wiley & Sons, 1979. 572p.

LONSDALE, W. M.; MILLER, I. L.; FORNO, I. W. Mimosa pigra. In: GROVES, R. H.; SHEPPARD, R. C. H.; RICHARDSON, R. G. **The biology of Australian weeds**. Melbourne: R.G. and F.J. Richardson Publishers, p. 169-188, 1995.

LORENZI, H. **Plantas daninhas do Brasil: Terrestres, aquáticas, parasitas e exóticas**. 4 ed. Nova Odessa: Instituto Plantarum, 2008. 608p.

MA'RUF, M. F. Shear strength of Apus bamboo root reinforced soil. **Ecological Engineering**, v. 41, p. 84–86, 2012.

MAFIAN, S.; HUAT, B. B. K.; BARKER, D. H.; RAHMAN, N. A.; SINGH, H. Live poles for slope stabilization in the tropical environment. **Electronic Journal of Geotechnical Engineering**, v. 14 G, 2009.

MAFIAN, S.; HUAT, B. B. K.; GHIASI, V. Evaluation on Root Theories and Root Strength Properties in Slope Stability. **European Journal of Scientific Research**, v. 30, n. 4, p. 594–607, 2009.

MAO, Z.; SAINT-ANDRÉ, L.; GENET, M.; et al. Engineering ecological protection against landslides in diverse mountain forests: Choosing cohesion models. **Ecological Engineering**, v. 45, p. 55–69, 2012.

MCKENZIE, B. M.; MULLINS, C. E.; TISDALL, J. M.; BENGOUGH, A. G. Root-soil friction: quantification provides evidence for measurable benefits for manipulation of root-tip traits. **Plant, cell & environment**, v. 36, n. 6, p. 1085–92, 2013.

NORMANIZA, O.; FAISAL, H. A.; BARAKBAH, S. S. Engineering properties of *Leucaena leucocephala* for prevention of slope failure. **Ecological Engineering**, v. 2, n. 32, p. 215–221, 2008.

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

PETRONE, A.; PRETI, F. Soil Bioengineering Measures in Latin America Autochthonal Cuttings Suitability.pdf. In: C. Margottini; P. Canuti; K. Sassa (Eds.); **Landslide Science and Practice**. New York / Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, p.325–329, 2013.

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, p. 1–11, 2005.

POLLEN-BANKHEAD, N.; SIMON, A. Hydrologic and hydraulic effects of riparian root networks on streambank stability: Is mechanical root-reinforcement the whole story? **Geomorphology**, v. 116, n. 3-4, p. 353–362, 2010.

POTT, A.; POTT, V. J. **Plantas do Pantanal**. Corumbá: Embrapa Informação Tecnológica, 1994. 320p.

QIANG, Z.; H, S. H.; T, H. B.; HONGWU, Z. Scale dependence of direct shear tests. **Chinese Science Bulletin**, v. 54, p. 4337–4348, 2009.

ROCHA, W. W.; DIAS JUNIOR, M. S.; LIMA, J. M.; MIRANDA, E. E. V.; SILVA, A. R. Resistência ao cisalhamento e grau de intemperismo de cinco solos na região de Lavras (MG). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, p. 297–303, 2002.

SAMADI, A.; AMIRI-TOKALDANY, E.; DAVOUDI, M. H.; DARBY, S. E. Identifying the effects of parameter uncertainty on the reliability of modeling the stability of overhanging, multi-layered, river banks. **Geomorphology**, v. 134, n. 3-4, p. 483–498, 2011.

SILVA, A. J. N.; CARVALHO, F. G. Coesão e resistência ao cisalhamento relacionadas a atributos físicos e químicos de um Latossolo Amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 853–862, 2007.

SIMÕES, K.; DU, J.; KRETZSCHMAR, F. S.; et al. Phytotoxic catechin leached by seeds of the tropical weed *Sesbania virgata*. **Journal of chemical ecology**, v. 34, n. 5, p. 681–7, 2008.

SIMON, A.; POLLEN, N.; LANGENDOEN, E. Influence of two woody riparian species on critical conditions for streambank stability: upper Truckee river, California. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 42, n. 1, p. 99–113, 2006.

SLAA, S.; HE, Q.; MAREN, D. S.; WINTERWERP, J. C. Sedimentation processes in silt-rich sediment systems. **Ocean Dynamics**, v. 63, n. 4, p. 399–421, 2013.

SNEDECOR, G. W.; COCHRAN, W. G. **Statistical methods**. 8 ed. Ames: Iowa State University Press, 1989. 503p.

STOKES, A.; ATGER, C.; BENGOUGH, A. G.; FOURCAUD, T.; SIDLE, R. C. Desirable plant root traits for protecting natural and engineered slopes against landslides. **Plant and Soil**, v. 324, n. 1-2, p. 1–30, 2009.

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

SUTILI, F. J.; DENARDI, L.; DURLO, M. A.; RAUCH, H. P.; WEISSTEINER, C. Flexural behaviour of selected riparian plants under static load. **Ecological Engineering**, v. 43, n. 1, p. 85–90, 2012.

USUGA, J. C. L.; TORO, J. A. R.; ALZATE, M. V. R.; JESÚS LEMA TAPIAS, Á. DE. Estimation of biomass and carbon stocks in plants, soil and forest floor in different tropical forests. **Forest Ecology and Management**, v. 260, n. 10, p. 1906–1913, 2010.

WALDRON, L. J. The Shear Resistance of Root-Permeated Homogeneous and Stratified Soil1. **Soil Science Society of America Journal**, v. 41, n. 5, p. 843, 1977.

WESLEY, L. D. **Fundamentals of Soil Mechanics for Sedimentary and Residual Soils**. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2009.

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

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, n. 1, p. 19–26, 2010.

ZHANG, Z. Y.; WU, D. Z.; WANG, C. Study on the Shear Strength Properties of the Silt in Hangzhou, China. **Applied Mechanics and Materials**, v. 405-408, p. 349–352, 2013.