

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO

CARLOS VÍTOR OLIVEIRA ALVES

**VELOCIDADE CRÍTICA DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL
CONCENTRADO E RESISTÊNCIA MECÂNICA AO CISALHAMENTO
DIRETO EM ARGISSOLO**

Recife – PE

2017

Carlos Vítor Oliveira Alves
Engenheiro Agrônomo

Velocidade crítica do escoamento superficial concentrado e resistência mecânica ao cisalhamento direto em Argissolo

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências do Solo da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Agronomia - Ciências do Solo.

Orientador: José Ramon Barros Cantalice

Recife – PE

2017

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Ficha catalográfica

A474v Alves, Carlos Vitor Oliveira.
Velocidade crítica do escoamento superficial concentrado e
Resistência mecânica ao cisalhamento direto em Argissolo / Carlos
Vítor Oliveira Alves. – 2017.
91 f. : il.

Orientador: José Ramon Barros Cantalice.
Tese (Doutorado) – Universidade Federal Rural de
Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Agronomia – Ciência do
Solo, Recife, BR-PE, 2017.
Inclui referências.

1. Cisalhamento direto do solo 2. Erodibilidade do solo 3. Resistência do solo
4. Tensão de cisalhamento crítico
I. Cantalice, José Ramon Barros, orient. II. Título

CDD 664

CARLOS VÍTOR OLIVEIRA ALVES

Velocidade crítica do escoamento superficial concentrado e resistência mecânica ao cisalhamento direto em Argissolo

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências do Solo da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Agronomia - Ciências do Solo.

Aprovada em 27 de Julho de 2017

Prof. Dr. José Ramon Bastos Cantalice
Orientador
Universidade Federal Rural de Pernambuco

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Sandro Augusto Bezerra
Instituto Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Brivaldo Gomes de Almeida
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Prof. Dr. Marcus Metri Correa
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Prof. Dr. Wagner Luís de Souza Silva
Instituto Federal de Pernambuco

Aos meus pais, pelos ensinamentos de vida e por terem me guiado nesta trajetória que hoje sigo.

DEDICO

Aos meus irmãos, amigos e familiares pelo apoio e companheirismo desde sempre.

OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

À Deus por ter me dado força e perseverança;

Aos meus pais, pois nenhuma palavra será suficiente para expressar tamanha gratidão que carrego pelos ensinamentos, incentivos, força e transmissão de pensamentos positivos durante essa árdua jornada;

Aos meus familiares pela força, positividade e amor transmitido;

Ao meu tio, pai e amigo, Clodoaldo Alves, quem mais me incentivou, ajudou em diversas formas, transmitiu toda sua energia positiva e carinho para que o êxito fosse obtido;

Aos meus irmãos, Bernardo Lovatti, Quiara Lovatti e Nathália Oliveira, pelo amor sempre correspondido e pela confiança e força depositada;

Ao meu orientador José Ramon Bastos Cantalice, pela orientação e ensinamentos científicos;

Aos professores do programa de pós-graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal Rural de Pernambuco, pelo conhecimento transmitido e auxílio nas análises laboratoriais que se fizeram necessárias;

Aos meus velhos amigos dessa longa jornada vivida em meio acadêmico. Em especial àqueles que sempre se fizeram presentes: Alcione Guimarães, Elimário Teixeira, Leandro Dias, Nielson Machado, Yuri Caires; e

Aos meus novos amigos e conhecidos, pelo ótimo convívio, às vezes áspero; mas nem só de flores nascem as grandes amizades. Em especial: Valério Oliveira, Diego Valderval, Heitor Duarte, Kairon Rocha, Mayame Brito, Vinicius Gomes, Juscélia Ferreira, Juliet Emília, Tiago Santos, Thiago Schlosser, Abraão Cícero, Ana Barros, Heraldo Oliveira, Felipe José, Ana Clara, Raquel Barros, Miguel Júlio, Luís Antônio, Aleksandro Ferreira, Alice Sutana;

Aos colegas e amigos do laboratório de Manejo e Conservação do Solo pelos debates calorosos, momentos de descontração e ajuda na execução prática do experimento: Isabela Dias, Elves Obede, Douglas Teixeira, Wagner Luiz, Yuri Jacques, Júnior, Fábio Farias, Fernando;

Ao meu amigo Wagner Luiz, pelas trocas de experiência e ensinamentos durante a execução das análises laboratoriais de cisalhamento direto, entre outras;

A dona Maria do Socorro Santana, secretária do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo pela cordialidade, presteza e carinho sempre recíprocos;

A todos os funcionários da Universidade Federal Rural de Pernambuco, pelo serviço prestado e bom convívio;

À Universidade Federal Rural de Pernambuco, em especial ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, pela oportunidade e condições concedidas para realização da pesquisa e crescimento científico/profissional;

Aos amigos que o Esporte Clube Bahia me proporcionou na cidade de Recife, unidos pelo amor ao maior clube do Norte/Nordeste;

Aos meus amigos da Associação Desportiva Amantes da Pesca (ADAP), pelo ótimo convívio e diversos momentos de descontração, em especial: Thiago Paulino, Ricardo Cavalcante, Romildo Conegundes e Diego Leite;

Aos amigos que também pude conhecer por meio da pesca e que sempre torceram pelo meu sucesso, em especial: Jarbas Costa, Ricardo Araújo, Walberg Rangel, Washington Maia e Wellington Melo;

Aos amigos de longas datas, pelo amor, carinho, atenção e palavras de conforto, em especial: Bruno Miranda, Leonardo Lino e Murilo Silvestre;

À CAPES, pela concessão da bolsa durante o período do curso;

A todos que contribuíram para que esta etapa fosse concluída com êxito, e que por infortúnio da memória não citei, meus sinceros agradecimentos!

LISTA DE SÍMBOLOS

g (m s ⁻¹)	Aceleração da gravidade
ϕ (graus)	Ângulo de atrito interno entre as partículas do solo
A (m ²)	Área
D_c (kg m ⁻² s ⁻¹)	Capacidade de desagregação do escoamento
α'	Coefficiente caracterizando a probabilidade de uma mínima resistência do solo
f (Adm)	Coefficiente de atrito de Darcy-Weisbach
n (Adm)	Coefficiente de atrito de Manning
$tg\phi$ (graus)	Coefficiente de atrito interno entre as partículas do solo
m	Coefficiente de friabilidade
K	Coefficiente de homogeneidade de teor de argila
n'	Coefficiente de sobrecarga ao solo
C_f (Pa)	Coesão de falha, na ruptura da amostra
C (Pa ou kPa)	Coesão do solo
C_0 (Pa ou kPa)	Coefficiente de coesão do material
L (m)	Comprimento do canal
C_s (kg L ⁻¹)	Concentração de sedimentos
S (m m ⁻¹)	Declividade
ρ (kg m ⁻³)	Densidade da água
ρ_p (kg m ⁻³)	Densidade de partículas sólidas do solo
ρ_s (kg m ⁻³)	Densidade do solo
Q (m ³ s ⁻¹)	Descarga líquida
σ	Desvio padrão
d (mm)	Diâmetro característico das partículas do solo (D_{50})
K_r (kg N ⁻¹ s ⁻¹)	Erodibilidade do solo
T	Força aplicada no corpo de prova
N	Força normal aplicada no corpo de prova
t (min)	Intervalo entre amostragens
Fr (Adm.)	Número de Froude
Re (Adm.)	Número de Reynolds
PS (kg m ²)	Perda total de solo
P_m (m)	Perímetro molhado
γ (t m ⁻³)	Peso específico da água

γ_s (t m ⁻³)	Peso específico do solo
A_1''	Coefficiente do sedimento
γ_p (t m ⁻³)	Peso específico do sedimento
α (m m ⁻¹)	Porosidade total do solo
R_h (m)	Raio hidráulico
τ (kPa)	Resistência do solo ao cisalhamento
D_r (kg m ⁻² s ⁻¹)	Taxa de desagregação do solo pelo fluxo concentrado
τ_{cr} (Pa)	Tensão crítica de cisalhamento do solo
τ_f (Pa)	Tensão de cisalhamento do fluxo
τ_c (Pa)	Tensão de cisalhamento direto do solo
σ_n (kPa)	Tensão normal
$V_{Manning}$ (m s ⁻¹)	Velocidade permissível obtida pela equação de Manning
$V_{Mirtskhoulava}$ (m s ⁻¹)	Velocidade permissível obtida pela equação de Mirtskhoulava
V_m (m s ⁻¹)	Velocidade superficial média do fluxo

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL	19
1.1 Hipóteses	20
1.2 Objetivo geral	21
1.3 Objetivos específicos	21
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1 Erosão em solos argilosos: fatores que controlam ou interferem	26
2.2 Resistência do solo ao cisalhamento	28
Referências	31
3 EROSÃO PELO FLUXO CONCENTRADO E VELOCIDADE PERMISSÍVEL EM HORIZONTE BT DE UM ARGISSOLO	35
RESUMO	36
ABSTRACT	37
3.1 Introdução	38
3.2 Material e Métodos	41
3.2.1 Amostragem e Caracterização do solo	41
3.2.2 Procedimento experimental e canais pré-formados	42
3.2.3 Velocidade permissível	45
3.2.4 Taxa de erosão e desprendimento pelo fluxo concentrado em solo coesivo	46
3.2.5 Ensaios de mecânica do solo	47
3.2.6 Análise estatística	48
3.3 Resultados e Discussão	49
3.3.1 Comportamento hidráulico de canal coesivo sob elevado fluxo do escoamento	49
3.3.2 Comportamento hidráulico dos canais coesivos para todos os níveis de fluxo aplicados	52

3.3.3 Parâmetros de resistência e velocidade permissível em canais coesivos	53
3.3.3.1 Resistência do canal e taxas de erosão em solo coesivo.....	53
3.3.3.2 Velocidade observada e velocidade permissível estimada pela equação de Mirtskhoulava e Manning.....	57
3.4 Conclusões.....	59
Agradecimentos	59
Referências	60
4 PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA MECÂNICA AO CISALHAMENTO DIRETO DE UM HORIZONTE Bt: SOB UMIDADE DE CAMPO E SATURADA.....	65
RESUMO	66
ABSTRACT	67
4.1 Introdução.....	68
4.2 Material e Métodos	70
4.2.1 Área de estudo	70
4.2.2 Amostragem de solo	71
4.2.3 Caracterização física e Carbono do solo.....	71
4.2.4 Ensaio de cisalhamento direto.....	71
4.2.5 Análise estatística	73
4.3 Resultados e Discussão.....	73
4.3.1 Caracterização do solo.....	73
4.3.2 Parâmetros de cisalhamento	74
4.3.3 Análise multivariada.....	80
4.3.3.1 Matriz de correlação	80
4.3.3.2 Análise de agrupamento (AA).....	81
4.3.3.3 Análise de componentes principais (ACP).....	83
4.3.4 Conclusões.....	86

Agradecimentos	86
Referências	87
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	89

Velocidade crítica do escoamento superficial concentrado e resistência mecânica ao cisalhamento direto em Argissolo

RESUMO

Em obras agrícolas de contenção da erosão hídrica, como os terraços agrícolas, a velocidade do escoamento é calculada tanto para solos de textura arenosa quanto para solos de textura argilosa unicamente por metodologias desenvolvidas para solos arenosos, como a equação de Manning, o que tem subestimado a velocidade de escoamento. Objetivou-se com o presente estudo validar a equação de velocidade crítica de Mirtskhoulava (1966b) para condição de escoamento superficial concentrado em sulcos de erosão pré-formados sobre horizonte com textura argilosa e com a obtenção da coesão do solo por meio de cisalhamento direto; avaliou-se também a resistência ao cisalhamento do solo por meio das envoltórias de cisalhamento em amostras de um horizonte Bt sob umidade de campo e saturada aplicando-se técnicas de estatística multivariada. Os testes foram realizados em 16 canais pré-formados sobre o horizonte Bt do Argissolo com elevado teor de argila e foram aplicados 5 níveis de fluxo. Foram realizadas as seguintes análises e determinações: granulometria do solo, densidade do solo e partículas, taxa de desagregação de solo, erodibilidade do solo, perda de solo, rugosidade do solo, tensão cisalhante do fluxo, ensaios de cisalhamento direto e velocidade permissível. Para a realização dos ensaios de cisalhamento direto foram coletadas 32 amostras com estrutura preservada para obtenção dos parâmetros de coesão e ângulo de atrito interno em um aparelho de cisalhamento direto com velocidade de deslocamento constante de $0,125 \text{ mm min}^{-1}$. A tensão de cisalhamento gerada pelo fluxo aplicado (35-78 Pa) não foi suficiente para atingir a tensão crítica de cisalhamento do solo (103,60 Pa) nos canais e dar início ao processo erosivo nos canais. A equação de Manning demonstrou-se ineficiente para estimar a velocidade permissível quando comparada à equação de Mirtskhoulava, enquanto que a presença de parâmetros relacionados às características coesivas do solo na equação de Mirtskhoulava forneceu maior exatidão nas estimativas das velocidades permissíveis. As tensões cisalhantes foram maiores para a condição de umidade de campo, enquanto que para a condição saturada o oposto foi verificado. A partir da utilização da multivariada foi possível detectar a importância da fração silte no cisalhamento das amostras em condição de saturação.

Palavras-chave: Erodibilidade. Tensão de cisalhamento. Coesão do solo.

Critical velocity of the concentrated surface flow and mechanical resistance to direct shear in Ultisol

ABSTRACT

In agricultural works containing water erosion, such as agricultural terraces, the flow velocity is calculated for both sandy texture soils and clayey soils only by methodologies developed for sandy soils, such as the Manning equation, which has underestimated the flow velocity. The objective of this study was to validate the Mirtskhoulava (1966b) critical velocity equation for the condition of concentrated runoff in preformed erosion channels over a clayey textured horizon and to obtain soil cohesion by direct shear; it was also evaluated the shear strength of the soil by means of the shear envelopes in samples of a Bt horizon under field moisture and saturated using multivariate statistical techniques. The tests were performed in 16 preformed channels on the Bt horizon of the Ultisol with high clay content and 5 flow levels were applied. The following analyzes and determinations were carried out: soil granulometry, soil and particle density, soil detachment rate, soil erodibility, soil loss, soil roughness, flow shear stress, direct shear tests and permissible velocity. For the direct shear tests, 32 samples with a preserved structure were obtained to obtain the cohesion parameters and internal friction angle in a direct shear apparatus with a constant displacement velocity of $0.125 \text{ mm min}^{-1}$. The shear stress generated by the applied flux (35-78 Pa) was not sufficient to reach the critical shear stress of the soil (103,60 Pa) in the channels and to initiate the erosive process in the channels. The Manning equation proved to be inefficient to estimate the permissible velocity when compared to the Mirtskhoulava equation, while the presence of parameters related to the cohesive characteristics of the soil in the Mirtskhoulava equation provided greater accuracy in the allowable velocity estimates. The shear stresses were higher for the field moisture condition, whereas for the saturated condition the opposite was verified. From the use of the multivariate, it was possible to detect the importance of the silt fraction in the shear of the samples under saturation condition.

Key-words: Soil erodibility. Shear stress. Soil cohesion.

1 INTRODUÇÃO GERAL

O manejo do solo e as práticas conservacionistas a muito tempo são negligenciados pela pesquisa mundial e brasileira. Estudos recentes apontam que cerca de bilhões de toneladas de solo são perdidas anualmente, reduzindo significativamente a produtividade das culturas e capacidade de armazenar carbono, nutrientes e água.

Tratando-se do cenário nacional, existe um panorama preocupante com elevado percentual dos solos degradados, com baixa fertilidade, apresentando acidez elevada ou salinidade e com baixo teor de material orgânico. Sendo reflexo da não adoção de práticas de conservação do solo e água, além do comum plantio morro abaixo que ocasiona a perda do horizonte superficial do solo, fundamental para o bom desenvolvimento dos cultivos agrícolas e plantas em geral.

Os terraços agrícolas fazem parte de um grupo de práticas de conservação do solo de caráter mecânico. Embora tenham um custo relativamente elevado, possuem uma alta eficiência no controle da velocidade da enxurrada oriunda de eventos chuvosos e com isso controlam ou retardam o processo erosivo. Quando construídos em desnível possuem um canal escoadouro que recebe toda enxurrada concentrada e a direciona com cuidado para outra área.

Os canais escoadouros são dimensionados de forma a permitir o escoamento superficial da água de forma segura, sem ocorrer erosão e apresentam um declive. Para tal, deve-se determinar a velocidade máxima que a enxurrada pode admitir naquela condição de declive e tipo de solo, levando-se em consideração a textura, porosidade, taxa de infiltração de água no solo, entre outras características. Apesar disso, comumente é utilizada a equação de Manning para a predição da velocidade permissível nos canais escoadouros, sem considerar a textura do solo.

Sabendo-se que os solos variam muito em sua resistência mecânica aos processos erosivos com a alteração da classe textural, é de suma importância levar esta propriedade em consideração ao dimensionar projetos agrícolas que visem mitigar os processos erosivos. Diferente dos solos com elevado percentual de areia, os solos coesivos (ou argilosos) têm como característica principal o parâmetro da coesão entre suas partículas, que lhes confere uma elevada resistência aos processos erosivos.

Para solos argilosos, a utilização de equações que não consideram a sua peculiar coesão, pode causar uma subestimação da velocidade permissível nos canais escoadouros. O principal fator que leva a tal negligência é a dificuldade de aquisição do parâmetro coesão e a falta de

estudos que contemplem estes solos coesivos e que apliquem as equações já existentes de velocidade permissível.

Um dos meios utilizados para aquisição do parâmetro coesão dos solos é por meio da utilização de ensaios de cisalhamento direto, em que amostras de solo são confinadas numa caixa de cisalhamento, sob uma determinada velocidade e uma tensão normal aplicada durante os testes. Poucos estudos são realizados utilizando o cisalhamento direto, principalmente no nordeste brasileiro, deixando uma importante lacuna a ser explorada.

A resistência do solo ao cisalhamento varia com diversas propriedades: porosidade, textura, densidade do solo, teor inicial de água, teor de material orgânico e o grau de decomposição deste, etc. Portanto, há uma necessidade de estudos que abordem a correlação destas variáveis e sua importância relativa para o parâmetro coesão do solo.

Neste sentido, as técnicas de estatística multivariada têm muito a contribuir por possibilitarem o trabalho com múltiplas variáveis e avaliação da interdependência entre estas, facilitando o entendimento desta complexa relação, e, portanto, fornecendo melhores resultados do fenômeno em questão.

1.1 Hipóteses

- i. A equação de Mirskhoulava (1966b) apresenta um melhor ajuste da velocidade crítica para solos argilosos pois leva em consideração propriedades intrínsecas destes solos que são determinantes na sua resistência à ação cisalhante do escoamento, como a coesão do solo;
- ii. Os solos que apresentam maior valor de coesão apresentarão uma maior velocidade crítica do escoamento, uma vez que a coesão do solo na condição de saturação é a principal característica que exerce influência na resistência do solo à ação cisalhante do escoamento;
- iii. A tensão crítica de cisalhamento do solo (τ_{cr}) será positivamente influenciada pelo teor de carbono na forma orgânica, densidade do solo e porosidade total do solo, já que estes parâmetros são muito influentes na erodibilidade do solo;
- iv. O teor de carbono na forma orgânica irá influenciar a coesão e ângulo de atrito interno das partículas do solo e, conseqüentemente, na sua resistência ao cisalhamento direto, devido ao seu efeito na agregação do solo.

1.2 Objetivo geral

Validar a equação de velocidade crítica de Mirtskhoulava (1966b) para condição de escoamento superficial concentrado em sulcos de erosão pré-formados sobre horizonte com textura argilosa e com a obtenção da coesão do solo por meio de cisalhamento direto.

1.3 Objetivos específicos

1. Determinar a velocidade do escoamento superficial concentrado em sulcos de erosão pré-formados sobre o horizonte Bt de textura argilosa do Argissolo;
2. Determinar a tensão crítica de cisalhamento (τ_{cr}) no horizonte Bt de um Argissolo;
3. Determinar a velocidade crítica do escoamento superficial concentrado em sulcos de erosão pré-formados a partir da tensão crítica de cisalhamento do solo (τ_{cr}), obtida pelo ajuste entre as taxas de desagregação e tensões de cisalhamento do escoamento (τ) obtidas sobre o solo;
4. Desenvolver relações entre as vazões, velocidades e tensões de cisalhamento (τ_f) dos escoamentos superficiais que foram submetidas aos ensaios, para determinação do valor de velocidade crítica;
5. Avaliar as relações existentes da τ_{cr} com as propriedades físicas (densidade do solo, porosidade total e textura);

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As práticas conservacionistas, no geral, reduzem a erosão e por isso mantêm boa estrutura da superfície do solo. Nem sempre as práticas edáficas e vegetativas são suficientes para o controle da erosão, principalmente em regiões em que ocorrem chuvas de grande intensidade. Nesse caso, é necessária a adoção de procedimentos complementares, como as práticas de caráter mecânico, que utilizam estruturas artificiais para a redução da velocidade do escoamento da água sobre a superfície do terreno, fazendo com que este seja interceptado e não atinja energia suficiente para ocasionar perdas de solo acima dos limites toleráveis. O plantio em contorno e o terraceamento estão entre as práticas mecânicas mais utilizadas e tem por objetivo reduzir a erosão laminar e aumentar a retenção de água no solo (MORGAN, 2005; PRUSKI, 2009).

Quando são usados sistemas de terraceamento com gradiente, para proporcionar a drenagem segura dos excessos de enxurrada, é necessário o estabelecimento de canais escoadouros, sendo caracterizados por dimensões apropriadas, presença de vegetação e capazes de transportar com segurança a enxurrada. A velocidade do fluxo da água em um canal aumenta, não apenas pelo incremento da declividade do canal, mas também com o aumento da espessura da lâmina de água e decréscimo da rugosidade do canal. A velocidade deve ser determinada de forma a considerar a erodibilidade do solo em que está sendo construído o canal e pelo tipo de condição da vegetação (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2010).

Em obras agrícolas de contenção da erosão hídrica, como os terraços agrícolas, a velocidade do escoamento é calculada tanto para solos de textura arenosa quanto para solos de textura argilosa unicamente por metodologias desenvolvidas para solos arenosos, como a equação de Manning, por exemplo (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2010; PRUSKI, 2009). A ampla utilização da equação de Manning (1891) para a verificação da velocidade em canais, sem levar em consideração a diversidade de textura dos solos, está subestimando a velocidade do escoamento, uma vez que esta foi desenvolvida para solos predominantemente arenosos.

De acordo com Mirtskhoulava (1997), a ausência de manuais para velocidade não erodível, ou crítica, em canais com sedimentos coesivos, frequentemente resulta em superestimação e superdimensionamentos de canais, das taxas de erosão e dos danos causados por esta. Na visão de Raudkivi (1990) parâmetros relacionados com a mecânica do solo (tamanho de grãos, conteúdo de argila, limites de Atterberg, força tênsil e cisalhante, entre outros) são os mais utilizados para o uso empírico e preditivo de velocidades permissíveis em

solos. Nesse contexto, diversos pesquisadores desenvolveram métodos e equações para a predição de velocidades permissíveis, como Fortier e Scobey (1926), Mavis (1935), Garbrecht (1961), Carstens (1966), Mirtskhoulava (1966a), Neill (1967), entre outros.

No entanto, todas essas equações foram desenvolvidas para solos de caráter não coesivo, ou seja, solos arenosos. Considerado essa carência, Mirtskhoulava (1966b) propôs uma equação para determinação da velocidade permissível em solos argilosos, baseada no método na velocidade crítica do escoamento superficial concentrado, com a seguinte forma:

$$V = \log_{10} \frac{8,8R_H}{d} \sqrt{\frac{2gm}{2,6\gamma n'} [(\gamma_p - \gamma)d + 1,25C_f K]}, \quad (1)$$

sendo V a velocidade permissível ($m s^{-1}$); R_h o raio hidráulico (m); d o diâmetro característico das partículas do solo (D_{50} , em mm); g a aceleração da gravidade ($m s^{-2}$); m o coeficiente de trabalhabilidade, que leva em consideração a influência de diferentes fatores nas condições operantes, usualmente é considerado igual a 1 para solos recém preparados; γ e γ_p são respectivamente o peso específico da água e sedimento ($t m^{-3}$); n' o coeficiente de sobrecarga, promovido pelas variações de velocidade, calculado em função do diâmetro característico do sedimento (D_{50}) utilizando-se a equação

$$n' = 1 + \frac{d}{0,00005 + 0,3d}; \quad (2)$$

C_f é o valor da coesão na ruptura (Pa), no limite de fraqueza, determinado por meio da equação:

$$C_f = 0,035C, \quad (3)$$

sendo C o coeficiente de coesão média (Pa), determinado por meio de ensaios de cisalhamento direto; K é um coeficiente de homogeneidade de teor de argila, diz respeito ao desvio dos valores de coesão dos seus valores médios (admite valores de 0 a 1) e é determinado pela equação:

$$K = 1 - \frac{\alpha' \sigma}{C}, \quad (4)$$

sendo α' o coeficiente caracterizando a probabilidade de uma mínima resistência do solo (usualmente é igual a 3) e σ o desvio padrão.

Entretanto, a principal dificuldade encontrada para a aplicação da equação proposta por Mirtskhoulava (1966b) é a determinação do coeficiente de coesão média do solo (C) que varia entre os diferentes solos.

Os mecanismos que determinam a resistência de solos argilosos têm demonstrado que a coesão na condição de solo saturado, dentre muitas outras propriedades físicas e químicas, é considerada como a mais importante para a resistência do solo à ação cisalhante da água em escoamento, expressando o efeito da composição mineralógica e o arranjo estrutural dos minerais de argila (MIRTSKHOULAVA, 1981).

O movimento inicial das partículas no leito de canais, frequentemente chamado de condição crítica de movimento inicial, pode ser explicado por várias maneiras (GRAF, 1984):

1. Por meio de equações de velocidade crítica - considerando o impacto do líquido sobre as partículas;
2. Com equações de tensão de cisalhamento crítico - considerando o arraste do fluxo sobre as partículas;
3. Ou pelo critério da força de elevação - considerando as diferenças de pressão devidas ao gradiente de velocidade.

Portanto, as equações de velocidade crítica permite-nos determinar o mais alto valor da velocidade média do fluxo sem erosão do canal (desprendimento de partículas sólidas), o que seria inadmissível para uma operação normal (MIRTSKHOULAVA, 1997). Para Mikhnevich (1989) as equações existentes apresentam deficiências em comum. Não levam em consideração importantes características de resistência do solo, como o coeficiente de fricção interna, porosidade, entre outros. Isso é devido à forma de obtenção ou validação das equações, que são com base em resultados experimentais conduzidos em canais hidráulicos artificiais com paredes rígidas, de forma a caracterizar a estabilidade do fundo dos canais.

Conforme relatado por Sekine e Nishimori (2008), existe pouca informação disponível sobre as taxas de erosão em sedimentos coesivos (argilosos) pela velocidade do escoamento superficial, fazendo com que os mecanismos de erosão de sedimentos coesivos sejam ainda pouco elucidados, o que é devido à complexa ação que as forças coesivas exercem sob a superfície das partículas de argila.

2.1 Erosão em solos argilosos: fatores que controlam ou interferem

Diferente dos solos não argilosos onde o movimento incipiente e erosão por fluxo de água depende consideravelmente do diâmetro das partículas do solo, a erosão em solos argilosos depende de ambas as características de fluxo e de solo. As características dos solos argilosos são dependentes principalmente das suas propriedades físicas e químicas, que afetam a força de resistência contra à erosão (ARIATHURAI; ARULANANDAN, 1978; JAIN; KOTHYARI, 2009).

Solos argilosos são peculiares com relação aos seus processos heterogêneos que são devidos à sua gênese, composição mineralógica e subsequentes efeitos físico-químicos e processos biológicos. Portanto, para determinar a resistência destes solos à erosão, desde que sejam fornecidas as velocidades permissíveis, é muito importante conhecer as características de heterogeneidade e comportamento físico-químico da argila, as quais interferem no valor de coesão do solo (MIRTSKHOULAVA, 1966b).

A erosão causada pela velocidade do fluxo superficial depende do índice de coesão do solo no estado de total saturação por água e do tamanho dos agregados do solo. As forças de coesão do solo referem-se à atração entre partículas semelhantes, sejam sólidas ou líquidas, sendo resultantes de mecanismos físico-químicos, como forças de Van der Waals, atração eletrostática entre a superfície das partículas de argila, entre outros (AMARO FILHO; ASSIS JÚNIOR; MOTA, 2008; MIRTSKHOULAVA, 1975).

De acordo com Kothyari e Jain (2008), o peso dos sedimentos é o principal fator na resistência à erosão para sedimentos não coesivos; em sedimentos coesivos, as forças de atração entre as superfícies das partículas, interligação entre agregados e as forças eletroquímicas controlam a resistência à desagregação dos agregados. Estas forças variam com o tipo de argila, condição de umidade antecedente, tipo de cisalhamento aplicado e condições de drenagem.

A estimativa da erodibilidade em solos argilosos é importante para a avaliação do escoamento e das estruturas em volta, degradação de canais escoadouros, estabilidade das margens dos rios, das perdas de solos a partir de campos, e a estabilidade de taludes. A erodibilidade é tipicamente definida por dois parâmetros: a tensão crítica de cisalhamento, τ_{cr} , que é a tensão cisalhante criada pelo fluxo (τ_f) sobre a superfície do solo onde a erosão primeiramente ocorre; e o coeficiente de erodibilidade, K_r , que representa a relação entre a taxa de erosão de solo para o excesso de tensão de cisalhamento no leito, ou seja, a diferença entre

a tensão cisalhante criada pelo fluxo (τ_f) sobre a superfície do solo e a tensão crítica de cisalhamento do solo (τ_{cr}) (MAZUREK, 2010).

Para Brady e Weil (2013), duas características do solo têm efeito significativo e relacionado com a erodibilidade, sendo: (1) capacidade de infiltração e (2) estabilidade estrutural. Uma elevada taxa de infiltração significa menos água disponível para o escoamento superficial, diminuindo a possibilidade de a água ser empoçada.

Paaswell (1973) apresenta um completo trabalho de revisão sobre as causas e mecanismos da erosão de solos argilosos. O autor resume os principais fatores que influenciam na erodibilidade de leitos coesivos de canais:

- Características físicas: tipo de argilomineral, porcentagem de argila, limites de consistência e densidade;
- Características físico-químicas: capacidade de troca de cátions, razão de absorção de Sódio e propriedades do fluido dos poros;
- Propriedades mecânicas: resistência ao cisalhamento (superficial ou da massa de solo), coesão, tixotropia, propriedades de expansão e retração e
- Condições ambientais: ação do intemperismo, congelamento e degelo, história de tensões.

O transporte de sedimentos envolve uma complexa interação entre as várias variáveis inter-relacionadas. Tem sido prática comum assumir que a taxa de transporte de sedimentos, ou que a magnitude da concentração de sedimentos, pode ser largamente determinada por variáveis dominantes, como descarga líquida, a velocidade, o gradiente de energia, tensão de cisalhamento, a rugosidade relativa, o número de Froude, entre outros (SIMONS; SENTURK, 1992).

De acordo com Suwartha, Yamada e Shimomura (2006) quando a superfície dos solos argilosos se encontra em estado de saturação, as ligações entre as partículas do solo, conhecidas pela forte coesão, irão romper-se, o que resulta na redução da mesma. Consequentemente, inicia-se o processo erosivo, com a força cisalhante excedendo a tensão crítica de cisalhamento do solo. Ao avaliarem o efeito da umidade na força de coesão do solo, os autores puderam observar que à medida em que a umidade aumenta, a coesão do solo sofre uma redução exponencial.

2.2 Resistência do solo ao cisalhamento

Na mecânica de solo pode-se determinar a resistência do solo ao cisalhamento (τ) por meio da equação de Coulomb, em que se obtém também a coesão do solo:

$$\tau = C + \sigma_n \operatorname{tg} \phi, \quad (5)$$

sendo C o valor da coesão do solo (kPa), σ_n a tensão normal existente no plano de cisalhamento (kPa), $\operatorname{tg} \phi$ o coeficiente de atrito interno e ϕ é o ângulo de atrito interno entre as partículas do solo. Os parâmetros σ_n e ϕ dependem do tipo de teste de cisalhamento, condições de drenagem, taxa de aplicação da força cisalhante e do grau de saturação do solo. Para condição de solo seco, ϕ tende a aproximadamente zero e σ_n tem o seu maior valor, o oposto é evidenciado em uma situação de saturação (PARTHENIADES, 2009).

Uma vez que a susceptibilidade dos solos à erosão depende diretamente da força de coesão dos agentes cimentantes do solo, comumente utiliza-se o parâmetro da coesão para estimar a erodibilidade dos solos, uma vez que diferenças na susceptibilidade natural dos solos à erosão são difíceis de serem quantificadas em observações de campo e medidas diretas do fator erodibilidade são onerosas e consomem muito tempo (HANSON, 1996; NACINOVIC; MAHLER; AVELAR, 2014; WISCHMEIER; SMITH, 1978).

A resistência ao cisalhamento de um solo pode ser definida como a máxima tensão de cisalhamento que o solo pode suportar sem sofrer ruptura (cisalhar), ou a tensão de cisalhamento do solo no plano em que a ruptura estiver ocorrendo. A análise do estado de tensões que provoca a ruptura é o estudo da resistência ao cisalhamento dos solos e sofre influência do atrito interno entre as partículas e a coesão destas. Os critérios de ruptura que melhor representam o comportamento dos solos são os de Coulomb e de Mohr (PINTO, 2006).

Na realização do ensaio de cisalhamento direto um corpo de prova do solo é colocado parcialmente numa caixa de cisalhamento, ficando com sua metade superior dentro da caixa bipartida, como é mostrado esquematicamente na Figura 1. Uma força vertical N e uma força tangencial T são aplicadas na caixa que contém a parte superior do corpo de prova, provocando o seu deslocamento, onde é medida a força suportada pelo solo. As forças N e T , divididas pela área da seção transversal do corpo de prova, indicam σ_n e τ_{cr} que nele estão ocorrendo, conforme equações 6 e 7, respectivamente. A força T provoca o deslocamento com velocidade constante na metade do corpo de prova, cuja resistência oferecida pela outra metade é registrada por leitura no relógio comparador do anel dinamométrico. Dessa forma determina-se para cada N

aplicada à superfície de deslizamento, o valor da força T necessária para provocar a deformação contínua do solo até a ruptura do corpo de prova (LAMBE, 1951; PINTO, 2006).

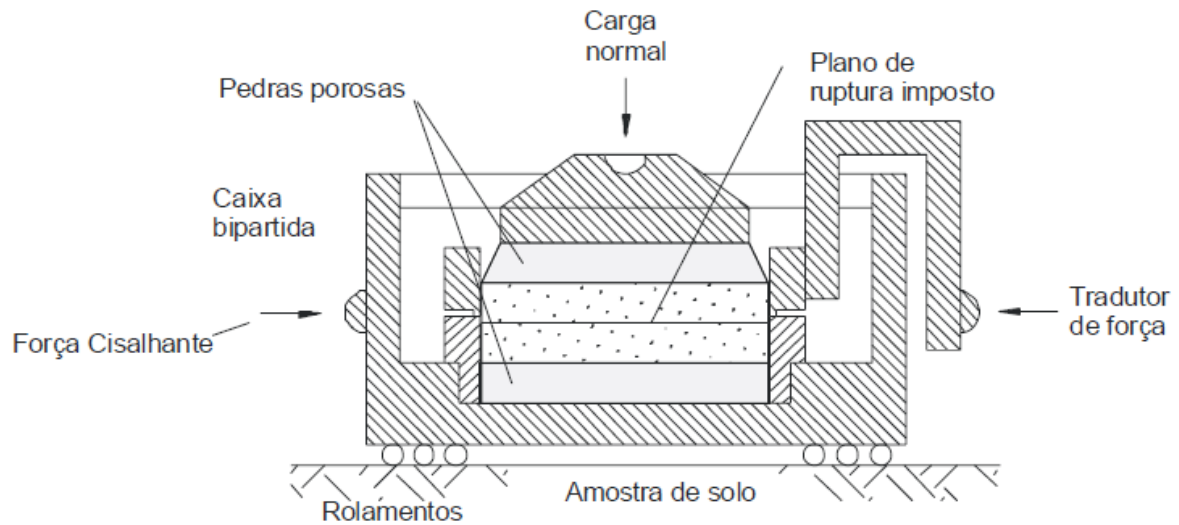


Figura 1. Detalhes da caixa de cisalhamento presente no equipamento utilizado para os ensaios de cisalhamento direto (ORTIGÃO, 2007).

Os ensaios consistem em duas fases: a primeira quando ocorre a aplicação da tensão normal (N), onde as condições serão equivalentes às do ensaio oedométrico, pois não se permitirá a deformação lateral (ORTIGÃO, 2007); na segunda fase, impõe-se na parte superior da caixa, uma velocidade constante de deslocamento, provocando o aparecimento de uma força tangencial (T) na parte que é mantida imóvel durante o ensaio. A força lateral é obtida por meio do anel dinamométrico que permite a medição da carga aplicada. Extensômetros permitem medir os deslocamentos verticais e horizontais durante o ensaio e, assim, no término das duas, fases teremos obtidos os dados para preencher os requisitos das seguintes equações:

$$\sigma_n = \frac{N}{a}, \quad (6)$$

sendo σ_n a tensão normal (kPa), N a força normal aplicada no corpo de prova e a a área da seção transversal da amostra (m^2); e

$$\tau_c = \frac{T}{a}, \quad (7)$$

sendo τ_c a tensão de cisalhamento ($kgf\ cm^2$, kPa), T a força aplicada no corpo de prova e a a área da seção transversal da amostra ($kgf\ cm^2$, kPa).

A resistência do solo ao cisalhamento é influenciada pelo manejo e propriedades que controlam o desenvolvimento das plantas, desenvolvimento radicular e relações hídricas do solo. A importância dos parâmetros texturais e estruturais sob a resistência é moderada pela concentração de carbono orgânico do solo. O efeito da matéria orgânica no solo está relacionado com a redução da densidade e com o aumento da capacidade de retenção de água pelo solo, ambos atuando na redução da resistência do solo ao cisalhamento. Apesar disso, o incremento de matéria orgânica também possa aumentar as ligações entre as partículas do solo dentro dos agregados (BLANCO-CANQUI et al., 2005; EKWUE, 1990; WUDDIVIRA; STONE; EKWUE, 2013).

Referências

- AMARO FILHO, J.; ASSIS JÚNIOR, R. N. DE; MOTA, J. C. A. **Física do Solo - Conceitos e Aplicações**. 1a ed. Fortaleza: Imprensa Universitária - UFC, 2008.
- ARIATHURAI, R.; ARULANANDAN, K. Erosion rates of cohesive soils. **Journal of the Hydraulics Division**, New York, v. 104, n. 2, p. 279–283, 1978.
- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do Solo**. 7o ed. São Paulo: Ícone, 2010.
- BLANCO-CANQUI, H.; LAL, R.; OWENS, L. B.; POST, W. M.; IZAURRALDE, R. C. Strength Properties and Organic Carbon of Soils in the North Appalachian Region. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 69, n. 3, p. 663, 2005.
- BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **Elementos da natureza e propriedades dos solos**. 3o ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.
- CARSTENS, M. R. An analytical and experimental study of bed ripples under wake waves. p.1–29, 1966. Atlanta: Georgia Institute of Technology, School of Civil Engineering.
- EKWUE, E. I. Organic-matter effects on soil strength properties. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 16, n. 3, p. 289–297, 1990.
- FORTIER, S.; SCOBAY, F. C. Permissible canal velocities. **Transactions of the American Society of Civil Engineers**, New York, v. 89, n. 1, p. 940–956, 1926.
- GARBRECHT, G. Erfahrungswerte über die zulässigen Strömungsgeschwindigkeiten in Flüssen und Kanälen. **Wasser und Boden**, Allgemeinen, v. 5, 1961.
- GRAF, W. H. **Hydraulics of Sediment Transport**. Colorado: Water Resources Publications, 1984.
- HANSON, G. J. Investigating Soil Strength and Stress-strain Indices to Characterize Erodibility. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 39, n. 3, p. 883–890, 1996. American Society of Agricultural Engineers.
- JAIN, R. K.; KOTHYARI, U. C. Cohesion influences on erosion and bed load transport. **Water Resources Research**, Washington, v. 45, n. 6, p. 1–17, 2009.
- KOTHYARI, U. C.; JAIN, R. K. Influence of cohesion on the incipient motion condition of sediment mixtures. **Water Resources Research**, Washington, v. 44, n. 4, p. n/a-n/a, 2008.
- LAMBE, T. W. **Soil testing for engineers**. New York: John Wiley, 1951.
- MANNING, R. On the flow of water in open channels and pipes. **Transactions of the Institute of Civil Engineers in Ireland**, Dublin, v. 20, p. 161–207, 1891.
- MAVIS, F. T. **Transportation of detritus by flowing water**. Iowa: University of Iowa Studies in Engineering. Bulletin. 5, 1935.

MAZUREK, K. A. Erodibility of a cohesive soil using a submerged circular turbulent impinging jet test. **2nd Joint Federal Interagency Conference**, p. 1–10, 2010. Las Vegas.

MIKHNEVICH, É. I. Determination of the permissible velocities in canals. **Hydrotechnical Construction**, *Gidrotekhnicheskoe*, v. 23, n. 1, p. 5–11, 1989.

MIRTSKHOULAVA, T. E. Studies on permissible velocities for soil and facings. **Central Water Research**, Poona, p. 333–341, 1966a.

MIRTSKHOULAVA, T. E. Erosional Stability Of Cohesive Soils. **Journal of Hydraulic Research**, Oxon, v. 4, n. 1, p. 37–50, 1966b.

MIRTSKHOULAVA, T. E. Prediction of erosion of cohesive soils. Fundamental tools to be used in environmental problems. **Anais...** . p.470–477, 1975. São Paulo: XVI Congress of the international Association for Hydraulic Research.

MIRTSKHOULAVA, T. E. Estimation of channel stability to scour in cohesive soils. In: T. Manthey (Org.); **Advances in sediment transport**. p.238–308, 1981. Jablonna, Poland: Polish Academy of Sciences.

MIRTSKHOULAVA, T. E. Erosion of cohesive materials. Study of erosion, river bed deformation and sediment transport in river basins as related to natural and man-made changes. **Anais...** . p.104–115, 1997. Paris: IHP-V, Technical Documents in Hidrology.

MORGAN, R. P. C. **Soil erosion and conservation**. 3o ed. Victoria, Blackwell Publishing Ltd, 2005.

NACINOVIC, M. G. G.; MAHLER, C. F.; AVELAR, A. D. S. Soil erosion as a function of different agricultural land use in Rio de Janeiro. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 144, p. 164–173, 2014.

NEILL, C. R. Mean velocity criterion for scour of coarse uniform bed material. 12th Congress IAHR. **Anais...** . p.46–54, 1967. Fort Collins.

ORTIGÃO, J. A. R. **Introdução à mecânica dos solos dos estados críticos**. 3o ed. Rio de Janeiro: Terratek, 2007.

PAASWELL, R. E. Causes and mechanisms of cohesive soil erosion: The state of the art. Highway Research Board Special Report: Conference-Workshop on Soil Erosion. **Anais...** . p.52–74, 1973. Washington District of Columbia: Highway Research Board.

PARTHENIADES, E. **Cohesive Sediments in Open Channels: Properties, Transport and Applications**. 1o ed. United States of America: Elsevier, 2009.

PINTO, C. DE S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas**. 3a ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

PRUSKI, F. F. **Conservação do solo e água: práticas mecânicas para o controle da erosão**. 2o ed. Viçosa: UFV, 2009.

RAUDKIVI, A. J. **Loose Boundary Hidraulics**. 3o ed. São Paulo: Pergamin Press, 1990.

SEKINE, M.; NISHIMORI, K. Erosion rate of cohesive sediment by running water. **Fourth International Conference on Scour and Erosion**, Tokyo, p. 424–429, 2008.

SIMONS, D. B.; SENTURK, F. **Sediment transport technology: water and sediment dynamics**. Fort Collins, CO: Water Resources Publication, 1992.

SUWARTHA, N.; YAMADA, T.; SHIMOMURA, S. An Experimental Study on Cohesive Soil Erosion due to Overland Flow at the Steep Slope Field in the Mrica Watershed, Indonesia. **Disaster Mitigation of Debris Flows, Slope Failures and Landslides.**, n. 2001, p. 343–353, 2006.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. **Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning**. Agricultur ed. Washington: U.S. Department of Agriculture, 1978.

WUDDIVIRA, M. N.; STONE, R. J.; EKWUE, E. I. Influence of cohesive and disruptive forces on strength and erodibility of tropical soils. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 133, p. 40–48, 2013.

CAPÍTULO 01

3 EROSÃO PELO FLUXO CONCENTRADO E VELOCIDADE PERMISSÍVEL EM HORIZONTE BT DE UM ARGISSOLO

Erosão pelo fluxo concentrado e velocidade permissível em horizonte Bt de um Argissolo

RESUMO

O fluxo concentrado significa água do escoamento de eventos chuvosos que flui sob o solo em uma característica geomórfica de paisagem confinada e, nessa condição, as taxas de desprendimento e erosão por fluxo geram um esforço efetivo de cisalhamento que podem ser significativas. O desprendimento de sedimentos coesivos é tipicamente modelado para estruturas hidráulicas, como canais, vertedouros, barragens de terra e terraços agrícolas. Em canais coesivos, as forças que controlam a resistência à erosão e ao desprendimento ainda não são completamente compreendidas, de modo que o objetivo neste presente estudo é avaliar os parâmetros de resistência à erosão, como a coesão, a erosão do solo e o esforço crítico de cisalhamento de um horizonte de solo coesivo pelo fluxo concentrado e usá-los para dar suporte a estimativas de velocidades admissíveis. Assim, para atingir os objetivos foram canais pré-formados em um horizonte Bt de um Argissolo, firmados adicionados nestes canais diferentes níveis de fluxo para avaliar o estresse crítico do cisalhamento, a erosão do solo e o desprendimento do solo nesses canais. Além disso, foram retiradas amostras de solo preservadas e não preservadas no fundo dos canais para obter resistência ao cisalhamento direto e a coesão do solo. As taxas de desagregação do solo foram inversamente proporcionais ao estresse de cisalhamento aplicado; a tensão crítica de cisalhamento obtida e a erodibilidade do solo foram elevadas, 110,8 e 0,04 kg N⁻¹ s⁻¹, respectivamente. Essas descobertas mostram que a tensão de cisalhamento gerado pelo fluxo aplicado ainda não foi suficiente para atingir a tensão crítica de cisalhamento desses canais coesivos. A coesão e a falha do solo indicadas pela tensão de cisalhamento direto foram menores do que a tensão crítica de cisalhamento. No entanto, esses resultados não permitem uma conclusão definitiva pelo uso da equação de Mirstkulava na velocidade permitida em canais coesivos.

Palavras-chave: Cisalhamento coesivo. Erodibilidade. Resistência ao cisalhamento. Tensão de cisalhamento crítico.

Erosion by concentrated flow and permissible velocity in Bt horizon of an Ultisol

ABSTRACT

Concentrated flow means water from storm runoff flowing on the soil in confined landscape geomorphic feature, and in this condition the detachment and erosion rates by flow generates effective shear stress can be significant. Cohesive sediment detachment is typically modeled for hydraulic structures, such channels, spillways, earthen dams and agricultural terraces. On cohesive beds the forces control the resistance to erosion and detachment are not yet understood completely, so the objective in this present is to evaluate resistance parameters to erosion, such cohesion, soil erodibility and critical shear stress of a highly cohesive soil horizon by concentrated flow and use them to support estimative permissible velocities flow in cohesive soil conditions. Thus, to achieve the objectives were pre-formed channels on a highly cohesive B Ultisol horizon, and added on this channels different flow levels to evaluate the critical shear stress, soil erodibility and soil detachment on this highly cohesive channels. Also, disturbed and undisturbed soil samples were collected on the bed cohesive channels to obtain resistance to direct shear stress and soil cohesion. The Soil detachment rates were inversely proportional to the applied shear stress, and the obtained critical shear stress and soil erodibility were so high, 110.8 and 0.04 kg N⁻¹ s⁻¹ respectively. These findings show that the shear stress generated by applied flow were not yet sufficient to achieve the critical shear stress of this cohesive channels. The cohesion and the soil failure indicated by direct shear stress were lower than the critical shear stress, also indicating that the applied flow were not yet sufficient to cause soil fail on this cohesive channels. However, this results do not allow a definitive conclusion by the use of the Mirstkulava's equation to permissible velocity on cohesive channels.

Keywords: Cohesive shear stress. Soil erodibility. Soil resistance to direct shear stress. Critical shear stress.

3.1 Introdução

Quando o fluxo de água sobre o solo torna-se concentrado, mesmo em condições onde as taxas de erosão tendem a ser relativamente baixas, a perda de solo pode ser significativa. Portanto, mesmo áreas com boa cobertura vegetal podem ser vulneráveis à erosão do solo e, com a concentração do fluxo superficial, este exercerá um maior risco ao cisalhamento das partículas sólidas do solo. Este conceito é comumente aplicado à modelagem de erosão de solo em áreas de florestas e áreas cultivadas, utilizando predições da tensão efetiva de cisalhamento do fluxo aplicado sobre as partículas do solo (AL-HAMDAN et al., 2013).

O fluxo concentrado é caracterizado como o escoamento de água a partir de eventos chuvosos seguindo falhas geomorfológicas como sulcos, canais ou rios. De Baets et al. (2006) relatam que na última década do século XX, significantes avanços ocorreram no entendimento da erosão por fluxo concentrado e seu comportamento hidráulico sobre diferentes condições ambientais que podem resultar na formação de voçorocas e ravinas.

O processo de erosão em canais é característico de canais existentes em solos coesivos. Esse tipo de deformação ocorre ao longo do tempo e geralmente engloba vários trechos. Neste caso, a capacidade de transporte não é totalmente realizada, e os sedimentos em excesso não desempenham uma função importante na própria formação do canal, como é observado em canais de solos arenosos, por exemplo (ALIEV, 1985).

A desagregação do sedimento coesivo é comumente modelada para canais, diques, vertedouros, barragens e erosão interna, utilizando uma abordagem linear de excesso de cisalhamento. Muitas questões relacionadas com a gestão da água, incluindo a degradação dos canais de rios, a estabilidade de bancos, a escavação de pontes, a erosão de barragens, a erosão de vertedouro de terra e a sobreposição de diques e barragens de barro, decorrem de erosão excessiva de solos coesivos. Portanto, a capacidade de prever com precisão a erosão em solos coesivos é uma necessidade significativa para os engenheiros de todo o mundo (KHANAL et al., 2016).

Sedimentos coesivos são compostos por pequenas partículas contendo elevada área específica (área por unidade de volume de partícula). Suas forças físico-químicas de superfície são muito mais importantes que o peso das partículas. As forças físico-químicas incluem as forças atrativas de van der Waals e outras forças de ligação, tais como pontes de hidrogênio, ligações catiônicas, cimentação química entre partículas por vários compostos e forças de interação de dupla camada e partículas no meio de argila-água. Estas forças ainda não são

totalmente compreendidas, pois variam com o grau de saturação, tipo de aplicação de cisalhamento, condições de drenagem, porcentagem de argila e o tipo de material coesivo (ANSARI; KOTHYARI; RAJU, 2003).

Para sedimentos não coesivos a resistência à erosão é conferida pelo peso do sedimento submerso, já em sedimentos coesivos, a rede de forças de interação de superfície inter-partículas, o bloqueio de fricção dos grãos agregados e as forças eletroquímicas controlam a resistência à desagregação e erosão. Estas forças variam com o tipo de argila, condição de umidade antecedente, tipo de cisalhamento aplicado e condições de drenagem (ANSARI; KOTHYARI; RAJU, 2003). Os principais mecanismos que causam a movimentação dos sedimentos no fluxo de água são a velocidade do fluxo e cisalhamento, e a tensão normal, resultante da turbulência do fluxo (JAIN; KOTHYARI, 2009).

Existe pouca informação disponível sobre a taxa de erosão em sedimentos coesivos pelo escoamento da água, e os mecanismos da erosão de sedimentos coesivos não são totalmente conhecidos ainda. Pesquisadores afirmam que isto é devido ao complicado mecanismo que as forças coesivas exercem na superfície das partículas das argilas e a combinação entre essas. Do ponto de vista da engenharia, o conhecimento do quanto o sedimento coesivo depositado pode ser removido durante uma dada força cisalhante torna-se mais importante quando consideramos um manejo efetivo das estruturas dos rios ou de uma barragem. O conhecimento também é indispensável para discutir a cerca de geometria dos canais estáveis que são formados principalmente por sedimentos coesivos (SEKINE et al., 2008).

Em obras agrícolas de contenção da erosão hídrica, como os terraços agrícolas, a velocidade do escoamento é calculada tanto para solos de textura arenosa quanto para solos de textura argilosa unicamente por metodologias desenvolvidas para solos arenosos, como a equação de Manning, por exemplo (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2010; PRUSKI, 2009). A ampla utilização da equação de Manning (1891) para a verificação da velocidade em canais, sem levar em consideração a diversidade de textura dos solos, tem subestimado a velocidade de escoamento, uma vez que esta foi desenvolvida para solos predominantemente arenosos.

Neste sentido, a erosão é um dos elementos menos confiável de muitos projetos hidráulicos. Portanto, a descrição da erosão e predição de velocidades permissíveis é um dos problemas mais importantes da hidráulica e da morfologia de rios. A argila é a fração mais difundida dentro de todo o complexo de deposição sedimentar na natureza. Elas compõem cerca de 65 a 82% da espessura total das camadas sedimentares da crosta terrestre e ocorrem em

depósitos de diferentes idades. As propriedades físico-mecânicas das argilas dependem fortemente da sua composição granulométrica, mineralógica e química. No entanto, até agora as relações quantitativas diretas entre índices físico-mecânicos e propriedades mineralógicas não foram estabelecidas. As argilas interagem vigorosamente com a água, que tem um efeito importante sobre a condição e as suas propriedades. Devido à coesão, a avaliação da resistência dos solos coesivos é mais complexa que nos solos não coesivos, em que a resistência desses depende principalmente do peso da partícula (MIRTSKHOULAVA, 1991).

Desta forma, Graf (1984) afirma que a relação para a tensão de cisalhamento em material coesivo pode ser descrita como

$$\frac{\tau_0}{(y_p - y_s)d} = A_1'' + C_0, \quad (1)$$

sendo τ_0 a tensão cisalhante do solo, y_p e y_s são respectivamente peso específico do sedimento e do solo ($t\ m^{-3}$), d é o diâmetro médio da partícula (mm), A_1'' é o coeficiente do sedimento e C_0 é o coeficiente de coesão do material (kPa). Para materiais onde as forças coesivas são muito maiores que outras forças, o coeficiente A_1'' pode ser omitido. Mas, na prática da mecânica de solo, a tensão cisalhante do solo correspondente à falha pode ser descrita aproximadamente por

$$\tau = C + \sigma_n \operatorname{tg} \phi, \quad (2)$$

em que τ é a força cisalhante ou a resistência ao cisalhamento (kPa), C é a coesão (kPa), σ_n é a tensão normal efetiva (kPa), ϕ o ângulo do atrito interno entre as partículas do solo (graus) e $\operatorname{tg} \phi$ o coeficiente de atrito (graus). Esta equação é conhecida como equação de *Coulomb* e é similar à equação 1.

A coesão na condição de saturação, o tamanho da partícula dispersa e a estabilidade do solo em meio aquoso parecem ser as principais características entre o extenso complexo das propriedades físico-mecânicas e químicas dos solos coesivos. De forma geral, a resistência ao escoamento aumenta com o aumento da coesão, ocorrendo simultânea redução do conteúdo de água no solo (MIRTSKHOULAVA, 1996).

Considerando o exposto, o objetivo do presente trabalho foi avaliar parâmetros de resistência à erosão do horizonte Bt de um Argissolo, utilizando o fluxo concentrado de água, e utilizar tais parâmetros para dar suporte às estimativas de velocidades permissíveis do fluxo em condições de solos coesivos.

3.2 Material e Métodos

O estudo foi realizado na estação experimental da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), localizada na cidade de Carpina, estado do Pernambuco ($7^{\circ}51'13''\text{S}$, $35^{\circ}14'10''\text{W}$), com 180 m de altitude acima do mar (Figura 1). De acordo com a classificação de Köppen, o clima na área de estudo é do tipo Ams' , tropical chuvoso de monção com verão seco. De acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SANTOS et al., 2013), o solo da área de estudo foi classificado como Argissolo Vermelho Amarelo Tb Distrófico, A moderado, textura média/muito argilosa.

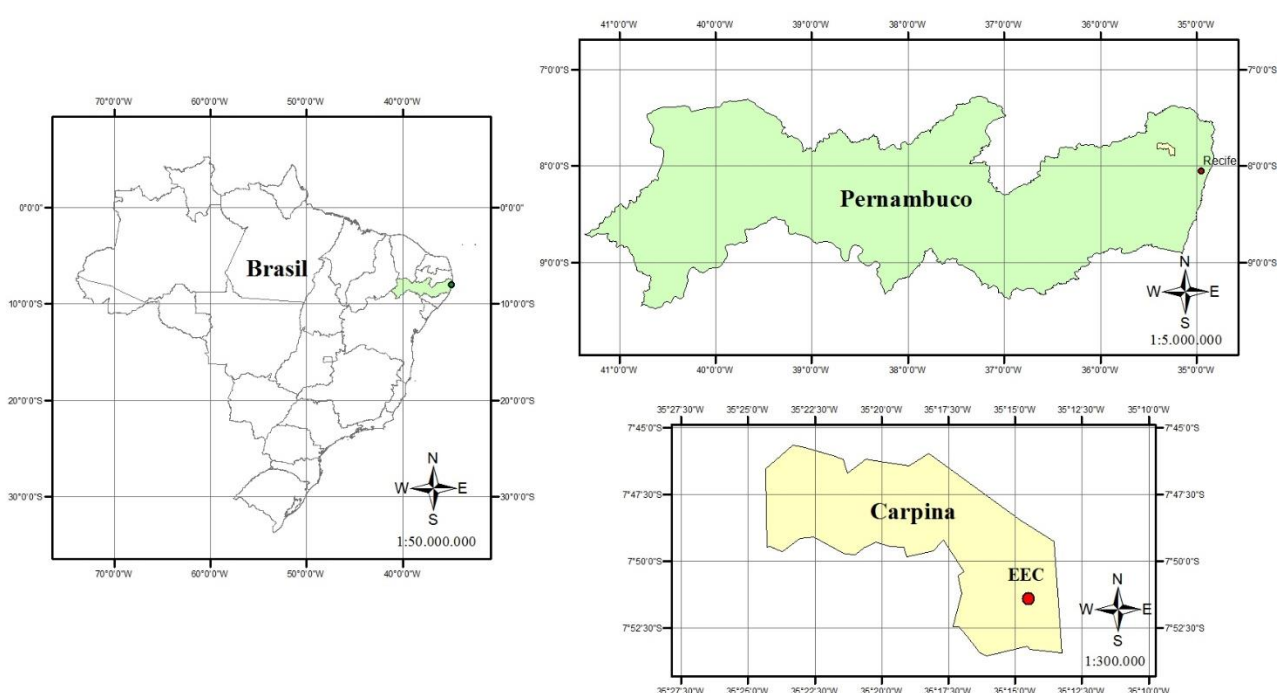


Figura 1. Localização da cidade de Carpina – PE e estação experimental de Carpina (EEC).

3.2.1 Amostragem e Caracterização do solo

Amostras de solo com estrutura não preservada foram coletadas no fundo dos canais antes de iniciarem os testes, secas ao ar e tamisadas em peneira com abertura de malha de 2 mm. Para fins de avaliação da resistência do solo ao cisalhamento (obtenção da coesão do solo) e alguns parâmetros físicos, foram coletadas 32 amostras de solo com estrutura preservada e dimensões retangulares (0,06 m x 0,06 m x 0,043 m) correspondentes à caixa do aparelho de

cisalhamento direto, que foram posteriormente envolvidas em plástico bolha e acondicionadas em caixas de isopor.

A caracterização granulométrica foi realizada adotando o método do hidrômetro (GEE; OR, 2002); as classes texturais foram determinadas seguindo a classificação do sistema brasileiro (SANTOS et al., 2013), Tabela 1. O carbono orgânico (CO) foi determinado pelo método da combustão via seca; a densidade do solo (ρ_s) foi determinada seguindo metodologia proposta por Grossman e Reinsch (2002); a densidade de partículas sólidas do solo (ρ_p) e a porosidade total (α) foram obtidas com base em Flint e Flint (2002). A Tabela 2 resume as análises físicas realizadas.

Tabela 1. Caracterização granulométrica e carbono orgânico do horizonte Bt

Tratamento	CO	Areia	Silte	Argila	Classificação textural
	%	----- g kg ⁻¹ -----			
<i>Q</i> ₁	0,54	187,75	123,78	564,70	Argila
<i>Q</i> ₂	0,45	122,72	105,89	665,50	Muito argilosa
<i>Q</i> ₃	0,51	167,33	100,79	631,08	Muito argilosa
<i>Q</i> ₄	0,69	173,55	108,65	609,15	Muito argilosa

Tabela 2. Caracterização física do horizonte Bt

ρ_s	ρ_p	α	θ
----- kg m ⁻³ -----		----- m ³ m ⁻³ -----	
1381	2675	0,484	0,356

3.2.2 Procedimento experimental e canais pré-formados

Os testes foram realizados em canais pré-formados sobre o horizonte Bt do Argissolo com elevado teor de argila (Tabela 1). Inicialmente, o horizonte A do solo foi removido com auxílio de uma retroescavadeira e depositado ao lado da área experimental (Figura 2). Em seguida, foram pré-formados 16 canais, sendo 4 maiores com dimensões de 0,5 m de largura, 0,2 metros de profundidade e 4 metros de comprimento; os demais canais tinham dimensões de 0,1 m de largura, 0,05 m de profundidade e 4 m de comprimento.



Figura 1. Área experimental e canais pré-formados

Na extremidade inferior dos canais foi instalada uma calha coletora para auxiliar nas amostragens das descargas sólida e líquida. O suprimento de água para os canais foi por meio da utilização de mangueiras conectadas à um reservatório de água mantido a nível constante (Figura 3) por um duto de irrigação com vazão constante. Os níveis de fluxo adicionados foram: $Q_1 = 70 \text{ L min}^{-1}$, $Q_2 = 132 \text{ L min}^{-1}$, $Q_3 = 210 \text{ L min}^{-1}$ para os canais com dimensões menores e $Q_4 = 545 \text{ L min}^{-1}$ para os maiores canais. Todos os testes tiveram duração de 20 minutos. Com exceção do nível de fluxo Q_4 que foi utilizado o duto de irrigação diretamente na extremidade superior do canal, para os demais, as vazões foram determinadas unindo duas ou mais mangueiras e foi cronometrado o tempo necessário para encher um recipiente com capacidade de 20L.



Figura 2. Reservatório de água e mangueiras utilizadas

Para os canais de dimensões maiores a velocidade média do escoamento foi obtida por meio da utilização de um micromolinete fluviométrico e também pelo método do corante (azul de metileno), por meio da cronometragem do tempo gasto para que esse percorresse a distância dos 4 metros centrais dos canais. O comprimento dos canais dividido pelo tempo gasto pelo corante consiste na velocidade superficial do escoamento (V_s), expressa em $m\ s^{-1}$. Os valores da velocidade superficial foram multiplicados por um fator de correção ($\alpha = 2/3$) para obtenção da velocidade média (V_m) em $m\ s^{-1}$ (BEZERRA; CANTALICE, 2006; CASSOL et al., 2004; FARENHORST; BRYAN, 1995; KATZ et al., 1995). Para os canais menores foi utilizado apenas o método do corante para obtenção da velocidade superficial do escoamento.

A descarga líquida (Q) foi obtida pela amostragem do escoamento, que foi realizada com auxílio de potes plásticos (capacidade de 1 litro) nas calhas metálicas instaladas. A amostragem foi realizada a cada 5 minutos de duração dos testes e teve duração de 10 segundos, concomitantemente foi realizada a avaliação da velocidade superficial do escoamento. Para os maiores canais, uma régua linimétrica foi utilizada para medir a profundidade do escoamento (h) em cm; para os menores, foi utilizado o perfilômetro para mensurar o raio hidráulico (R_h) em metros, bem como a área (A) em m^2 . A viscosidade cinemática foi determinada utilizando a equação proposta por Julien (1995), sendo a temperatura da água ($^{\circ}C$) medida com um termômetro em cada teste.

O número de Froude (Fr) e número de Reynolds (Re) foram obtidos de acordo com Simons and Senturk (1992). A resistência hidráulica foi obtida pelo coeficiente de rugosidade de Manning (n):

$$n = \frac{R_h^{2/3} S^{1/2}}{V}, \quad (3)$$

sendo n o número de Manning ($s \text{ m}^{-1/3}$), R_h o raio hidráulico (m), S a declividade de superfície da água (m m^{-1}) e V a velocidade média do escoamento (m s^{-1}). O coeficiente de Darcy-Weisbach (f) também foi utilizado para expressar a resistência hidráulica:

$$f = \frac{8gR_h S}{V^2}, \quad (4)$$

sendo f o coeficiente de Darcy-Weisbach (adimensional) e g a aceleração da gravidade (m s^{-2}).

3.2.3 Velocidade permissível

A equação de velocidade permissível desenvolvida por Mirtskhoulava (1966a) foi testada no horizonte Bt coesivo do Argissolo e comparada com os valores de velocidade obtidos pelo micromolinete fluviométrico para os canais de maiores dimensões. A equação de Mirtskhoulava (1966a) tem a seguinte forma:

$$V = \log_{10} \frac{8,8R_h}{d} \sqrt{\frac{2gm}{2,6\gamma n'} [(\gamma_p - \gamma)d + 1,25C_f K]}, \quad (5)$$

sendo V a velocidade permissível (m s^{-1}); R_h o raio hidráulico (m); d o diâmetro característico das partículas do solo (D_{50} , em mm); g a aceleração da gravidade (m s^{-2}); m o coeficiente de trabalhabilidade, que leva em consideração a influência de diferentes fatores nas condições operantes, usualmente é considerado igual a 1 para solos recém preparados; γ e γ_p são respectivamente o peso específico da água e do sedimento (t m^{-3}); n' o coeficiente de sobrecarga, promovido pelas variações de velocidade, calculado em função do diâmetro característico do sedimento (D_{50}) utilizando-se a equação

$$n' = 1 + \frac{d}{0,00005 + 0,3d}; \quad (6)$$

C_f é o valor da coesão na ruptura (Pa), no limite de fraqueza, determinado por meio da equação:

$$C_f = 0,035C, \quad (7)$$

sendo C o coeficiente de coesão (Pa) que foi determinado por meio de ensaios de cisalhamento direto; K é um coeficiente de homogeneidade de teor de argila, diz respeito ao desvio dos valores de coesão dos seus valores médios (admite valores de 0 a 1) e é determinado pela equação:

$$K = 1 - \frac{\alpha' \sigma}{C}, \quad (8)$$

sendo α' um coeficiente caracterizando a probabilidade de uma mínima resistência dos solos ou um coeficiente de segurança, usualmente é considerado igual a 3; σ é o desvio padrão dos dados.

3.2.4 Taxa de erosão e desprendimento pelo fluxo concentrado em solo coesivo

A taxa de desprendimento de solo pelo fluxo concentrado foi calculada quando a tensão cisalhante ou tensão efetiva de cisalhamento excedeu a tensão crítica de cisalhamento do solo, como reportado por Thoman e Niezgodá (2008) e também por Flanagan e Nearing (1995) e Elliot et al. (1989) para o projeto de predição de erosão do solo (WEPP):

$$D_c = K_r (\tau_f - \tau_{cr}), \quad (9)$$

sendo D_c a capacidade de desagregação do escoamento ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$); K_r a erodibilidade do solo ($\text{kg N}^{-1} \text{s}^{-1}$); τ_{cr} a tensão crítica de cisalhamento do solo (Pa) abaixo da qual não existe desagregação e τ_f a tensão cisalhante do fluxo (Pa). De acordo com o modelo WEPP, a K_r foi considerada como o coeficiente angular b da regressão linear entre a taxa de desagregação e a tensão cisalhante do fluxo (τ_f), e a τ_{cr} corresponde ao valor do intercepto de τ_f , quando $D_r = 0$, ou a partir da relação dos coeficientes da reta: $\tau_{cr} = -a/b$ (LAFLEN; THOMAS, 1987). A tensão cisalhante do fluxo (τ_f , Pa) foi obtida pela equação

$$\tau_f = \gamma R_h S \quad (10)$$

sendo γ o peso específico da água (N m^{-3}), R_h o raio hidráulico (m) e S a declividade do canal (m m^{-1}).

As taxas de desagregação de solo pelo escoamento concentrado foram obtidas a cada 5 minutos de teste pela amostragem de sedimento, utilizando a expressão proposta por Flanagan e Nearing (1995):

$$D_r = \frac{QC_s}{LP_m}, \quad (11)$$

sendo D_r a taxa de desagregação do solo pelo fluxo concentrado ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$); Q a descarga líquida (L s^{-1}); C_s a concentração de sólidos no escoamento (kg L^{-1}); L o comprimento do canal (m) e P_m o perímetro molhado (m). As taxas de perdas de solo e a concentração de sedimentos foram determinadas pela pesagem do material, coletado durante 10 segundos em potes plásticos com capacidade de 1 L, em intervalos de 5 min. Após serem pesados, os potes foram levados à estufa ($65 \text{ }^\circ\text{C}$) onde permaneceram até a completa evaporação da água. Em seguida foram pesados novamente com a finalidade de obter a massa de solo. A relação entre a massa de solo seco e a massa de mistura água-sedimento foi expressa pela concentração de sedimentos em kg L^{-1} .

As perdas totais de solo durante o teste foram calculadas a partir dos dados de concentração de sedimentos do escoamento superficial e da taxa de descarga líquida, por meio da expressão descrita por Cantalice et al. (2005)

$$PS = \frac{\sum(QC_s t)}{A}, \quad (12)$$

sendo PS a perda total de solo (kg m^{-2}); Q a taxa de descarga líquida (L min^{-1}); C_s a concentração de sedimentos (kg L^{-1}); t o intervalo entre amostragens (5 min) e A a área do canal (m^2).

3.2.5 Ensaios de mecânica do solo

Os testes de cisalhamento direto foram realizados de acordo com a norma D-3080/98 da Sociedade Americana para Testes de Materiais (ASTM D 3080-98, 2003) e foram conduzidos em um aparelho de cisalhamento direto com velocidade de cisalhamento constante de $0.125 \text{ mm min}^{-1}$. As tensões normais aplicadas durante os testes foram 50, 100, 150 e 200 kPa. Ao final do teste, os dados requeridos para preenchimento dos requisitos das equações 13 e 14 foram obtidos

$$\sigma_n = \frac{N}{a}, \quad (13)$$

sendo σ_n a tensão normal (kPa); N a força normal aplicada no corpo de prova; a a área da seção transversal da amostra (m²);

$$\tau_c = \frac{T}{a}, \quad (14)$$

sendo τ_c a tensão de cisalhamento (kgf cm²) e T a força aplicada no corpo de prova (kgf cm², kPa).

A coesão do solo (C) foi determinada utilizando os valores da tensão de cisalhamento direto em cada tensão normal ao final do teste, pela criação de um gráfico com a relação tensão de cisalhamento x tensão normal, ajustado de acordo com a Equação 15. Os valores de coesão foram obtidos pelo intercepto da linha de tendência do ajuste ao eixo das abcissas.

A determinação da resistência do solo ao cisalhamento (τ) foi por meio da equação de Mohr-Coulomb

$$\tau = C + \sigma_n \operatorname{tg} \phi, \quad (15)$$

sendo C o valor da coesão do solo, σ_n a tensão normal existente no plano de cisalhamento, e ϕ o ângulo do atrito interno entre as partículas do solo e $\operatorname{tg} \phi$ o coeficiente de atrito. Os parâmetros σ_n e ϕ dependem do tipo de teste de cisalhamento, condições de drenagem, taxa de aplicação da força cisalhante e do grau de saturação do solo. Para condição de solo seco, ϕ tende a aproximadamente zero e σ_n tem o seu maior valor, o oposto é evidenciado em uma situação de saturação (PARTHENIADES, 2009).

3.2.6 Análise estatística

O delineamento experimental utilizado foi o de blocos casualizados com 4 repetições (quatro níveis de fluxo) e 4 tratamentos. Os dados foram inicialmente analisados pela estatística descritiva para verificação de algum *outlier* que pudessem comprometer o comportamento dos parâmetros estudados. Também foram realizados os testes de Kolmogorov-Smirnov para verificar a normalidade dos dados, F para a análise de variância, Tukey para a comparação de médias dos tratamentos, todos a 5% de probabilidade, e análises de regressão (SILVA, 2017).

3.3 Resultados e Discussão

3.3.1 Comportamento hidráulico de canal coesivo sob elevado fluxo do escoamento

A Tabela 3 contém as repetições e as variáveis avaliadas no comportamento hidráulico dos canais coesivos de maiores dimensões, em que a velocidade média do fluxo foi obtida pela utilização do micromolinetete fluviométrico, e foram aplicados os maiores fluxos (Tratamento Q_4). A vazão de entrada utilizada foi de 544,80 L min⁻¹. Em todos os testes o número de Reynolds (Re) demonstrou um comportamento turbulento e os valores do número de Froude (Fr) apontaram um fluxo subcrítico. O raio hidráulico variou de 0,055 a 0,059 m, demonstrando a similaridade entre os canais em estudo. A estatística descritiva confirma a homogeneidade entre os fluxos aplicados.

Tabela 3. Variáveis hidráulicas no comportamento hidráulico dos canais

Variáveis ¹	Repetições				Média
	1	2	3	4	
Q (L min ⁻¹)	537,90	427,52	424,71	355,93	436,52
τ_f (Pa)	93,89	88,37	76,20	55,74	78,55
V_m (m s ⁻¹) ²	0,4987	0,5044	0,3497	0,5988	0,4879
Re (Adm.)	33060,85	31471,87	23771,38	40403,02	32176,78
Fr (Adm.)	0,659	0,687	0,456	0,784	0,646
n	0,243	0,228	0,447	0,130	0,262
f	2,97	2,73	4,90	1,22	2,96
P_m (m)	0,964	0,831	1,023	1,006	0,956
R_h (m)	0,0584	0,0550	0,0599	0,0595	0,0582
A (m ²)	0,0555	0,0450	0,0604	0,0590	0,0550
S (m m ⁻¹)	0,1611	0,1611	0,1275	0,0940	0,1359

¹Todas as variáveis apresentaram distribuição normal pelo teste de Kolmogorov-Smirnov a nível de 5% de probabilidade. ²Velocidade medida pelo micromolinetete fluviométrico. Sendo: Q – descarga líquida, τ_f - tensão cisalhante do fluxo, Re – número de Reynolds, Fr – número de Froude, n – coeficiente de Manning, f – coeficiente de Darcy-Weisbach, V_m – velocidade média, P_m – perímetro molhado, R_h – Raio hidráulico, A – área, S – declividade.

A Figura 3 exibe a relação entre a velocidade média medida pelo micromolinetete fluviométrico e pelo método do corante sob fluxo elevado no canal coesivo, apenas para o tratamento Q_4 . Foi obtido um bom coeficiente de correlação e de maneira geral os valores foram semelhantes entre os métodos utilizados.

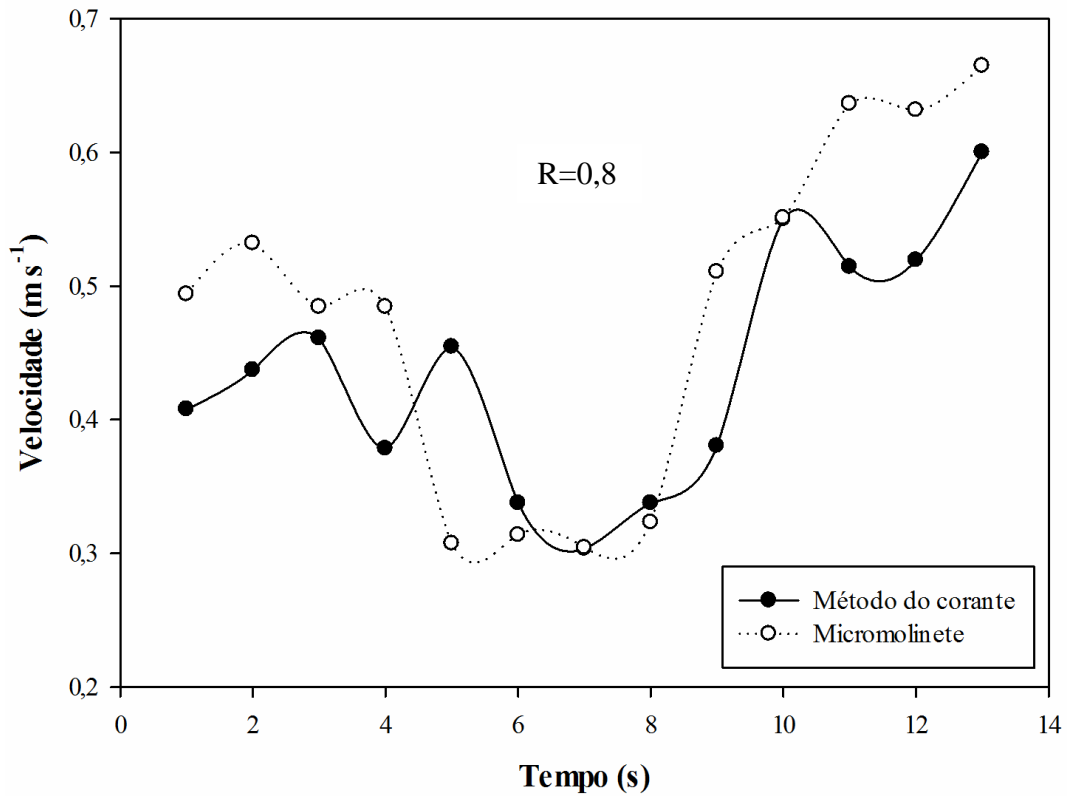


Figura 3. Relação entre a velocidade média medida pelo micromolinete fluviométrico e pelo método do corante

A resistência hidráulica representada pelos coeficientes de Darcy-Weisbach e Manning apresentaram uma resposta linear e inversa à velocidade do fluxo (Figura 4), o que implica dizer que a tensão de cisalhamento do escoamento (τ_f) contrabalança e determina a velocidade média devido a quantidade de energia restante.

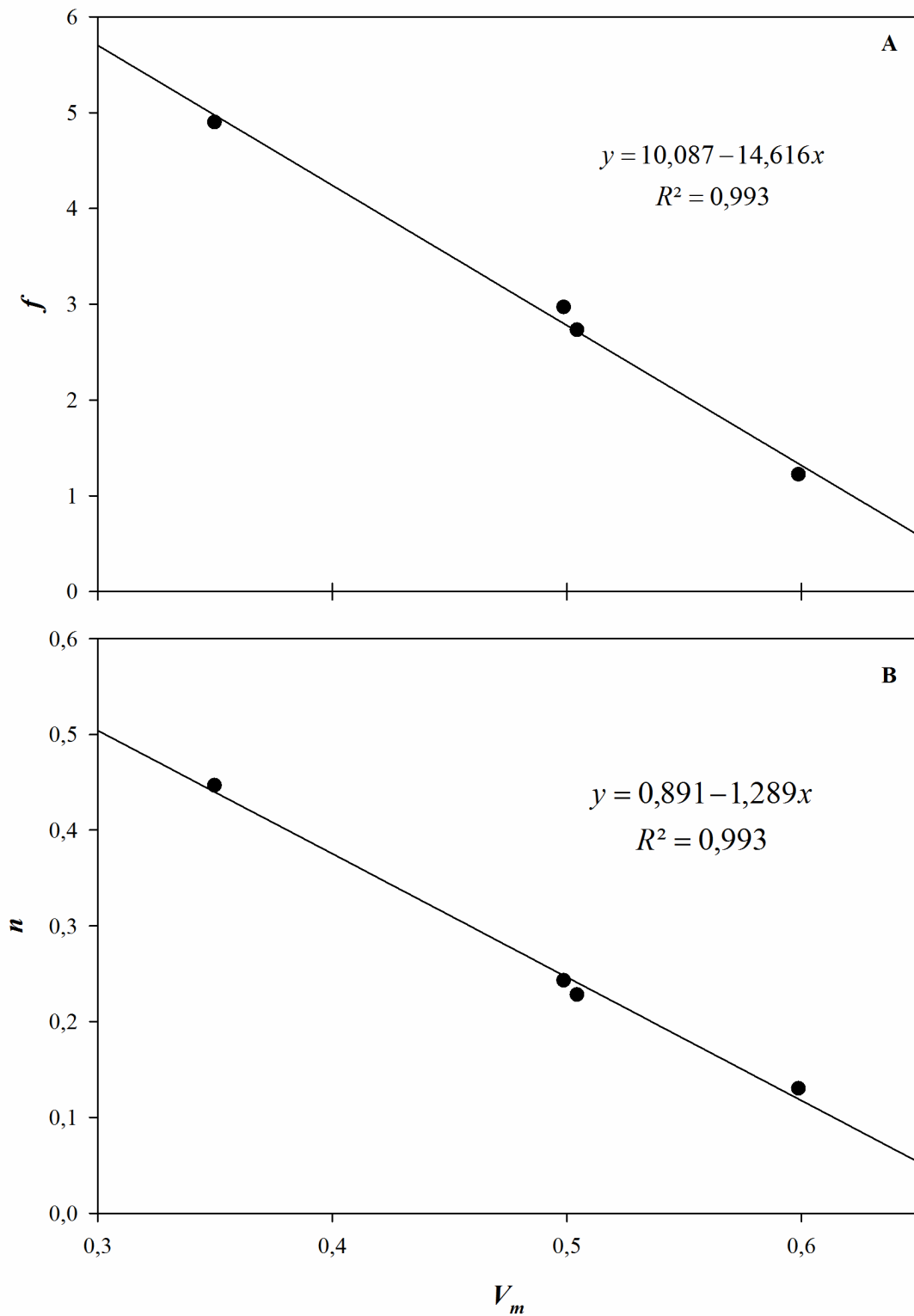


Figura 4. Relação entre o coeficiente de Darcy-Weisbach (A) e Manning (B) *versus* a velocidade média do fluxo para o tratamento Q_4

3.3.2 Comportamento hidráulico dos canais coesivos para todos os níveis de fluxo aplicados

A Tabela 4 contém as variáveis avaliadas no comportamento hidráulico dos canais coesivos em resposta a todos os fluxos aplicados. Devido ao aumento significativo dos fluxos aplicados, a geometria do canal foi alterada pelo incremento do perímetro molhado e área, o que permite a diferenciação do raio hidráulico (R_h) e isso acarreta no aumento significativo da tensão de cisalhamento do fluxo (τ_f) obtida.

Com exceção do regime de fluxo do tratamento 4, que foi caracterizado por ser turbulento subcrítico, para todos os demais o regime foi caracterizado por ser turbulento supercrítico, de acordo com os números de Reynolds e Froude, respectivamente. De acordo com Simons e Senturk (1992), este regime ocorre frequentemente em canais aluviais naturais. Entretanto, o número de Reynolds e Froude apresentaram um incremento significativo aos fluxos aplicados. É importante observar que nenhum dos canais alcançou o número de Froude de 2,8, que é segundo Slattery e Bryan (1992) e Bezerra et al. (2010) o mínimo para dar início ao processo de formação de sulcos.

Embora tenha sido aplicada um elevado fluxo no tratamento Q_4 o número de Froude apresentou-se inferior a 1 unidade, destoando dos demais tratamentos. Segundo Slattery e Bryan (1992), o baixo valor de F_r reflete o fato que o número de Froude, ao ser diretamente proporcional à velocidade do fluxo, é inversamente proporcional à raiz quadrada da profundidade do fluxo (R_h), de modo que, com descargas igualmente rápidas, a menos profunda será caracterizada por maior F_r .

Tabela 4. Variáveis hidráulicas de canais coesivos para diferentes fluxos aplicados

Variáveis Hidráulicas ¹	Vazões			
	Q ₁	Q ₂	Q ₃	Q ₄
Q (L min ⁻¹)	49.97a	66.01 ab	72.13 b	436.52 c
τ_f (Pa)	35.64 b	46.62 b	49.08 b	78.55 a
Re (Adm.)	23073.71 b	31335.26 ab	39040.01 a	32176.78 ab
Fr (Adm.)	1.58 a	1.84 a	1.88 a	0.64 b
n	0.055 ab	0.04 a	0.037 a	0.262 b
f	0.482 a	0.388 a	0.363 a	2.956 b
V_m (m s ⁻¹)	0.7895 ab	0.9703 a	1.0617 a	0.4879 b
P_m (m)	0.1319 a	0.1682 ab	0.2282 b	0.9558 c
R_h (m)	0.0256 a	0.0284 ab	0.0322 b	0.0582 c
A (m ²)	0.0034 a	0.0047 ab	0.0073 b	0.055 c
S (m m ⁻¹)	0.1396 a	0.1644 a	0.1528 a	0.1359 a

¹Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si na linha (Tukey, $p < 0.05$). Sendo: Q – descarga líquida, τ_f – tensão cisalhante do fluxo, Re – número de Reynolds, Fr – número de Froude, n – coeficiente de Manning, f – coeficiente de Darcy-Weisbach, V_m – velocidade média, P_m – perímetro molhado, R_h – Raio hidráulico, A – área, S – declividade

Os parâmetros de resistência hidráulica, coeficiente de Darcy-Weisbach e Manning, foram apenas significantes para os maiores fluxos aplicados, provavelmente devido ao elevado teor de argila e coesão do solo.

3.3.3 Parâmetros de resistência e velocidade permissível em canais coesivos

3.3.3.1 Resistência do canal e taxas de erosão em solo coesivo

A tensão crítica de cisalhamento (τ_{cr}) e a erodibilidade (K_r) do solo em sulco foram determinadas a partir da relação entre a D_r e τ , conforme demonstra a Figura 5. Os valores de τ_{cr} e K_r encontrados foram de 103.60 Pa e 0.004 kg N⁻¹ s⁻¹ respectivamente, para o horizonte B do Argissolo em estudo.

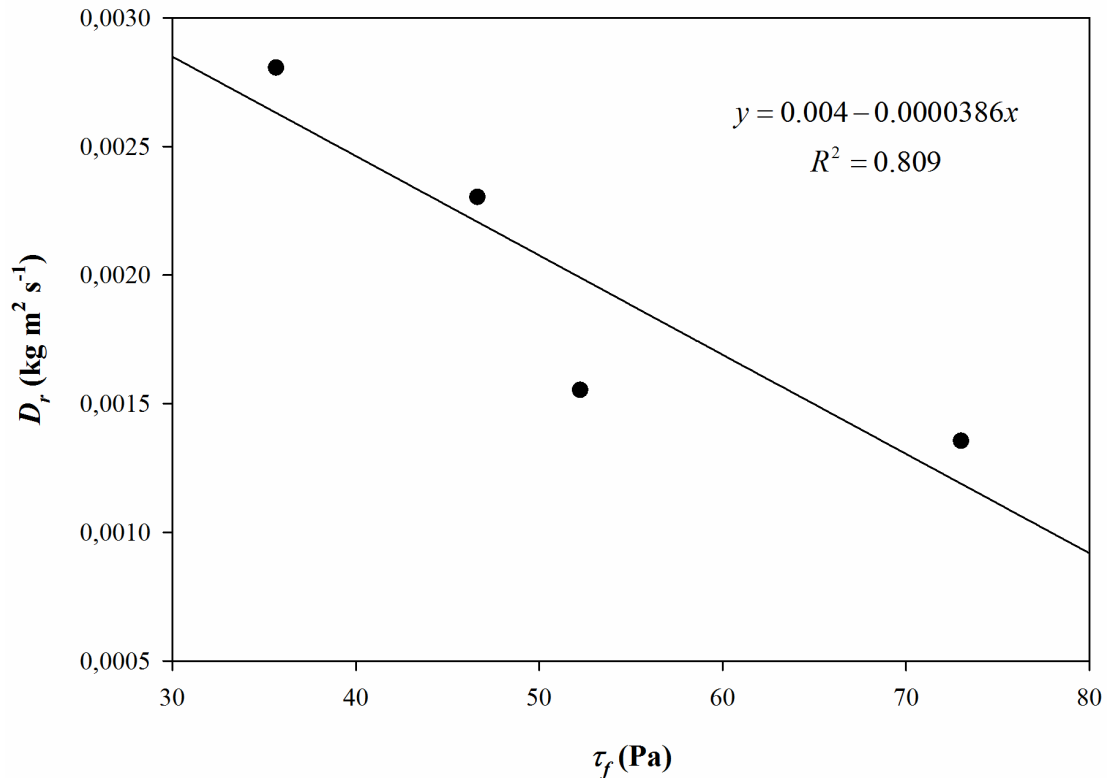


Figura 5. Relação entre taxa de desagregação (D_r) e tensão de cisalhamento do fluxo (τ_f)

Apesar de tensão de cisalhamento do fluxo (τ_f) ter seguido uma tendência crescente com o aumento das vazões aplicadas nos tratamentos, variando de 35 a 78 Pa, da menor para a maior vazão (Tabela 4), estas não foram suficientes para que pudessem promover desagregação e carreamento das partículas do solo, conforme demonstra a Figura 5, com uma correlação negativa entre estes parâmetros. Além disto, a τ_{cr} foi bem superior à τ_f , supondo serem necessárias vazões ainda maiores durante os testes para que o processo de desagregação pudesse ser iniciado. Tanto a τ_{cr} quanto o K_r expressam a resistência do solo a erosão por fluxo concentrado e dessa forma são indispensáveis para a avaliação da desagregação de partículas sólidas e erosão em solos (KNAPEN et al., 2007).

Conforme relatado por Utley e Wynn (2008), a tensão crítica de cisalhamento do solo (τ_{cr}) foi originalmente definida para solos não coesivos e não existe uma precisa definição para solos coesivos, pois é difícil prever o momento em que se inicia a desagregação das partículas em solos coesivos. Entretanto, podemos encontrar em algumas literaturas intervalo de valores de τ_{cr} para solos coesivos. Segundo Garde e Raju (2000) para um material de calcário (10 a 20 mm de espessura e 40 a 60 mm de comprimento) a tensão crítica é cerca de 56 N m^{-2} . O que sugere que para a situação do presente estudo em que as partículas predominantes são de argila

($\phi < 0.002$ mm), a tensão crítica de cisalhamento do solo fosse bem superior; fato observado neste estudo. O parâmetro de coesão merece destaque por ser um dos mais influentes tanto na K_r quanto na τ_{cr} .

Enquanto os aspectos hidrodinâmicos da erosão e transporte de sedimento são bem entendidos, a erodibilidade em sedimento coesivo tem provado ter entendimento mais complexo e mais difícil para se prever, uma vez que a atração interpartícula é influenciada por um grande número de propriedades do sedimento que interagem de formas complexas (GRABOWSKI; DROPPO; WHARTON, 2011).

Wuddivira et al. (2013), estudando a influência das forças coesivas e disruptivas sobre a resistência e erodibilidade de solos tropicais, afirmam que a erodibilidade em seu estudo não foi controlada por um simples fator como em prévios estudos, mas por um conjunto combinado de efeitos da matéria orgânica e teor de argila, exibindo o complexo mecanismo envolvido na forma como a tensão de cisalhamento influencia a erosão do solo.

Geng et al. (2017) investigaram a variação espacial na resistência do solo (K_r e τ_c) ao escoamento em 36 tipos de solos e uma correlação de Pearson indicou que a erodibilidade do solo em sulco foi negativamente correlacionada com os parâmetros teor de silte e tamanho de partícula, e foi positivamente correlacionada com o teor de areia, tamanho médio de grãos sólidos, e o diâmetro médio geométrico das partículas do solo. As partículas menores que 20 μm contribuíram para a coesão e baixa erodibilidade (K_r), enquanto que partículas maiores que 20 μm foram mais facilmente desagregadas e associaram-se com valores mais elevados de K_r .

Regressões entre a taxa de desagregação do solo em sulco (D_r) de cada tratamento em função do tempo de duração do experimento, evidenciando os momentos das amostragens são mostradas na Figura 6. De acordo com esta, ficou evidente a redução na D_r ao decorrer do tempo, independente da vazão utilizada. O pico de D_r foi até os 5 minutos iniciais de teste, a partir de então, a tendência foi decréscimo e estabilização. Krone (1999) ilustrou a importância de incluir os efeitos da estrutura de leito, particularmente, as mudanças da estrutura com o tempo e profundidade da sobrecarga, e afirma que o decréscimo na taxa de erosão é devido ao incremento na resistência do leito com a profundidade e com a frequência decrescente das flutuações dos estresses de maior amplitude necessários para erodir o leito com a crescente resistência.

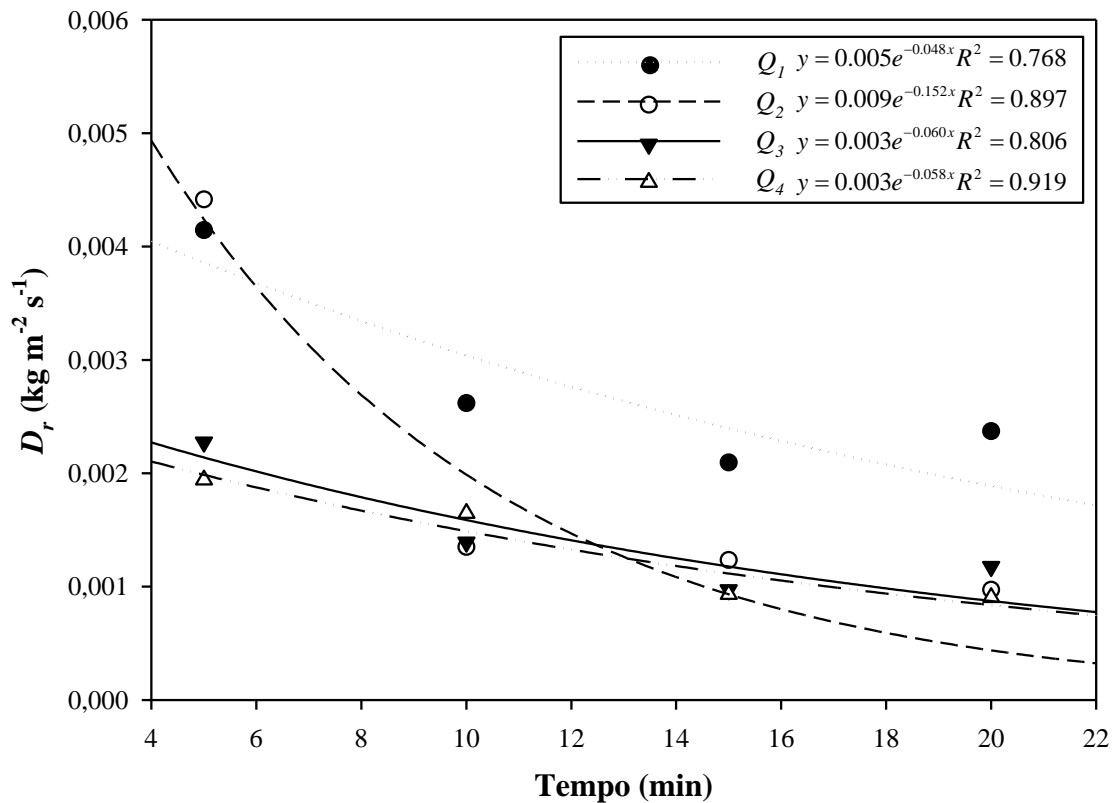


Figura 6. Relação entre taxa de desagregação (D_r) e tempo (min)

Um comportamento diferente ocorreu para Q_1 , pois diminuíram as taxas de D_r e ao final do tempo total de duração do teste houve um aumento na D_r sugerindo que a vazão aplicada e a velocidade do fluxo concentrado geraram uma tensão de cisalhamento suficiente para superar a força de coesão entre as partículas do solo e dar início ao processo erosivo, caso o experimento tivesse maior tempo de duração. Entretanto, como pode-se notar nos demais tratamentos, mesmo com o aumento na vazão e velocidade, não houve maior taxa de D_r .

O valor médio da coesão do solo (C) obtida pelos ensaios de cisalhamento direto e a coesão de falha (C_f), tensão crítica do cisalhamento (τ_c) e erodibilidade do solo (K_r) podem ser vistos na Tabela 5. Analisando os resultados fica evidente a clara influência da textura do solo no elevado valor da C e na conseqüente baixa erodibilidade, corroborando os resultados obtidos de D_r no estudo.

Tabela 5. Parâmetros de resistência do solo

C	C_f	τ_c	K_r
	----- Pa -----		$\text{kg N}^{-1} \text{s}^{-1}$
56135	1964,725	103,60	0,004

A perda de solo (PS) pode ser visualizada na Tabela 6 e, apesar das diferentes vazões aplicadas, não houve diferença estatística entre os tratamentos, apresentando um coeficiente de variação de 30.79% entre os tratamentos.

Tabela 6. Perda de solo (kg m^{-2}) para todos os tratamentos

Vazão	PS ¹
Q_1	0,3365 a
Q_2	0,4805 a
Q_3	0,5834 a
Q_4	0,6229 a

¹Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si na coluna (Tukey, $p < 0.05$).

3.3.3.2 Velocidade observada e velocidade permissível estimada pela equação de Mirtskhoulava e Manning

A velocidade média (V_m) seguiu uma tendência de aumento do Q_1 ao Q_3 ; já o tratamento Q_4 apresentou o menor valor observado, apesar do seu significativo aumento de Q (Tabela 7). A partir do número de Froude (F_r) os fluxos foram caracterizados por serem supercrítico ($F_r > 1$), com exceção do Q_4 , onde foi subcrítico ($F_r < 1$), corroborando à baixa V_m encontrada.

Tabela 7. Velocidades média observada e velocidades permissíveis estimadas por Manning e Mirtskhoulava

Tratamento ¹	V_m	$V_{Manning}$	$V_{Mirtskhoulava}$
	----- m s^{-1} -----		
Q_1	0,789 ab	0,633 b	1,494 c
Q_2	0,970 a	0,943 a	1,523 b
Q_3	1,062 a	1,160 a	1,557 ab
Q_4	0,488 b	0,246 c	1,719 a

¹Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si na coluna (Tukey, $p < 0.05$)

A velocidade permissível determinada pela equação de Manning (Equação 3) foi obtida para efeito comparativo. Para a determinação da velocidade permissível por meio da Equação

5, proposta por Mirtskhoulava (1966b), foram utilizados os seguintes parâmetros: $D_{50} = 0,959$ mm, $g = 9,81$ m s⁻², $m = 0,8$ (admitindo-se uma área recém cultivada), $\gamma_w = 9771$ t m⁻³, $n' = 3,84003$, $\gamma_s = 26241.8$ t m⁻³, $C = 48321$ Pa, $C_f = 1691,24$ Pa, $\sigma = 17,41$, $K = 0,9991$ e o R_h presente na Tabela 4.

A $V_{Mirtskhoulava}$ variou pouco entre os tratamentos, apresentando um coeficiente de variação de apenas 6.41%. Apesar de serem valores elevados para velocidade permissível, de acordo com Mirtskhoulava (1991), solos de textura argilosa com valores de coesão calculada variando entre $0,5 - 0,6 \times 10^5$ Pa podem assumir velocidades permissíveis que variam de 1,56 a 2,72 m s⁻¹.

A literatura é vasta no que diz respeito a possíveis velocidades permissíveis relacionadas ao tipo de material de fundo dos canais. Lencastre e Franco (1992) afirmam que para um canal em solo rico em argila a velocidade permissível pode variar de 1,25 a 1,70 m s⁻¹, na condição de canal compactado e muito compactado, respectivamente.

De acordo com Graf (1984), comparando dados experimentais com equações, para material agregado, tipo argila, a velocidade de escoamento do fluxo pode variar de 1,30 a 2,20 m s⁻¹ para experimentos; desde 1,42 a 1,69 m s⁻¹ para equação proposta por Mirtskhoulava e desde 1,45 a 1,86 m s⁻¹ para equação proposta por Karasev (1964). Portanto, os valores aqui encontrados são respaldados pela literatura.

As águas naturais sempre carregam materiais em suspensão, materiais esses suscetíveis de deposição em determinadas condições. Caso os canais sejam projetados para funcionar com velocidades muito reduzidas, haverá o perigo da deposição desses materiais, o que poderá trazer elevadas despesas de conservação. Caso contrário, se os canais forem executados para trabalhar com velocidades muito elevadas, as paredes laterais e o fundo serão erodidos, alterando-se as condições do projeto. Portanto, verifica-se que há uma certa relação ótima entre a velocidade da água, a natureza do material e as dimensões do canal, para qual os efeitos da erosão e da deposição serão desprezíveis (AZEVEDO NETTO et al., 1998).

Neste tocante, avaliando a Tabela 7, fica evidente que as velocidades permissíveis determinadas pela metodologia proposta por Manning, são bem inferiores às determinadas pela equação de Mirtskhoulava. As vazões Q_2 e Q_4 se avaliadas por $V_{Manning}$, teriam atingido a velocidade crítica e, portanto, dado início ao processo erosivo dos canais. Entretanto, conforme ficou evidente pela relação entre a taxa de desagregação (D_r) x tensão cisalhante do fluxo (τ_f),

exibida na Figura 5, as vazões impostas no experimento não alcançaram o limite mínimo da tensão crítica de cisalhamento do solo (τ_{cr}) para dar início ao processo erosivo.

Portanto, é evidente a subestimação das velocidades permissíveis em canais escoadouros em solos de caráter coesivo quando estas são determinadas pela equação de Manning. A disparidade fica ainda mais clara quando analisamos a vazão Q4 em que houve uma tendência oposta para as velocidades permissíveis estimadas, sendo inferior para equação de Manning e superior para Mirtskhoulava.

Tais resultados corroboram a afirmação que, por conta da equação de Manning ter sido desenvolvida para solos de caráter não coesivo, esta subestima a velocidade permissível em solos com caráter coesivo. Os parâmetros relacionados às características coesivas do solo presentes na equação de Mirtskhoulava conseguem traduzir com mais fidelidade a complexidade presente nestes solos e produzem valores de velocidades mais próximos da realidade.

3.4 Conclusões

A tensão de cisalhamento gerada pelo fluxo aplicado (35-78 Pa) não foi suficiente para atingir a tensão crítica de cisalhamento do solo (103,60 Pa) nos canais e dar início ao processo erosivo nos canais.

A equação de Manning demonstrou-se ineficiente para estimar a velocidade permissível quando comparada à equação de Mirtskhoulava, em canais pré-formados no horizonte Bt do Argissolo de textura muito argilosa.

A presença de parâmetros relacionados às características coesivas do solo na equação de Mirtskhoulava forneceu maior exatidão nas estimativas das velocidades permissíveis no presente estudo.

Agradecimentos

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), que concedeu a bolsa de Doutorado, e à Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE).

Referências

- AL-HAMDAN, O. Z.; PIERSON, F. B.; NEARING, M. A.; WILLIAMS, C. J.; STONE, J. J.; KORMOS, P. R.; BOLL, J.; WELTZ, M. A. Risk Assessment of Erosion from Concentrated Flow on Rangelands Using Overland Flow Distribution and Shear Stress Partitioning. **Transactions of the ASABE**, Joseph, v. 56, n. 2, p. 539–548, 2013.
- ALIEV, T. A. Canals in cohesive soils. **Hydrotechnical Construction**, *Gidrotekhnicheskoe*, v. 19, n. 6, p. 301–307, jun. 1985.
- ANSARI, S. A.; KOTHYARI, U. C.; RAJU, K. G. R. Influence of Cohesion on Scour under Submerged Circular Vertical Jets. **Journal of Hydraulic Engineering**, New York, v. 129, n. 12, p. 1014–1019, 2003.
- ASTM D 3080-98. Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions. In: **Annual Book of ASTM Standards**. West Conshohocken, PA: [s.n.]. p. 347–352.
- AZEVEDO NETTO, J. M. DE; FERNANDEZ, M. F. Y; ARAUJO, R. DE; ITO, A. E. **Manual de Hidráulica**. 8. ed. São Paulo: Blucher, 1998.
- BERTONI, J.; LOMBARDI NETTO, F. **Conservação do Solo**. 7. ed. São Paulo: Ícone, 2010.
- BEZERRA, S. A.; CANTALICE, J. R. B.; CUNHA FILHO, M.; SOUZA, W. L. DA S. Características hidráulicas da erosão em sulcos em um cambissolo do semiárido do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 4, p. 1325–1332, ago. 2010.
- BEZERRA, S. A.; CANTALICE, J. R. B. Erosão entre sulcos em diferentes condições de cobertura do solo, sob cultivo da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 3, p. 565–573, jun. 2006.
- CANTALICE, J. R. B.; CASSOL, E. A.; REICHERT, J. M.; BORGES, A. L. DE O. Hidráulica do escoamento e transporte de sedimentos em sulcos em solo franco-argilo-arenoso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 4, p. 597–607, jul. 2005.
- CASSOL, E. A.; CANTALICE, J. R. B.; REICHERT, J. M.; MONDARDO, A. Escoamento superficial e desagregação do solo em entressulcos em solo franco-argilo-arenoso com resíduos vegetais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 7, p. 685–690, jul. 2004.
- DE BAETS, S., POESEN, J., GYSSELS, G., KNAPEN, A. Effects of grass roots on the erodibility of topsoils during concentrated flow. **Geomorphology**, Amsterdam, v. 76, n. 1–2, p. 54–67, 2006.
- ELLIOT, W. J.; LIEBENOW, A. M.; LAFLEN, J. M.; KOHL, K. D. **A compendium of soil erodibility data from WEPP cropland soil field erodibility experiments 1987 & 88NSERL**. Lafayette, Indiana: [s.n.].

FARENHORST, A.; BRYAN, R. B. Particle size distribution of sediment transported by shallow flow. **Catena**, Amsterdam, v. 25, n. 1–4, p. 47–62, jun. 1995.

FLANAGAN, D. C.; NEARING, M. A. **Erosion Prediction Project, Hillslope Profile and Watershed Model Documentation**. West Lafayette, IN.: United States Department of Agriculture (USDA), 1995.

FLINT, L. E.; FLINT, A. L. Porosity. In: DANE, J. H.; TOPP, C. G. (Eds.). . **Methods of Soil Analysis: Part 4. Physical Methods**. SSSA Book Series. 5. ed. Madison, WI: Soil Science Society of America, 2002. p. 241–253.

GARDE, R. J.; RAJU., K. R. **Mechanics of sediment transportation and alluvial stream problems**. Third ed. [s.l.] New Delhi, Taylor & Francis, 2000.

GEE, G. W.; OR, D. Particle-size Analysis. In: DANE, J. H.; TOPP, G. C. (Eds.). . **Methods of Soils Analysis**. 3. ed. Madison: Soil Science Society of America, 2002. p. 255–293.

GENG, R.; ZHANG, G.; MA, Q.; WANG, L. Soil resistance to runoff on steep croplands in Eastern China. **Catena**, Amsterdam, v. 152, p. 18–28, maio 2017.

GRABOWSKI, R. C.; DROPPA, I. G.; WHARTON, G. Erodibility of cohesive sediment: The importance of sediment properties. **Earth-Science Reviews**, Amsterdam, v. 105, n. 3–4, p. 101–120, 2011.

GRAF, W. H. **Hydraulics of Sediment Transport**. Colorado: Water Resources Publications, 1984.

GROSSMAN, R. B.; REINSCH, T. G. Bulk Density and Linear Extensibility. In: DANE, J. H.; TOPP, C. G. (Eds.). . **Methods of Soil Analysis: Part 4. Physical Methods**. SSSA Book Series. 5. ed. Madison, WI: Soil Science Society of America, 2002.

JAIN, R. K.; KOTHYARI, U. C. Cohesion influences on erosion and bed load transport. **Water Resources Research**, Washington, v. 45, n. 6, p. 1–17, 11 jun. 2009.

JULIEN, P. Y. **Erosion and Sedimentation**. Melbourne: Cambridge University Press, 1995.

KARASEV, I. F. **The regimes of eroding channels in cohesive materials**. Soviet Hydrology. **Anais...**1964

KATZ, D. M.; WATTS, F. J. F. J.; BURROUGHS, E. R. E. R.; DANIEL, B.; ASSOCIATE, M. K.; WATTS, F. J. F. J.; BURROUGHS, E. R. E. R. Effects of Surface Roughness and Rainfall Impact on Overland Flow. **Journal of the Hydraulics Division**, New York, v. 121, n. 7, p. 547–553, 1995.

KHANAL, A.; KLAVON, K. R.; FOX, G. A.; DALY, E. R. Comparison of Linear and Nonlinear Models for Cohesive Sediment Detachment : Rill Erosion , Hole Erosion Test , and Streambank Erosion Studies. **Journal of Hydraulic Engineering**, New York, v. 142, n. 2007, p. 1–12, 2016.

KNAPEN, A.; POESEN, J.; GOVERS, G.; GYSSELS, G.; NACHTERGAELE, J. Resistance of soils to concentrated flow erosion: A review. **Earth-Science Reviews**, Amsterdam, v. 80, n. 1–2, p. 75–109, jan. 2007.

KRONE, R. B. Effects of Bed Structure on Erosion of Cohesive Sediments. **Journal of Hydraulic Engineering**, New York, v. 125, n. 12, p. 1297–1301, dez. 1999.

LAFLEN, J. M.; THOMAS, A. W. **Cropland experiments for the WEPP project**. INTERNATIONAL WINTER MEETING OF THE AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. **Anais...**San Joseph: American Society of Agricultural Engineers, 1987

LENCASTRE, A.; FRANCO, F. M. **Lições de hidrologia**. Lisboa: Universidade de Lisboa, 1992.

MANNING, R. On the flow of water in open channels and pipes. **Transactions of the Institute of Civil Engineers in Ireland**, Dublin, v. 20, p. 161–207, 1891.

MIRTSKHOULAVA, T. E. Studies on permissible velocities for soil and facings. **Central Water Research**, Poona, p. 333–341, 1966a.

MIRTSKHOULAVA, T. E. Erosional Stability Of Cohesive Soils. **Journal of Hydraulic Research**, Oxon, v. 4, n. 1, p. 37–50, jan. 1966b.

MIRTSKHOULAVA, T. E. Scouring by flowing water of cohesive and noncohesive beds. **Journal of Hydraulic Research**, Oxon, v. 29, n. 3, p. 341–354, 1991.

PARTHENIADES, E. **Cohesive Sediments in Open Channels: Properties, Transport and Applications**. 1. ed. United States of America: Elsevier, 2009.

PRUSKI, F. F. **Conservação do solo e água: práticas mecânicas para o controle da erosão**. 2. ed. Viçosa: UFV, 2009.

SANTOS, H. G. DOS; ALMEIDA, J. A.; OLIVEIRA, J. B. DE; LUMBRERAS, J. F.; ANJOS, L. H. C. DOS; COELHO, M. R.; JACOMINE, P. K. T.; CUNHA, T. J. F.; OLIVEIRA, V. Á. DE. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3. ed. Brasília-DF: Embrapa, 2013.

SEKINE, M.; NISHIMORI, K.; MASATO, S.; KEN-ICHIRO, N. Erosion rate of cohesive sediment by running water. **Fourth International Conference on Scour and Erosion**, Tokyo, v. 4, p. 424–429, 2008.

SILVA, F. A. S. **ASSISTAT versão 7.7 beta** Campina Grande: DEAG-CTRN-UFCG, 2017.

SIMONS, D. B.; SENTURK, F. **Sediment transport technology: water and sediment dynamics**. Fort Collins, CO: Water Resources Publication, 1992.

SLATTERY, M. C.; BRYAN, R. B. Hydraulic conditions for rill incision under simulated rainfall: A laboratory experiment. **Earth Surface Processes and Landforms**, Hoboken, v. 17, n. 2, p. 127–146, mar. 1992.

THOMAN, R. W.; NIEZGODA, S. L. Determining Erodibility, Critical Shear Stress, and Allowable Discharge Estimates for Cohesive Channels: Case Study in the Powder River Basin of Wyoming. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. New York, 134, n. 12, p. 1677–1687, 2008.

UTLEY, B. C.; WYNN, T. M. Cohesive Soil Erosion: Theory and Practice. **World Environmental and Water Resources Congress 2008**, Washington, n. 1982, p. 1–10, 2008.

WUDDIVIRA, M. N.; STONE, R. J.; EKWUE, E. I. Influence of cohesive and disruptive forces on strength and erodibility of tropical soils. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 133, p. 40–48, 2013.

CAPÍTULO 02

4 PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA MECÂNICA AO CISALHAMENTO DIRETO DE UM HORIZONTE Bt: SOB UMIDADE DE CAMPO E SATURADA

Parâmetros de resistência mecânica ao cisalhamento direto de um horizonte Bt: sob umidade de campo e saturada

RESUMO

A resistência ao cisalhamento dos solos é uma das mais importantes propriedades dinâmicas para avaliação da interação do solo com a utilização de implementos agrícolas e com as práticas de manejo adotadas para o solo. O objetivo do presente estudo foi avaliar a resistência ao cisalhamento do um Argissolo Vermelho-Amarelo por meio das envoltórias de cisalhamento em amostras de um horizonte Bt argiloso sob umidade de campo e saturada, diferentes tensões normais e também avaliar as alterações decorrentes na coesão e ângulo de atrito interno. Além de aplicar técnicas de estatística multivariada para melhor entender a dinâmica nas distintas situações. O estudo foi realizado na estação experimental de cana-de-açúcar da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), localizada na cidade de Carpina. Foram coletadas amostras com estrutura preservada para realização de ensaios de cisalhamento direto e determinação de parâmetros físicos e teor de carbono orgânico. Foram realizados ensaios de cisalhamento direto de acordo com a norma D-3080/98 (ASTM D 3080-98, 2003). A velocidade cisalhante foi de $0,125 \text{ mm min}^{-1}$. As tensões normais utilizadas durante os testes foram: 50, 100, 150 e 200 kPa. Foram utilizadas técnicas de estatística multivariada e bivariada para analisar o comportamento dos dados. As tensões cisalhantes foram maiores para a condição de umidade de campo e menores para condição de saturação. Apesar do teor elevado de argila do solo, de acordo com a matriz de correlação de pearson e a técnica multivariada de agrupamento, esta fração não foi importante para o parâmetro da coesão aparente do solo. Apenas com a utilização da técnica multivariada de componentes principais foi possível visualizar a importância da fração silte no parâmetro de coesão aparente no solo, demonstrando a importância da multivariada no entendimento do fenômeno.

Palavras-chave: Ruptura do solo. Coesão do solo. Estatística multivariada.

Direct shear resistance parameters of a Bt horizon: under field and saturated moisture

ABSTRACT

Soil shear strength is one of the most important dynamic properties for the evaluation of soil interaction with the use of agricultural implements and with the management practices adopted for the soil. The present study was carried out to evaluate the shear strength of the soil from shear wraps in samples of a clayey Bt horizon subjected to different moisture contents different normal stresses and also to evaluate the changes in cohesion and internal friction angle. In addition to applying multivariate statistical techniques to better understand the dynamics in the different situations. The study was carried out at the sugarcane experimental station of the Federal Rural University of Pernambuco (UFRPE), located in the Carpina town. Samples with preserved structure were collected to perform direct shear tests and determination of physical parameters and organic carbon content of a Tb Dystrophic A moderate Red-Yellow Argisol, medium / very clay texture. Direct shear tests were performed according to D-3080/98 (ASTM D 3080-98, 2003). The shear rate was $0.125 \text{ mm min}^{-1}$. The normal stresses used during the tests were: 50, 100, 150 and 200 kPa. Multivariate and bivariate statistical were used to analyze the data. The shear stresses were higher for the field moisture condition and lower for the saturation condition. Despite the high clay content of the soil, according to the pearson correlation matrix and the multivariate grouping technique, this fraction was not important for the soil cohesion parameter. Only with the use of the multivariate approach of principal component analysis was possible to visualize the importance of the silt fraction in the parameter of apparent cohesion in the soil, demonstrating the importance of the multivariate approach in the understanding of the phenomenon.

Keywords: Soil rupture. Soil cohesion. Multivariate statistics.

4.1 Introdução

Apesar da resistência ao cisalhamento dos solos ser uma das mais importantes propriedades dinâmicas para avaliação da interação máquinas-solo, os estudos ainda são raros no Brasil. Esta falta de interesse pode ser atribuída à escassez de estudos referentes a interação da resistência ao cisalhamento com outras propriedades em solos cultivados, particularmente em situação de diferentes sistemas de manejo (SILVA et al., 2015).

A resistência ao cisalhamento é a principal propriedade mecânica do solo que controla a estabilidade de uma massa de solo sob cargas estruturais e pode ser definida como a máxima tensão de cisalhamento que o solo pode suportar sem sofrer ruptura (cisalhar), ou a tensão de cisalhamento do solo no plano em que a ruptura estiver ocorrendo. A análise do estado de tensões que provoca a ruptura é o estudo da resistência ao cisalhamento dos solos e sofre influência do atrito interno entre as partículas e a coesão destas. O critério de ruptura que melhor representa o comportamento dos solos é o de Mohr-Coulomb (PINTO, 2006; ROY; DASS, 2014).

Comumente, na mecânica de solo determina-se a resistência do solo ao cisalhamento (τ , kPa) por meio da equação de Mohr-Coulomb, em que se obtém também a coesão do solo:

$$\tau = C + \sigma_n \operatorname{tg} \phi, \quad (1)$$

sendo C o valor da coesão do solo (kPa), σ_n a tensão normal existente no plano de cisalhamento (kPa), e ϕ o ângulo do atrito interno entre as partículas do solo e $\operatorname{tg} \phi$ o coeficiente de atrito. Os parâmetros σ_n e ϕ dependem do tipo de teste de cisalhamento, condições de drenagem, taxa de aplicação da força cisalhante e do grau de saturação do solo. Para condição de solo seco, ϕ tende a aproximadamente zero e σ_n tem o seu maior valor, o oposto é evidenciado em uma situação de saturação (PARTHENIADES, 2009).

Os parâmetros da equação de Mohr-Coulomb geralmente variam com o conteúdo de água, carbono orgânico e grau de compactação do solo. Segundo Silva et al. (2015), a coesão (C) e o ângulo de atrito interno (ϕ) reduzem com incremento do conteúdo de água em sistema de plantio direto e convencionais. Conforme relatado por Ekwue et al. (2014), apesar de o conteúdo de material orgânico promover um incremento da coesão do solo, sua incorporação em excesso pode reduzi-la e tornar o solo muito solto. Os mesmos autores, avaliando os efeitos da matéria orgânica no cisalhamento de solos cultivados, afirmaram que o ângulo de atrito

decreceu com o acréscimo do conteúdo de matéria orgânica para todos os solos testados, o que resultou no declínio dos valores da resistência ao cisalhamento dos solos.

A resistência do solo é influenciada pelo manejo e propriedades do solo que controlam o crescimento das plantas, desenvolvimento de raízes e as relações de solo-umidade. O impacto dos parâmetros texturais e estruturais sobre a resistência do solo é moderado pela concentração de carbono orgânico no solo. O efeito da matéria orgânica é reduzir a densidade do solo e aumentar a retenção de água, ambos atuam reduzindo a resistência ao cisalhamento. Embora a matéria orgânica aumente a ligação inter-partículas dentro dos agregados (BLANCO-CANQUI et al., 2005; EKWUE, 1990).

De acordo com Dafalla (2013) a mineralogia desempenha o principal papel na capacidade de cisalhamento das argilas. A cimentação entre partículas pode tanto ser devido a ligações químicas, quanto ligação físico-química. A expansão e contração em solos expansivos são dois efeitos extremos positivos na resistência ao cisalhamento. Esta é geralmente baixa para argila totalmente expandida e quando a argila está comprimida esta pode desenvolver uma maior coesão e ângulo de atrito interno.

A resistência ao cisalhamento dos solos é essencialmente devida ao atrito entre as partículas. Entretanto, a atração química entre estas partículas pode provocar uma resistência independente da tensão normal atuante no plano e que constitui uma coesão real, que deve ser bem diferenciada da coesão aparente do solo, que é uma parcela da resistência ao cisalhamento de solos úmidos, não saturados, devida à tensão entre partículas resultante da pressão capilar da água, de maneira que saturando ou secando o solo esta parcela da resistência desaparece (PINTO, 2006).

O teste de cisalhamento direto é uma maneira de obter os parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo e é baseado na força de ruptura ao longo do plano pré-definido, enquanto sujeito a uma carga normal. Fornece uma medida direta da capacidade da força cisalhante para condições específicas e permite determinar o ângulo de fricção interna e a coesão. A tensão de cisalhamento na caixa do teste de cisalhamento é definida como a resistência ao cisalhamento desenvolvido dentro do plano de deslizamento ao longo da área da seção conhecida da amostra (DAFALLA, 2013).

O objetivo do presente estudo foi avaliar a resistência ao cisalhamento do solo por meio das envoltórias de cisalhamento para amostras de um horizonte Bt argiloso submetido a diferentes teores de umidade, diferentes tensões normais e também avaliar as alterações

decorrentes na coesão e ângulo de atrito interno. Além de aplicar técnicas de estatística multivariada para melhor entender a dinâmica nas distintas situações.

4.2 Material e Métodos

4.2.1 Área de estudo

O estudo foi realizado na estação experimental de cana-de-açúcar da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), localizada na cidade de Carpina, estado de Pernambuco ($7^{\circ}51'13''\text{S}$, $35^{\circ}14'10''\text{W}$), com 180 metros de altitude acima do nível do mar (Fig. 1). A classificação climática da área segundo Köppen é do tipo Ams' sendo conhecido por apresentar chuvas de moções com verão seco. O solo da área selecionada foi classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo Tb Distrófico A moderado, textura média/muito argilosa de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SANTOS et al., 2013).

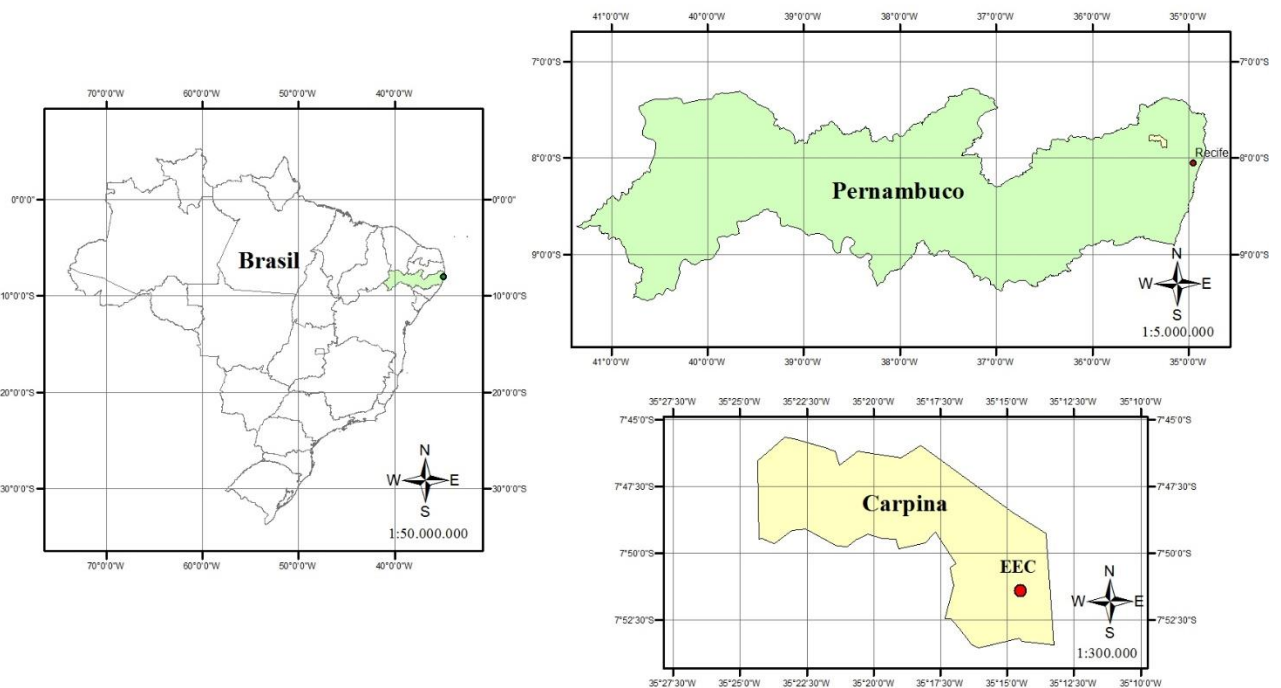


Figura 1. Localização da cidade de Carpina – PE e estação experimental de Carpina (EEC).

4.2.2 Amostragem de solo

A camada superficial do solo foi removida e amostras de solo sem estrutura preservada foram coletadas no horizonte Bt do Argissolo, foram secas ao ar e tamisadas em peneira com abertura de malha de 2 mm. Trinta e duas amostras com estrutura de solo preservada foram coletadas no mesmo local utilizando uma caixa de aço com dimensão retangular (0,06 × 0,06 × 0,043 m), estas amostras foram envolvidas com plástico filme e bolha com a finalidade de proteção durante o transporte e posteriormente foram destinadas à obtenção de parâmetros físico-mecânicos

O horizonte Bt (45-85 cm) apresentava as seguintes propriedades: coloração variegada composta de amarelo brunado (10Y/R 6/8, úmido) e vermelho amarelado (5YR 5/8, úmido); muito argilosa; forte muito pequena a pequena, blocos subangulares e angulares; poros comuns; cerosidade comum e fraca; muito duro, firme, plástico e pegajoso; transição gradual e plana.

4.2.3 Caracterização física e Carbono do solo

Foi realizada análise do teor de carbono orgânico no solo (CO) pelo método da combustão seca e a caracterização granulométrica pelo método do hidrômetro (GEE; OR, 2002), a classe textural foi seguindo a classificação do sistema brasileiro (SANTOS et al., 2013), os resultados são exibidos na Tabela 1.

As outras análises físicas foram: densidade do solo (ρ_s) conforme Grossman e Reinsch (2002); densidade de partículas sólidas do solo (ρ_p) e a porosidade total (α) seguindo metodologia proposta por Flint e Flint (2002).

4.2.4 Ensaios de cisalhamento direto

Foram realizados de acordo com a norma D-3080/98 da Sociedade Americana de Testes e Materiais (ASTM D 3080-98, 2003), conduzidos em uma prensa de cisalhamento direto equipada com uma caixa de metal bipartida onde as amostras era inseridas com o auxílio de uma ferramenta de madeira. A velocidade cisalhante foi de 0,125 mm min⁻¹. As tensões normais utilizadas durante os testes foram: 50, 100, 150 e 200 kPa. Após a aplicação da tensão normal foi aguardado um tempo até a normalização da amostra para em seguida dar início à condução

dos testes. Para cada tensão normal foram utilizadas 4 amostras de solo com estrutura preservada e realizadas 4 repetições, totalizando 16 amostras por tipo de ensaio. As envoltórias de Mohr-Coulomb foram construídas com a média das repetições para cada condição de umidade.

Foi utilizado o ensaio rápido, que é caracterizado pela aplicação simultânea de tensões iniciais: tensão normal e tensão constante de cisalhamento, a última sendo gradativamente aumentada até a ruptura do corpo de prova. A tensão normal foi aplicada simultaneamente com a aplicação da força horizontal na caixa de cisalhamento. Esta força causava um deslocamento à uma velocidade constante na metade da amostra, e a resistência oferecida pela outra metade foi registrada pelo leitor presente no anel dinanométrico (SILVA et al., 2015).

As amostras de solo foram utilizadas em duas condições de umidade: umidade de campo, ou seja, os ensaios de cisalhamento direto foram conduzidos com a umidade de coleta das amostras; umidade de saturação, para esta condição, as amostras foram coletadas e logo que chegaram ao laboratório foi realizado o desbaste dos excessos em todas e colocadas em bandeja com água para completa saturação, no momento do ensaio, cada amostra foi acondicionada na caixa de cisalhamento, que foi totalmente preenchida com água em seguida e as amostras permaneceram nesta condição por 24h até que se desse início aos ensaios de cisalhamento. Foram colocadas placas metálicas porosas com ranhuras no topo e na base do corpo de prova para permitir a livre drenagem da água intersticial e evitar o deslocamento da amostra durante os ensaios.

As leituras da tensão aplicada nas amostras foram realizadas no defletômetro horizontal, que é acoplado à caixa box bipartida, a cada 0,20 mm de deslocamento horizontal até a ruptura da amostra.

Ao final do teste, os dados adquiridos nas Equações 2 e 3 foram obtidos.

$$\sigma_n = \frac{N}{a}, \quad (2)$$

sendo σ_n a tensão normal (kgf cm², kPa); N a força normal aplicada no corpo de prova (kgf, N); a é a área da seção transversal da amostra (cm²);

$$\tau_c = \frac{T}{a}, \quad (3)$$

sendo τ_c a tensão de cisalhamento (kgf cm^2) e T é a força aplicada no corpo de prova (kgf cm^2 , kPa).

A coesão do solo (C) foi determinada utilizando os valores da tensão de cisalhamento direto em cada tensão normal ao final do teste, pela criação de um gráfico com a relação tensão de cisalhamento x tensão normal, ajustado de acordo com a Equação 1. Os valores de coesão foram obtidos pelo intercepto da linha de tendência do ajuste ao eixo das abcissas.

4.2.5 Análise estatística

Técnicas de estatística multivariada e bivariada foram utilizadas para melhor analisar o conjunto de variáveis estudadas. Os atributos considerados foram: argila, silte, areia, densidade do solo (ρ_s) e partículas (ρ_p), umidade do solo (θ), porosidade total (α), carbono orgânico (CO), ângulo de atrito (ϕ), tensão de cisalhamento (τ_c), tensão normal efetiva (σ_n) e coesão (C). O conjunto de dados, com distribuição normal, foi padronizado ($\mu = 0$; $\sigma^2 = 1$) fornecendo para cada variável a mesma contribuição. Após, a técnica de análise de agrupamentos (AA) e análise de componentes principais (ACP) foram utilizadas.

A ACP foi realizada considerando o nível de significância de 5%, com a correlação de Pearson sendo utilizada para criação da matriz de similaridade e subsequente obtenção dos autovalores e autovetores. Para a AA, a distância Euclidiana foi considerada como o método de medida da dissimilaridade entre os dados e o método de Ward foi utilizado para o agrupamento.

4.3 Resultados e Discussão

4.3.1 Caracterização do solo

Apesar da classificação textural ser muito argilosa e notoriamente a quantidade de Argila se destacar, merece destaque também a quantidade de silte encontrado no horizonte Bt do Argissolo em estudo (Tabela 1).

Tabela 1. Carbono orgânico e caracterização granulométrica do horizonte Bt

CO	Areia	Silte	Argila	Classificação textural
%	----- g kg ⁻¹ -----			
0,45	122,72	211,78	665,50	Muito argilosa

A Tabela 2 contém as informações a respeito das densidades do solo (ρ_s) e do teor de umidade inicial (θ_i) e final (θ_f), após os ensaios de cisalhamento direto, nas diferentes tensões normais para as condições umidade de campo e saturação. Para a condição do ensaio saturado considerou-se a porosidade total (α) como a umidade de saturação da amostra pois, o corpo de prova não iria perder umidade após os ensaios de cisalhamento, uma vez que os testes foram realizados com a caixa de cisalhamento preenchida com água.

Tabela 2. Caracterização das amostras utilizadas nos ensaios de cisalhamento direto

Parâmetros	Unidades	50 kPa	100 kPa	150 kPa	200 kPa	Média	Desvio padrão	CV (%)
Umidade de campo								
θ_i	cm ³ .cm ⁻³	0,368	0,368	0,352	0,335	0,356	0,0160	4,49
θ_f	cm ³ .cm ⁻³	0,353	0,353	0,337	0,323	0,342	0,0144	4,21
ρ_s	g.cm ⁻³	1,410	1,404	1,450	1,331	1,399	0,0497	3,55
α	cm ³ .cm ⁻³	0,473	0,475	0,458	0,529	0,484	0,0312	6,44
Umidade de saturação								
ρ_s	g.cm ⁻³	1,413	1,343	1,412	1,294	1,365	0,0577	4,23
α	cm ³ .cm ⁻³	0,468	0,495	0,448	0,513	0,481	0,0285	5,93

Sendo: ρ_s – densidade do solo, θ_i - umidade inicial do solo, θ_f - umidade final do solo, α - porosidade total.

Pelos valores do coeficiente de variação (CV %) fica evidente a homogeneidade da umidade inicial das amostras, conferindo uma maior confiabilidade nos ensaios de cisalhamento realizados para umidade de campo.

4.3.2 Parâmetros de cisalhamento

A Figura 2 contém a relação entre a tensão de cisalhamento (kPa) e a tensão normal efetiva (kPa) em ambas as condições de umidade das amostras.

Apenas a envoltória da tensão de 50 kPa da Figura 2A não atingiu o cisalhamento da amostra, uma vez em que esta ficou abaixo da linha de tendência da equação de ajuste. De acordo com Pinto (2006) não há ruptura se a tensão de cisalhamento não ultrapassar um valor dado pela equação de Mohr-Coulomb, Equação 1. Logo, a tensão cisalhante imposta na amostra sob a tensão normal de 50 kPa foi inferior as tensões de ruptura da amostra, diretamente relacionadas com a coesão, característica do horizonte nessa classe de solos.

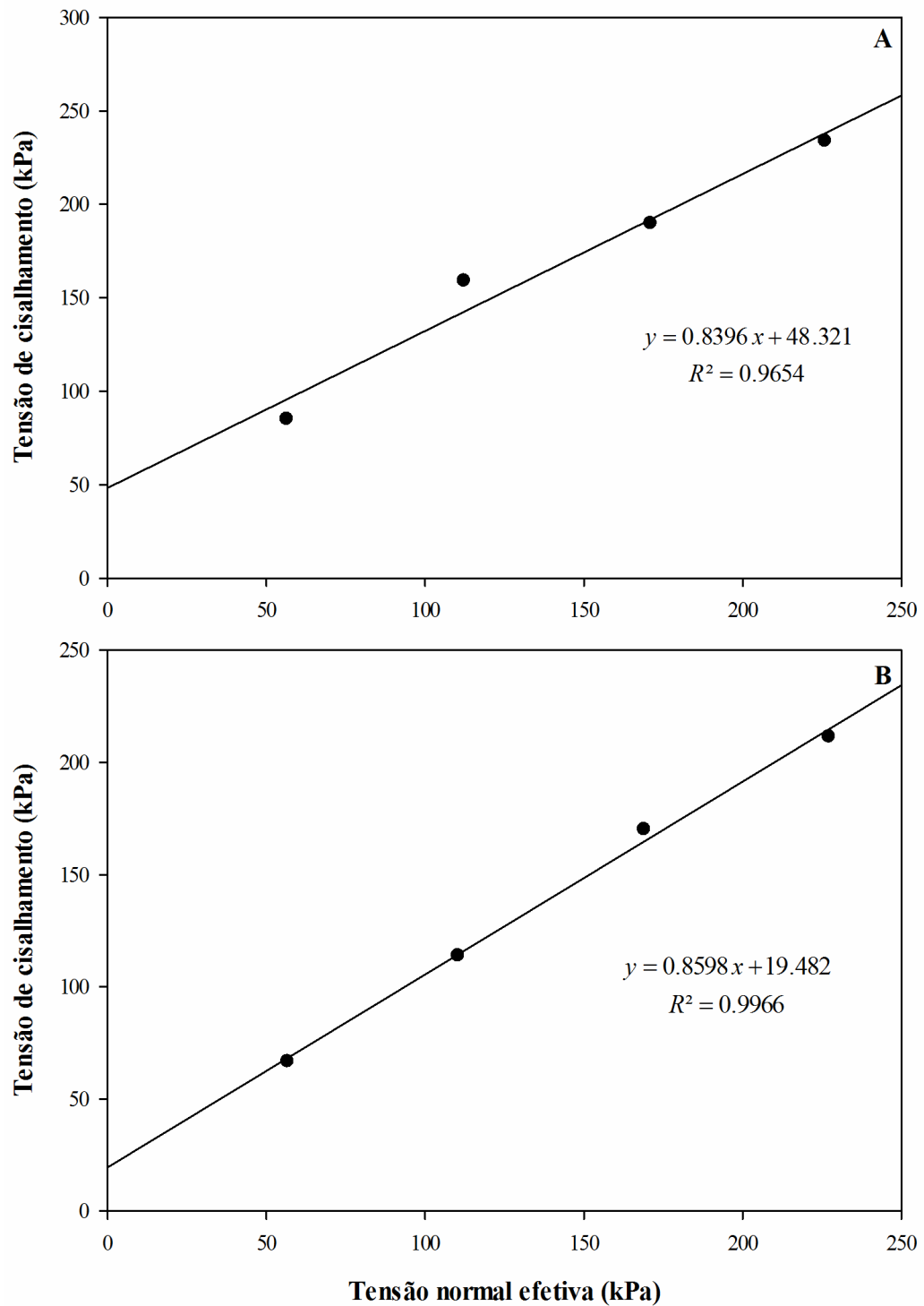


Figura 2. Envoltórias de ruptura do círculo de Mohr-Coulomb. Relação entre tensão de cisalhamento (kPa) e tensão efetiva normal (kPa). A – Umidade de campo, B – Umidade de saturação

Com base nas regressões (Figura 2) foi possível obter os parâmetros de coesão aparente (c) e de ângulo de atrito interno ou coeficiente de atrito ($tg\phi$) entre as partículas sólidas do solo. Para a condição de umidade de campo a coesão, como era de se esperar, demonstrou-se superior, atingindo a marca de 48 kPa, enquanto para a condição de saturação a coesão foi de apenas 19 kPa. O menor teor de água favoreceu a aproximação das partículas, reduzindo a distância entre elas e aumentando a força de atração entre estas, que repercutiu na coesão do solo nas condições do solo em estudo. Estes resultados estão de acordo com Secco et al. (2013), os quais comentam que a coesão (C) aumentou com o decréscimo da saturação nas suas diferentes camadas do solo estudado e que, o resultado era esperado, considerando que as forças coesivas se manifestam mais fortemente com baixo conteúdo de água no solo.

O coeficiente de atrito ($tg\phi$) variou de 40.01° para 40.69° , na condição de umidade de campo e condição de saturação, respectivamente. Para um mesmo solo, o ângulo de atrito interno é tanto maior quanto maior for a densidade, outro fator que afeta o ângulo de atrito interno é a existência de substâncias que atuam como lubrificante entre suas partículas, como água ou substâncias orgânicas (BRAIDA; REICHERT, 2014), que foram presentes em todas as amostras analisadas. Para a presente estudo, a atuação lubrificante da água parece ter sido o fator preponderante para a alteração do ângulo, uma vez que a densidade variou pouco entre as amostras estudadas.

Para condição de saturação, era esperado um ângulo de atrito interno menor em relação a condição drenada (umidade de campo), no entanto, a densidade do solo pode ter sobreposto ao efeito da água no aumento do ângulo de atrito interno. Silva et al. (2015) avaliando a tensão de cisalhamento em solos em ambientes agrícolas sob um Latossolo Vermelho distrófico constataram reduções no ângulo de atrito interno do solo com o aumento da umidade. Desse modo, embasando assim a sobreposição dos efeitos da densidade do solo sobre o conteúdo de água.

Portanto, para o solo em estudo, o elevado ângulo do coeficiente de atrito está associado à elevada densidade encontrada para o horizonte em que foi realizada a coleta das amostras, conforme Tabela 2 e 3. De acordo com Reynolds et al. (2002) valores de densidade entre $1,4$ a $1,6 \text{ g cm}^{-3}$ são considerados restritivos para solos com textura argilosa. No presente estudo foram encontrados valores bem próximos do limite inferior sugerido por estes autores.

Na Figura 3 são apresentadas as curvas de tensões de cisalhamento, τ (kPa), *versus* o deslocamento horizontal, D_H (mm), obtidos nos ensaios para ambas as condições de umidade.

Para o mesmo D_H é perceptível que as amostras com umidade de campo apresentaram uma tensão de cisalhamento um pouco maior, nas respectivas tensões normais efetivas. E com o aumento da tensão normal ocorreu um aumento na tensão cisalhante. Dafalla (2013) estudando os efeitos do conteúdo de argila e água nos testes de cisalhamento direto puderam observar uma queda na resistência ao cisalhamento como resultado do aumento do conteúdo de água para todas as tensões normais aplicadas.

Na condição de umidade de campo apenas na tensão normal de 100 kPa apresentou um pico nítido de cisalhamento (Figura 3A). Já para a situação de saturação não houve nenhum pico de cisalhamento nítido (Figura 3B). Os resultados sugerem que maiores tensões normais deveriam ser aplicadas para que as amostras cisalhassem com um pico bem caracterizado. Com exceção da curva de 100 kPa (Figura 3A), as demais curvas da Figura 3 apresentaram comportamento dúctil, pois não foram observadas diferenças acentuadas entre a tensão de pico e a residual (BARBOSA et al., 2013).

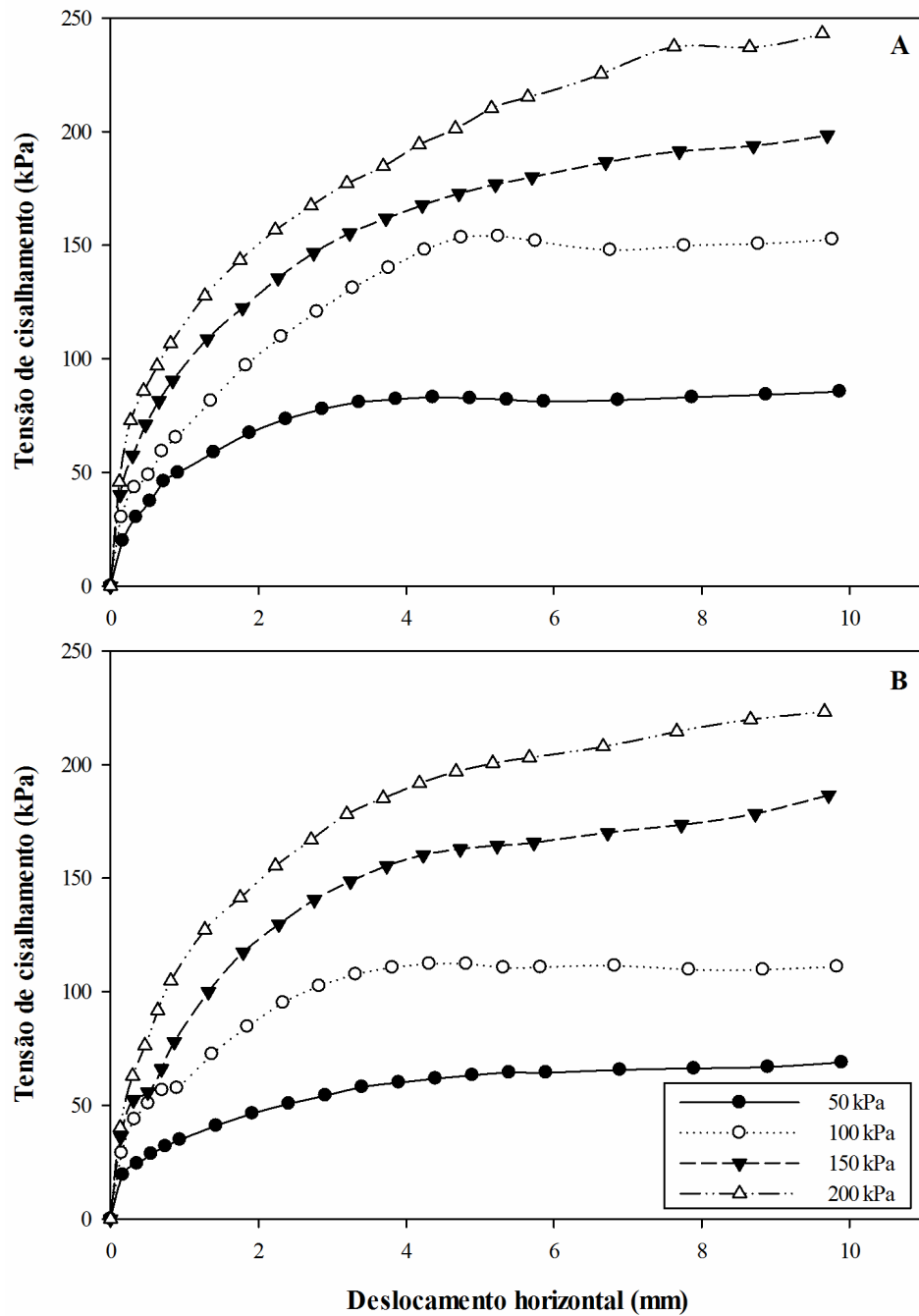


Figura. 3. Tensão de cisalhamento (kPa) x Deslocamento horizontal (mm) para ensaios de cisalhamento direto sob tensões normais e umidades variadas. A – Umidade de campo, B – Umidade de saturação

A Figura 4 contém a relação entre o deslocamento horizontal e o deslocamento vertical. De forma geral, houve uma tendência de compressão das amostras, pela redução do volume destas. Ficou evidente que as curvas para as tensões normais de 50 e 100 kPa tiveram a mesma tendência, enquanto as curvas das tensões de 150 e 200 kPa se aproximaram mais. Comparando as diferentes umidades, percebe-se que para a situação de umidade de campo houve um menor

deslocamento vertical que para a condição saturada. Isto é devido ao fato que na condição de saturação as partículas sólidas do solo conseguem se rearranjar com maior facilidade, devido ao efeito de lubrificação da água, ocasionando uma menor variação de volume.

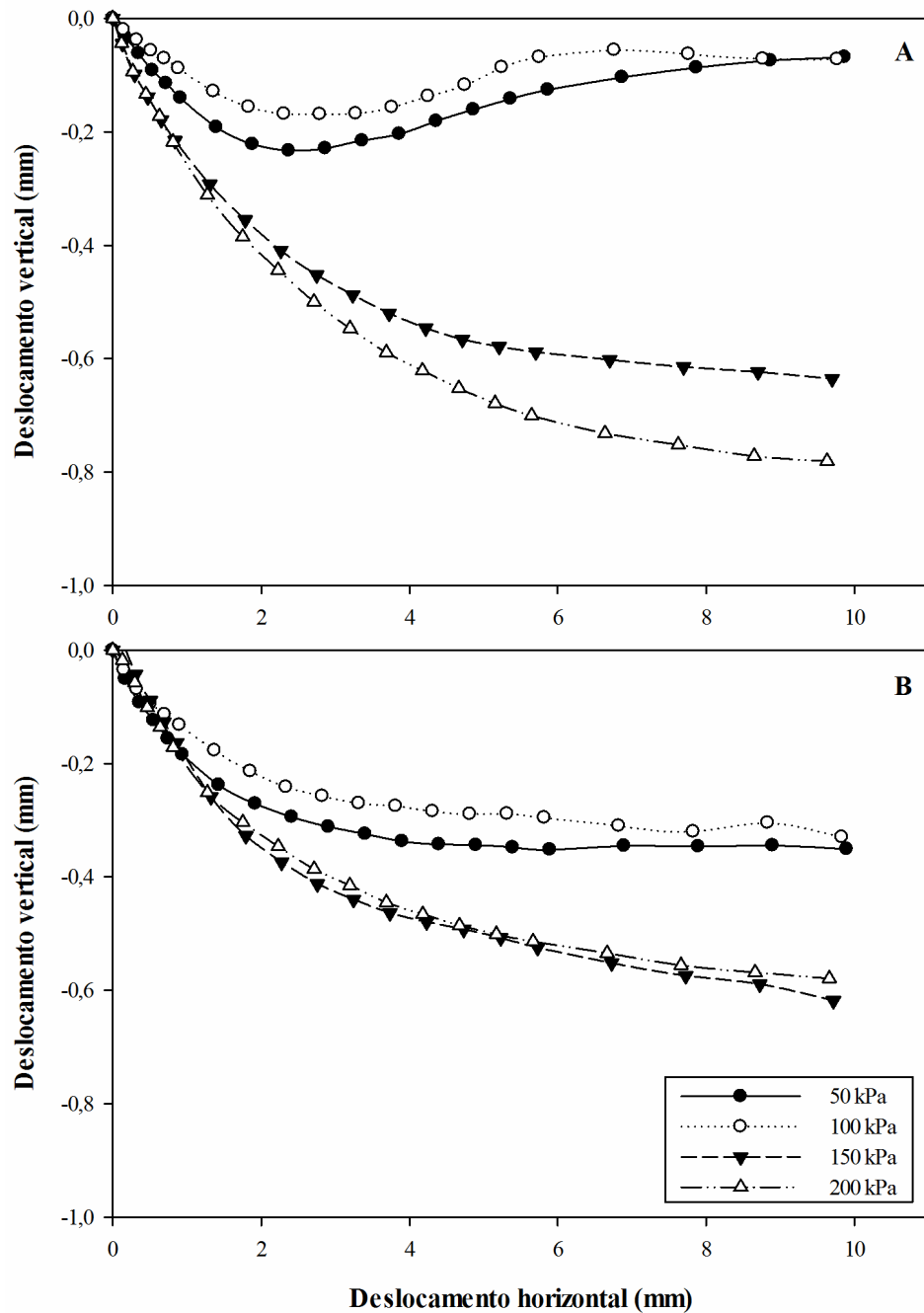


Figura. 4. Relação entre deslocamento vertical (mm) e deslocamento horizontal (mm). A – Umidade de campo, B – Umidade de saturação

4.3.3 Análise multivariada

4.3.3.1 Matriz de correlação

As Tabela 4 e 5 contêm as matrizes de correlação entre as variáveis em estudo para a condição de umidade de campo e na condição de saturação, respectivamente, que foram utilizadas na análise multivariada.

Tabela 3. Matriz de correlação de Pearson para condição de umidade de campo

Variáveis	ρ_s	ρ_p	θ	σ_n	τ_c	\emptyset	Argila	Silte	Areia	α	CO	C
ρ_s	1											
ρ_p	0.10	1										
θ	0.74	-0.23	1									
σ_n	-0.62	0.55	-0.94	1								
τ_c	-0.58	0.67	-0.86	0.98	1							
\emptyset	-0.52	0.77	-0.77	0.94	0.99	1						
Argila	0.19	0.87	-0.41	0.64	0.68	0.71	1					
Silte	0.10	-0.68	-0.15	-0.13	-0.31	-0.46	-0.23	1				
Areia	-0.24	-0.28	0.47	-0.47	-0.38	-0.30	-0.72	-0.51	1			
α	-1.00	-0.10	-0.74	0.62	0.58	0.52	-0.19	-0.10	0.24	1		
CO	0.17	0.93	-0.37	0.63	0.70	0.75	0.99	-0.36	-0.61	-0.17	1	
C	0.85	0.09	0.94	-0.78	-0.67	-0.55	-0.08	-0.30	0.29	-0.85	-0.04	1

Números em negrito são significativos: $p < 0.05$. ρ_s – densidade do solo, ρ_p – densidade de partículas, θ - umidade do solo, α - porosidade total, CO - carbono orgânico, \emptyset - ângulo de atrito, τ_c - tensão de cisalhamento, σ_n - tensão normal efetiva e C – coesão

De acordo com a correlação de Pearson presente na Tabela 4, para a condição de umidade de campo, as variáveis umidade (θ) e densidade do solo (ρ_s) apresentaram uma correlação forte e positiva com a coesão aparente, enquanto que a porosidade total (α), tensão normal efetivamente aplicada (σ_n) e a tensão de cisalhamento (τ_c) foram negativamente correlacionadas com o parâmetro.

Era esperada uma boa correlação entre o teor de argila e a coesão aparente, mas outros parâmetros parecem ter mais influência na determinação da resistência ao cisalhamento em um meio úmido. Deve-se levar em consideração também o tipo de argila presente no solo e sua atividade. Por ser um solo com um processo evolutivo

Para a condição de saturação, Tabela 5, diferentes atributos do solo se tornam mais importantes para o parâmetro de coesão aparente, como o teor de areia e o ângulo de atrito interno. Nota-se também uma correlação positiva quase perfeita entre estes parâmetros e significativa.

Tabela 4. Matriz de correlação de Pearson para a condição saturada

Variáveis	ρ_s	ρ_p	σ_n	τ_c	\emptyset	Argila	Silte	Areia	α	CO	C
ρ_s	1										
ρ_p	-0.29	1									
σ_n	-0.64	0.53	1								
τ_c	-0.60	0.56	1.00	1							
\emptyset	-0.47	-0.32	-0.38	-0.43	1						
Argila	-0.01	0.87	0.62	0.67	-0.75	1					
Silte	0.56	-0.68	-0.12	-0.12	-0.47	-0.23	1				
Areia	-0.39	-0.28	-0.46	-0.50	0.99	-0.72	-0.51	1			
α	-0.95	0.05	0.40	0.35	0.70	-0.28	-0.52	0.62	1		
CO	-0.09	0.93	0.61	0.65	-0.64	0.99	-0.36	-0.61	-0.20	1	
C	0.72	0.11	0.07	0.12	-0.95	0.56	0.60	-0.92	-0.88	0.44	1

Números em negrito são significativos: $p < 0.05$. ρ_s – densidade do solo, ρ_p – densidade de partículas, α – porosidade total, CO – carbono orgânico, \emptyset – ângulo de atrito, τ_c – tensão de cisalhamento, σ_n – tensão normal efetiva e C – coesão.

4.3.3.2 Análise de agrupamento (AA)

A Figura 5 contém os dendrogramas entre as variáveis em estudo para a condição de umidade de campo (A) e na condição de saturação (B), respectivamente. Para a condição de saturação foi considerada a porosidade total como a umidade de saturação. A elaboração da análise de agrupamento permitiu visualizar quais variáveis eram mais importantes em cada situação de umidade para o ensaio de cisalhamento e determinação do parâmetro de coesão do solo.

Para ambas as situações foram formados três grupos de variáveis distintas. Para a Figura 5A o parâmetro de coesão formou um grupo distinto com a umidade inicial, densidade do solo e areia, apenas. Portanto, estes parâmetros foram os mais importantes para os resultados obtidos na umidade de campo. De fato, a densidade do solo, assim como a umidade inicial eram parâmetros esperados por ter grande influência no cisalhamento do solo sob umidade de campo.

Silva e Carvalho (2007) avaliaram o comportamento mecânico de horizonte coeso de um Latossolo Amarelo de tabuleiro costeiro, por meio de determinações da coesão, resistência ao cisalhamento e ângulo de atrito interno do solo e concluíram que os maiores valores de coesão e resistência ao cisalhamento do solo foram reflexo do maior valor de densidade do solo.

Para a Figura 5B, a coesão também formou um grupo com a densidade do solo, porém, agora o silte foi presente. Além de ser uma partícula inerte, o silte apresenta sedosidade

característica, o que facilita o deslizamento das partículas sólidas do solo durante o deslocamento horizontal forçado nos ensaios de cisalhamento direto.

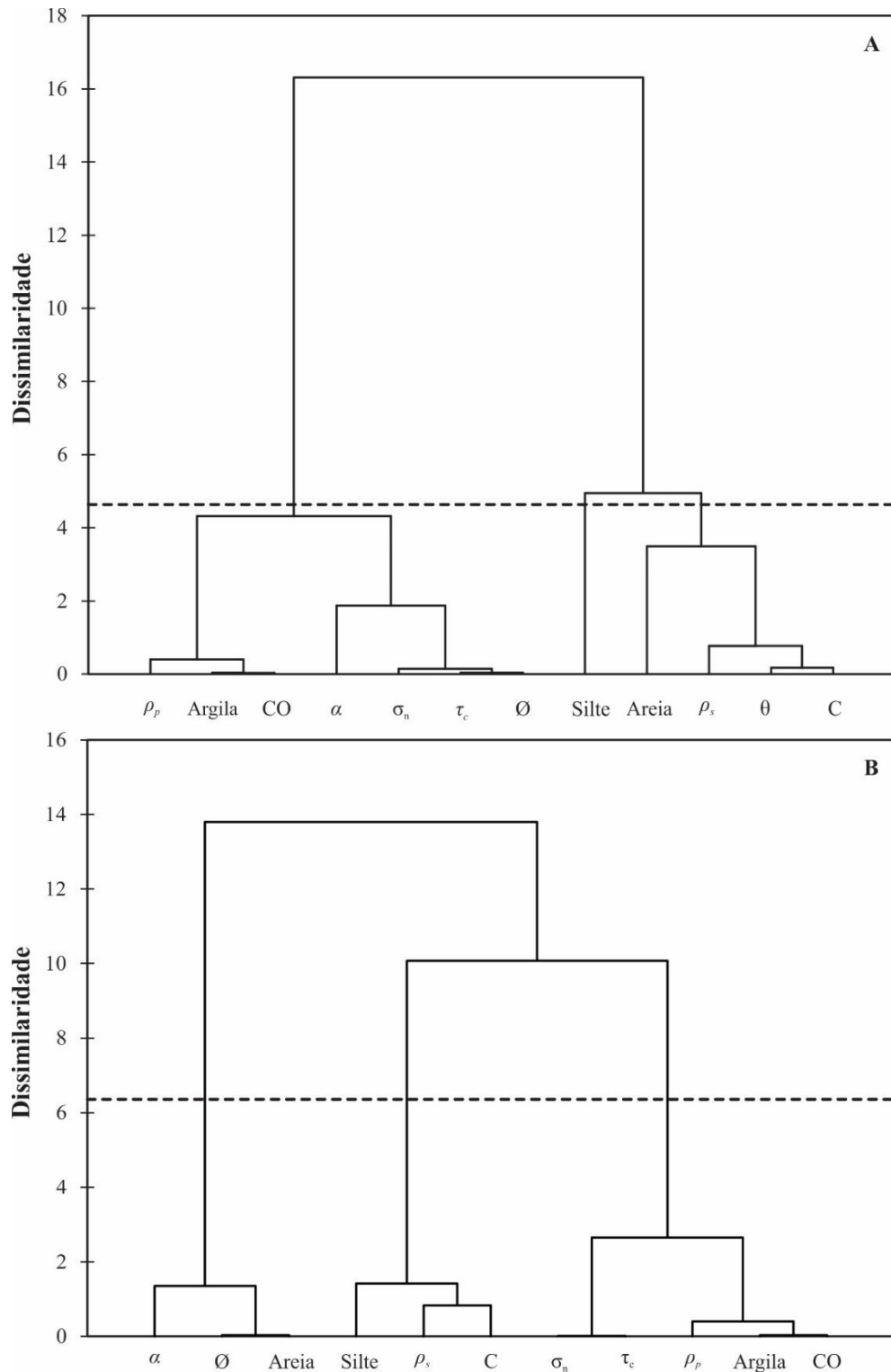


Figura. 5. Dendrograma representando a similaridade, baseado no método de Ward. A – Umidade de campo e B – Umidade de saturação. Sendo: ρ_s – densidade do solo, ρ_p – densidade de partículas, θ - umidade do solo, α - porosidade total, CO - carbono orgânico, \emptyset - ângulo de atrito, τ_c - tensão de cisalhamento, σ_n - tensão normal efetiva e C - coesão

4.3.3.3 Análise de componentes principais (ACP)

A ACP realizada teve por objetivo identificar as variáveis que tiveram maior responsabilidade sobre a variância total dos dados e também aquelas que tiveram mais influência sobre o parâmetro de coesão aparente do solo (C). As Tabela 5 e Tabela 6 contém, respectivamente, para a condição de umidade de campo e saturada, as informações sobre os autovalores e sua contribuição percentual parcial e acumulada para cada componente principal, além da correlação entre as variáveis e cada componente. Optou-se pela elaboração dos gráficos apenas com os componentes que contribuíram de forma mais significativa, neste caso, os componentes principais 1 e 2.

Tabela 5. Autovalores, percentual de cada componente na variância total e correlação entre variáveis e componentes principais para umidade de campo.

Variáveis	C1	C2	C3
ρ_s	-0,568	-0,787	0,242
ρ_p	0,642	-0,688	-0,338
θ	-0,892	-0,373	-0,256
σ_n	0,993	0,095	0,071
τ_c	0,996	-0,005	-0,087
\emptyset	0,970	-0,109	-0,216
Argila	0,697	-0,695	0,176
Silte	-0,231	0,324	0,917
Areia	-0,448	0,380	-0,809
α	0,568	0,787	-0,242
CO	0,701	-0,712	0,034
C	-0,704	-0,655	-0,274
Autovalor	6,499	3,541	1,959
Variabilidade (%)	54,162	29,508	16,329
Variabilidade acumulada (%)	54,162	83,671	100,000

Sendo: ρ_s – densidade do solo, ρ_p – densidade de partículas, θ – umidade do solo, σ_n - tensão normal efetiva, τ_c - tensão de cisalhamento, \emptyset - ângulo de atrito, α - porosidade total, CO - carbono orgânico e C – coesão

Tabela 6. Autovalores, percentual de cada componente na variância total e correlação entre variáveis e componentes principais para condição de saturação

Variáveis	C1	C2	C3
ρ_s	-0,211	0,932	-0,293
ρ_p	-0,617	-0,608	-0,500
σ_n	-0,579	-0,670	0,465
τ_c	-0,625	-0,646	0,438
\emptyset	0,937	-0,328	-0,120
Argila	-0,928	-0,291	-0,234
Silte	-0,155	0,759	0,632
Areia	0,927	-0,285	-0,244
α	0,494	-0,823	0,282
CO	-0,865	-0,390	-0,317
C	-0,796	0,605	0,026
Autovalor	5,396	4,150	1,454
Variabilidade (%)	49,058	37,726	13,215
Variabilidade acumulada (%)	49,058	86,785	100,000

Sendo: ρ_s – densidade do solo, ρ_p – densidade de partículas, σ_n - tensão normal efetiva, τ_c - tensão de cisalhamento, \emptyset - ângulo de atrito, α - porosidade total, CO - carbono orgânico e C – coesão

Para a condição de umidade de campo, Figura 6A, o parâmetro da coesão aparente (C) ficou no terceiro quadrante do gráfico de dispersão, juntamente com os parâmetros de densidade do solo (ρ_s) e umidade (θ), demonstrando a importante influência destes para a C. De maneira oposta, a porosidade total (α), tensão normal efetiva (σ_n) e tensão cisalhante (τ_c) foram dispostos no quadrante oposto, demonstrando uma correlação negativa com a coesão para esta condição de umidade.

De maneira semelhante, a densidade do solo (ρ_s) também foi um atributo importante para a coesão aparente (C) na condição de saturação, Figura 6B, entretanto, o silte agora demonstrou-se ser importante também enquanto que a areia, porosidade total (α) e ângulo de atrito interno (\emptyset) apresentaram uma correlação negativa com a C. É possível notar que a maioria das variáveis, para ambos os gráficos, ficaram dispostas próximas ao círculo unitário, o que conota importância para a explicação da variabilidade dos dados (MOTA et al., 2014).

Conhecido por ser uma partícula inerte, que não apresenta desenvolvimento de cargas permanentes ou dependentes de pH, a depender do tamanho da partícula, e com característica de sedosidade, o silte parece ter atuado como uma partícula lubrificante no deslocamento do solo, facilitando a ruptura no plano imposto no presente estudo.

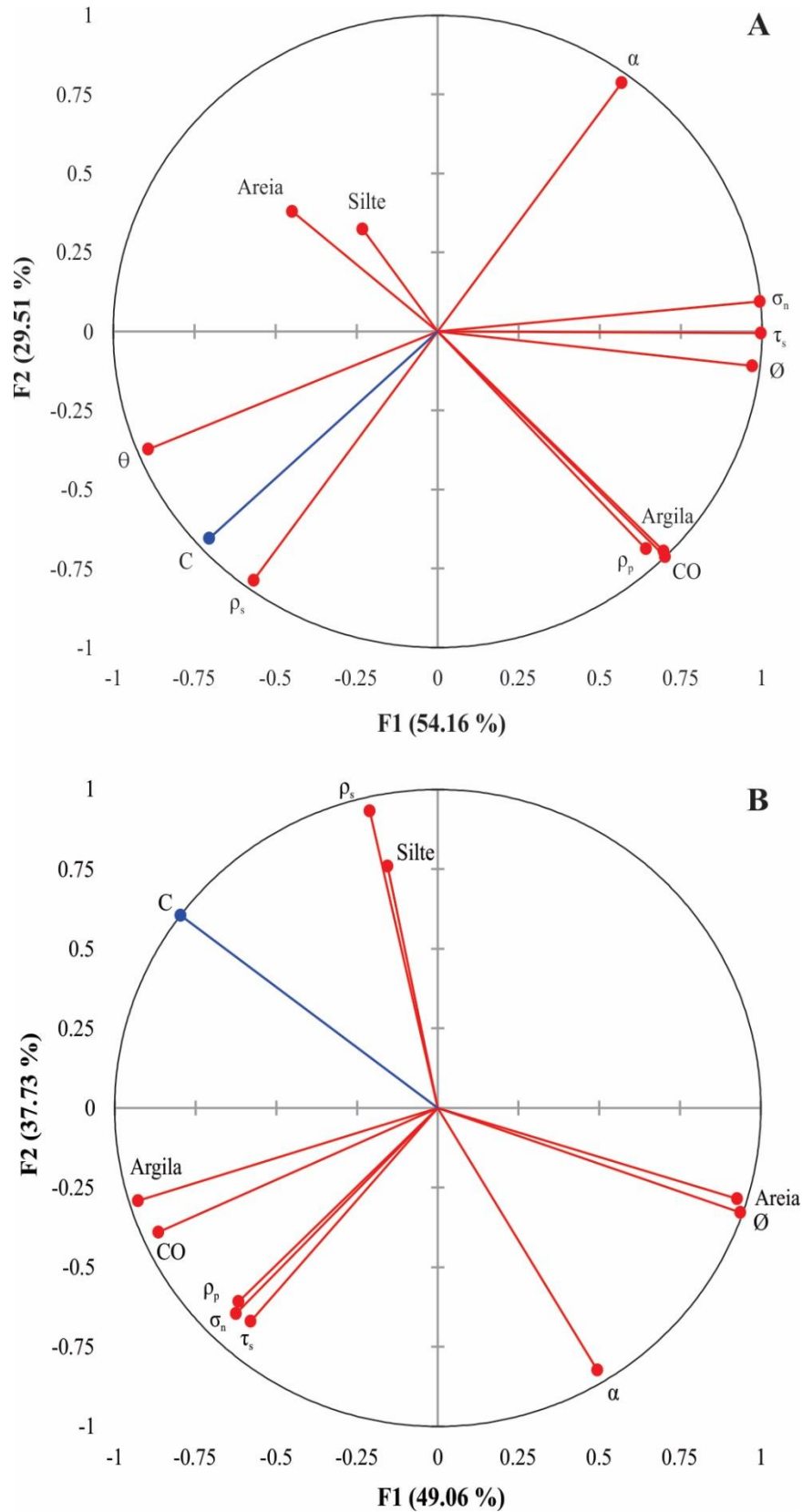


Figura 6. Dispersão dos tributos físicos e mecânicos para A – Umidade de campo e B – Umidade de saturação. Sendo: ρ_s – densidade do solo, ρ_p – densidade de partículas, θ – umidade do solo, σ_n – tensão normal efetiva, τ_c – tensão de cisalhamento, ϕ – ângulo de atrito, α – porosidade total, CO - carbono orgânico e C – coesão

4.3.4 Conclusões

Como efeito da maior proximidade entre as partículas sólidas, possibilitando uma maior ligação entre estas, as tensões cisalhantes foram maiores para a condição de umidade de campo; enquanto que para a condição saturada o oposto foi verificado, em razão do efeito lubrificante da água e enfraquecimento das ligações entre as partículas.

Em que pese o teor elevado de argila do solo, de acordo com a matriz de correlação de pearson e a técnica multivariada de agrupamento, esta fração não apresentou significância para o parâmetro da coesão aparente do solo.

Apenas com a utilização da técnica multivariada de componentes principais foi possível visualizar a importância da fração silte no parâmetro de coesão aparente no solo, demonstrando a importância da multivariada no entendimento do fenômeno.

Agradecimentos

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), que concedeu a bolsa de Doutorado, e à Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE).

Referências

- ASTM D 3080-98. Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions. In: **Annual Book of ASTM Standards**. West Conshohocken, PA: [s.n.]. p. 347–352.
- BARBOSA, M. C. R, MOTA DE LIMA, H. et al. Resistência ao cisalhamento de solos e taludes vegetados com capim vetiver. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 1, p. 113–120, fev. 2013.
- BLANCO-CANQUI, H., LAL, R., OWENS, L. B., POST, W. M., IZAURRALDE, R. C. Strength Properties and Organic Carbon of Soils in the North Appalachian Region. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 69, n. 3, p. 663, 2005.
- BRAIDA, J. A.; REICHERT, J. M. Matéria orgânica e comportamento mecânico para fins de manejo do solo. In: LEITE, L. F. C.; MACIEL, G. A.; ARAÚJO, A. S. F. DE (Eds.). . **Agricultura conservacionista no Brasil**. 1ª ed. Brasília-DF: Embrapa Meio-Norte, 2014. p. 598.
- DAFALLA, M. A. Effects of clay and moisture content on direct shear tests for clay-sand mixtures. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2013, p. 8, 2013.
- EKWUE, E. I. Organic-matter effects on soil strength properties. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, Amsterdam, v. 16, n. 3, p. 289–297, maio 1990.
- EKWUE, E. I.; BIRCH, R. A.; CHADEE, N. R. A comparison of four instruments for measuring the effects of organic matter on the strength of compacted agricultural soils. **Biosystems Engineering**, London, v. 127, p. 176–188, 2014.
- FLINT, L. E.; FLINT, A. L. Porosity. In: DANE, J. H.; TOPP, C. G. (Eds.). . **Methods of Soil Analysis: Part 4. Physical Methods**. SSSA Book Series. 5. ed. Madison, WI: Soil Science Society of America, 2002. p. 241–253.
- GEE, G. W.; OR, D. Particle-size Analysis. In: DANE, J. H.; TOPP, G. C. (Eds.). . **Methods of Soils Analysis**. 3. ed. Madison: Soil Science Society of America, 2002. p. 255–293.
- GROSSMAN, R. B.; REINSCH, T. G. Bulk Density and Linear Extensibility. In: DANE, J. H.; TOPP, C. G. (Eds.). . **Methods of Soil Analysis: Part 4. Physical Methods**. SSSA Book Series. 5. ed. Madison, WI: Soil Science Society of America, 2002.
- MOTA, J. C. A., ALVES, C. V. O., FREIRE, A. G., DE ASSIS JÚNIOR, R. N. Uni and multivariate analyses of soil physical quality indicators of a Cambisol from Apodi Plateau – CE, Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 140, p. 66–73, jul. 2014.
- PARTHENIADES, E. **Cohesive Sediments in Open Channels: Properties, Transport and Applications**. 1. ed. United States of America: Elsevier, 2009.
- PINTO, C. DE S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas**. 3ª ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

REYNOLDS, W. D., BOWMAN, B. T., DRURY, C. F., TAN, C. S., LU, X. Indicators of good soil physical quality: density and storage parameters. **Geoderma**, Amsterdam, v. 110, n. 1–2, p. 131–146, nov. 2002.

ROY, S.; DASS, G. Statistical models for the prediction of shear strength parameters at. **International Journal of Civil and Structural Engineering**, New York, v. 4, n. 4, p. 483–498, 2014.

SANTOS, H. G. DOS; ALMEIDA, J. A.; OLIVEIRA, J. B. DE; LUMBRERAS, J. F.; ANJOS, L. H. C. DOS; COELHO, M. R.; JACOMINE, P. K. T.; CUNHA, T. J. F.; OLIVEIRA, V. Á. DE. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3. ed. Brasília-DF: Embrapa, 2013.

SECCO, D., REINERT, D. J., REICHERT, J. M., KAISER, D. R., DE MARINS, A. C. Shear parameters associated with compaction states and degrees of water saturation in two Hapludox. **African Journal of Agricultural Research**, Victoria Island, v. 8, n. xx, 2013.

SILVA, A. J. N. DA; CARVALHO, F. G. DE. Coesão e resistência ao cisalhamento relacionadas a atributos físicos e químicos de um Latossolo Amarelo de tabuleiro costeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 5, p. 853–862, out. 2007.

SILVA, R. B. D., JUNIOR, D., DE SOUZA, M., IORI, P., SILVA, F. A. D. M., FOLLE, S. M., SOUZA, Z. M. D. Prediction of soil shear strength in agricultural and natural environments of the Brazilian Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 50, n. 1, p. 82–91, jan. 2015.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em que pese o resultado satisfatório das velocidades permissíveis obtidas pela utilização da equação proposta por Mirskhoulava, ainda são necessários mais trabalhos visando uma conclusão definitiva sobre sua eficácia.

Com a variação no teor de umidade das amostras de solo nos ensaios de cisalhamento direto foi possível determinar quais variáveis são mais influentes em cada condição. A utilização de técnicas da estatística multivariada permitiu uma melhor avaliação dos parâmetros influentes no cisalhamento do solo em estudo.