



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

LAYANE CARMEM ARRUDA DA ROCHA

**EQUAÇÕES DE VELOCIDADE CRÍTICA E HIDRÁULICA DE
ESCOAMENTO SUPERFICIAL EM CANAIS DE LEITO ARGILOSO**

RECIFE - PE
2020

LAYANE CARMEM ARRUDA DA ROCHA

**EQUAÇÕES DE VELOCIDADE CRÍTICA E HIDRÁULICA DE
ESCOAMENTO SUPERFICIAL EM CANAIS DE LEITO ARGILOSO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, da Universidade Federal Rural de Pernambuco, para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Prof. Dr. José Ramon Barros Cantalice
Orientador

RECIFE - PE
2020

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA RURAL

EQUAÇÕES DE VELOCIDADE CRÍTICA E HIDRÁULICA DE
ESCOAMENTO SUPERFICIAL EM CANAIS DE LEITO ARGILOSO

LAYANE CARMEM ARRUDA DA ROCHA

Aprovado em: 03 de agosto de 2020.

Prof. Dr. José Ramon Barros Cantalice - UFRPE
Orientador - PPEAMB

Dr. Valdemir de Paula e Silva Junior
Membro Externo

Prof. Dr. Fernando Cartaxo Rolim Neto
Membro Interno – PPEAMB

*A todos que contribuíram diretamente e indiretamente
durante toda a minha formação, até os dias atuais.*

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter me dado coragem, força e saúde para concluir esse grande desafio que é a pós-graduação.

A minha amada mãe, Maria do Carmo Arruda da Rocha, e a minha amada tia, Viviane Carmem de Arruda Dourado, que foram fundamentais durante todo o curso, principalmente no apoio psicológico. Também as minhas primas, Clarisse de Arruda Dourado e Rayane de Arruda Dourado que sempre me alegraram e me deram um apoio tão forte.

Ao meu orientador, José Ramon Barros Cantalice, por todos os ensinamentos, compreensão, dedicação e disponibilidade durante toda a trajetória.

Ao Professor Paulo Medeiros, que me deu suporte durante a escrita do projeto inicial.

Aos meus amigos do Laboratório de Engenharia de Manejo e Conservação do Solo (UFRPE), em especial Adalberto, André, Júlio, Leno e Edgo, que sempre estiveram comigo e acompanharam toda a trajetória.

Também aos meus amigos do Laboratório de Física do Solo (UFRPE), principalmente ao técnico Eudes, por todas as conversas e ajudas.

A minha amiga de turma Tamires, juntas compartilhamos diversos momentos e demos força uma a outra. E claro, ao meu namorado e também amigo de turma, Maykon Rodrigo Gomes de Barros, que foi peça fundamental para que eu pudesse concluir mais essa etapa da minha vida.

A minha amiga Pâmela Oliveira, que mesmo distante esteve me apoiando e me dando ânimo em momentos difíceis.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, e claro, à secretária Walkiria Brito que sempre esteve a disposição.

A Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia de Pernambuco (FACEPE) pela concessão da bolsa durante o programa de mestrado acadêmico, na Universidade Federal Rural de Pernambuco.

“A vida é como as águas de um rio, sempre em frente. Ela nos leva aonde temos que ir”.

Athos Rodrigues

RESUMO

Uma melhor definição de velocidade crítica do fluxo em meio coesivo ainda se faz necessária, nos dias atuais, na engenharia hidráulica ligada aos sistemas fluviais e aos projetos em leito argiloso. A maioria das equações disponíveis são para leitos arenosos, não levando em conta a coesão e as tensões críticas de cisalhamento dos leitos argilosos. Dessa forma, com o objetivo de obter-se uma equação de velocidade do escoamento concentrado crítica ou permissível para canais de leito argiloso, realizou-se uma análise dimensional aos dados experimentais considerando-se os parâmetros hidráulicos e os parâmetros do meio coesivo/argiloso que governam a velocidade do escoamento superficial concentrado. Os dados experimentais foram obtidos em canais pré-formados em leito argiloso com proporção de 60% de argila e sobre aplicação de níveis crescentes de fluxos. Observou-se que as tensões de cisalhamento geradas pelos fluxos aplicados não foram suficientes para atingir a tensão crítica de cisalhamento de 120 Pa do leito dos canais argilosos, para que assim se desse início ao processo de desagregação significativa nesses canais, por conta do alto teor de argila do leito. A análise dimensional com base no Teorema de Buckingham produziu uma nova relação para previsão da velocidade permissível em canais de leito argiloso.

Palavras-chaves: análise dimensional para velocidade em leito argiloso, erodibilidade de leito argiloso, tensão crítica de leito coesivo, coesão.

ABSTRACT

Better criteria to define the permissible flow velocity in cohesive channels still are necessary nowadays, in the hydraulic engineering linked to fluvial systems and to hydraulic projects under clayey beds. Most of the flow velocity equations were developed to sand beds, not considering the critical shear stress and cohesion from clayey beds. In this sense, with the objective to obtain a flow velocity equation to cohesive beds, dimensional analysis was applied to experimental data considering hydraulic variables and cohesive parameters that govern the concentrated flow velocity in these conditions. The experimental data were obtained in pre-formed channels in a cohesive bed constitute 60% clay proportion, and under increasing levels flow applied. The shear stress generated by applied flows weren't able to the critical shear stress of the cohesive bed channels (120 Pa), to significantly begin the detachment process on cohesive beds, due to channels high clay content. Based in Buckingham theorem the dimensional analysis developed a new equation to predict permissible flow velocity in clayey channels.

Keywords: dimensional analysis; flow velocity in cohesive beds; cohesive bed erodibility; critical shear stress from cohesive beds; bed cohesion channels.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama das forças que atuam sobre uma partícula de sedimento no fluxo de canal aberto.....	22
Figura 2. Diagrama de Shields modificado plotando o parâmetro Shields (ψ) em função do tamanho de partícula de solo sem dimensão D^*	35
Figura 3. Localização da Área em estudo	39
Figura 4. Canal construído na Estação Experimental de Carpina-PE	40
Figura 5. Detalhe de parte do equipamento utilizado para o ensaio de cisalhamento direto do solo do leito argiloso, no Laboratório de Engenharia de Manejo e Conservação do Solo da UFRPE.....	42
Figura 6. Relação Potencial das Tensões Cisalhantes (Pa) e das Descargas líquidas obtidas nos canais de leito argiloso ($m^3 s^{-1}$)	49
Figura 7. Relação Potencial do Raio Hidráulico (m) x Descarga líquida ($m^3 s^{-1}$) obtidas nos canais de leito argiloso.....	50
Figura 8. Comportamento da rugosidade hidráulica em função da velocidade média do escoamento concentrado nos canais de leitos argilosos	51
Figura 9. Relação entre as taxas de desagregação (D_r) nos canais de leito argiloso e as tensões de cisalhamento do fluxo (τ_f) observados	52
Figura 10. Comportamento do parâmetro Shields, conforme a equação proposta por Zhang e Yu (2017), em relação ao diâmetro adimensional do sedimento argiloso.....	53
Figura 11. Relação entre a Concentração de sedimentos e a tensão cisalhante produzida, nos canais de leito argiloso.....	54
Figura 12. Relação exponencial entre a concentração de sedimentos e a tensão produzida, nos canais argilosos	54
Figura 13. Relações entre os parâmetros adimensionais dependentes e independentes	57
Figura 14. Regressão entre a velocidade permissível calculada pela Equação de Mirtskhoulava e pelo termo π_1 produzido a partir do experimento nos canais de leito argiloso	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Velocidades médias máximas permitidas em canais abertos	26
Tabela 2. Caracterização granulométrica e carbono orgânico.....	41
Tabela 3. Caracterização física do leito argiloso dos canais pré-formados.....	41
Tabela 4. Variáveis hidráulicas globais obtidas a partir dos fluxos ensaiados nos canais construídos em leito argiloso.....	48
Tabela 5. Parâmetros obtidos no experimento para canais coesivos.....	51
Tabela 6. Valor numérico dos termos Π obtidos e envolvidos no fenômeno da velocidade do escoamento em canais de leito argiloso.....	56
Tabela 7. Velocidades Permissíveis ($m s^{-1}$) calculadas segundo Mirtskhoulava (1966b) e de acordo com o π_1 produzido a partir do experimento nos canais de leito argiloso pré- formados	58
Tabela 8. Matriz de coeficiente de correlação para os termos Π	60
Tabela 9. Matriz do coeficiente de correlação de Pearson para os termos adimensionais obtidos para os canais construídos em leito argiloso.....	61

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Definição	Dimensão
$(u_b)_{cr}$	Velocidade crítica do leito	$L T^{-1}$
θ	Umidade do solo	adm
θ_{cr_c}	Condição crítica de movimento para sedimento coeso	adm
θ_{cr}	Parâmetro crítico de Shields	adm
γ_s	Peso específico do sedimento	$M L^{-2} T^{-2}$
π_n	Parâmetros Pi	adm
ρ_s	Densidade do sedimento	$M L^{-3}$
ρ_{solo}	Densidade do solo	$M L^{-3}$
τ_f	Tensão de falha	$M L^{-1} T^{-2}$
τ_n	Tensão normal	$M L^{-1} T^{-2}$
τ_r	Tensão produzida	adm
τ_y	Tensão produzida	$M L^{-1} T^{-2}$
\emptyset	Ângulo de atrito interno entre as partículas do solo	Graus
a	Área da seção transversal da amostra	L^2
A	Área	L^2
A''	Coefficiente do sedimento	adm
c	Coesão do solo	$M L^{-1} T^{-2}$
C_D	Coefficientes de arrasto	adm
C_f	Coesão na ruptura	$M L^{-1} T^{-2}$
C_L	Coefficientes de elevação	adm
C_s	Concentração de sedimentos	$M L^{-3}$
d	Diâmetro da partícula	L
D	Profundidade da Água	L
D^*	Tamanho da partícula	adm
d_{50}	Diâmetro característico da partícula	L
D_r	Taxa de desagregação do solo	$M L^{-2} T^{-1}$
f	Coefficiente de Darcy– Weisbach	adm
F_D	Força de arraste hidrodinâmico	adm
F_L	Força de elevação	adm
g	Aceleração da Gravidade	$L T^{-2}$
K	Coefficiente de homogeneidade de teor de argila	adm
k_1 e k_2	Fatores de forma da partícula	adm
k_4	Constante	adm
K_r	Erodibilidade	$T M^{-1}$
L	Comprimento do canal	L
m	Coefficiente de trabalhabilidade	adm
n'	Coefficiente de sobrecarga	adm
P_m	Perímetro molhado	L
Q	Descarga líquida	$L^3 T^{-1}$
Q_n	Fluxos aplicados	$L^3 T^{-1}$
Re^*	Reynolds de partícula	adm
R_h	Raio Hidráulico	L
S	Declividade média do canal	$L L^{-1}$
u_b	Velocidade do fluido no leito do canal	$L T^{-1}$

V_m	Velocidade Média	$L T^{-1}$
V_p	Velocidade permissível	$L T^{-1}$
W	Peso específico da partícula submersa	$M L^{-2} T^{-2}$
ν	Viscosidade cinemática da água	$L^3 T^{-1}$
τ_0	Tensão de cisalhamento	$M L^{-1} T^{-2}$
τ_c e τ	Tensão crítica de cisalhamento	$M L^{-1} T^{-2}$
α	Coefficiente de probabilidade mínima de resistência do solo	adm
α'	Inclinação do leito	Graus
α''	Porosidade total	adm
ρ	Densidade da água	$M L^{-3}$
φ	Ângulo de repouso	Graus
γ	Peso específico da água	$M L^{-2} T^{-2}$
ξ	Parâmetro obtido por vários experimentos	adm

LISTA DE SIGLAS

adm	Adimensional
M	Unidade de massa
L	Unidade de comprimento
T	Unidade de tempo
EECAC	Estação Experimental de Cana-de-Açúcar de Carpina
B _t	B textural
SI	Sistema Internacional de Unidades
R ²	Coefficiente de determinação
π	Grupos Pi
σ	Desvio padrão
m	Parâmetros repetentes
k	Número de variáveis dimensionais

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
2 OBJETIVOS	19
2.1 Objetivo Geral	19
2.2 Objetivos Específicos	19
3 REVISÃO DE LITERATURA	20
3.1 A erosão e o transporte de sedimentos em leitos argilosos	20
3.2 Início de movimento	21
3.3 Critérios de início de movimento	23
<i>3.3.1 Equações de velocidade crítica</i>	25
<i>3.3.2 Critérios da tensão crítica de cisalhamento</i>	27
<i>3.3.3 Critério da força de elevação</i>	28
<i>3.3.3.1 Erodibilidade e tensão crítica de cisalhamento do solo/leito</i>	29
<i>3.3.3.2 Resistência mecânica do solo sob cisalhamento direto</i>	30
3.4 Erosão e início de movimento em leitos argilosos	32
3.5 Parâmetro crítico de Shields para sedimento coeso	33
3.6 Hidráulica do escoamento concentrado em leitos argilosos	36
3.7 Análise dimensional para as condições de início de movimento	37
4 MATERIAL E MÉTODOS	39
4.1 Área de estudo e descrição do esquema experimental	39
4.2 Parâmetros analisados	43
<i>4.2.1 Descarga líquida (Q), Raio hidráulico (R_h), Velocidade média (V_m) e Declividade (S)</i>	43
<i>4.2.2 Coeficiente de Darcy– Weisbach (f)</i>	43
<i>4.2.3 Tensão crítica de cisalhamento</i>	44
4.3 Parâmetro crítico de Shields para sedimento coeso	44
4.4 Análise dimensional	45
4.5 Velocidade permissível segundo Mirtskhoulava (1966a)	46
4.6 Análise estatística e regressão múltipla	47
5 RESULTADO E DISCUSSÃO	48
5.1 Características globais da hidráulica de escoamento concentrado em canais de leito argiloso	48
5.2 Resistência: tensão crítica de cisalhamento e erodibilidade do leito argiloso	50

5.3 Análise dimensional e velocidade permissível em canais de leito argiloso	55
<i>5.3.1 Regressão Múltipla.....</i>	<i>60</i>
6 CONCLUSÕES.....	62
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64

1 INTRODUÇÃO

A construção de canais é uma obra comum na engenharia. Entretanto, esse tipo de construção causa impactos ambientais que, por sua vez, estão associados, dentre tantos outros fatores, aos processos erosivos. Para dimensionamento e construção de um canal, devem ser levados em consideração diversos fatores hidráulicos, hidrológicos, como também a gênese e morfologia do solo.

Vaezi et al. (2018) enfatizam a importância de se entender o papel da estrutura do solo na resistência à erosão hídrica e sua relação com outras propriedades importantes do solo. Além disso, é comum ocorrer a desagregação de sedimento em canais, e isso já vem sendo estudado por diversos autores, dentre eles podemos citar Cassol et al. (2004) e Khanal et al. (2016). Na literatura, é comum encontrarmos pesquisas realizadas em canais de leito não coesivo, justamente no que diz respeito aos processos erosivos e dimensionamentos. Já para leito coeso, autores como Utley e Wynn (2008) relatam que dentre as pesquisas existentes sobre a erosão em leitos argilosos, os dados disponíveis para um melhor embasamento sobre dimensionamento de canais ainda são limitados.

Luna (2013) aponta que para evitar erosão em qualquer que seja o material no qual o canal foi construído é necessário que os limites tanto de velocidade do escoamento quanto de inclinação do leito do canal sejam respeitados, caso contrário, ocorrerá a desagregação das partículas de solo, ocasionando a erosão do canal.

Logo, entendemos que o processo de desagregação do solo inicia-se quando a velocidade máxima ou crítica de escoamento é atingida e ultrapassada. Inúmeros autores investigaram possíveis fatores que influenciam nessa velocidade de escoamento, dentre os mais recentes temos Vongvisessomjai et al. (2010), Bonakdari e Ebtehaj (2014b). Entretanto, nota-se que as equações e modelos hoje existentes ainda deixam de lado algumas variáveis importantes no processo da erosão em canais, como a coesão e a erodibilidade do leito dos canais.

Um outro problema a ser levado em consideração é que a maioria dos estudos existentes são realizados em laboratórios, com condições controladas, sendo muitas vezes divergentes da realidade, conseqüentemente, os modelos serão eficazes para condições laboratoriais controladas. Segundo Singh et al. (2008) os estudos de produção de sedimento são importantes para o planejamento de vários processos de conservação do solo e da água.

Atrelado a todos esses fatores e ao que vem sendo usado para resolver problemas de fluxo em canais nas diversas áreas de estudo, tem-se a análise dimensional. Essa

análise, por sua vez, permite combinar parâmetros facilmente obtidos em experimentos como também parâmetros mais complexos, como a tensão crítica de cisalhamento e os coeficientes de coesão do solo, por exemplo. Nesse sentido, a presente pesquisa visou aplicar a análise dimensional para obter uma equação de velocidade de escoamento concentrado crítica ou permissível para canais de leito argiloso.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Aplicar uma análise dimensional considerando os parâmetros hidráulicos e do meio coesivo/argiloso que governam a velocidade do escoamento superficial concentrado, e assim, obter uma equação de velocidade crítica ou permissível do escoamento concentrado para canais de leito argiloso.

2.2 Objetivos Específicos

- Determinar números adimensionais com base nas variáveis hidráulicas e do meio coesivo/argiloso que governam a velocidade do escoamento superficial concentrado;
- Determinar a velocidade do escoamento superficial concentrado em canais projetados, com o uso de molinete eletrônico bidimensional, para comparação com os valores obtidos pelas equações de velocidade crítica, tanto em canais com leito arenoso, como em canais de natureza argilosa;
- Determinar a tensão crítica de cisalhamento (τ_c) e a erodibilidade (k) de canais de leitos argilosos pré-formados;
- Avaliar a equação de velocidade crítica de Mirtskhoulava (1966b) para condição de escoamento superficial concentrado em canais coesivos.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 A erosão e o transporte de sedimentos em leitos argilosos

A desagregação de sedimento argiloso é normalmente modelada para canais, mudanças de nível, barragens de terra e erosão interna usando-se uma abordagem linear do excesso de tensão de cisalhamento (KHANAL et al., 2016). Utley e Wynn (2008) reportaram que uma quantidade considerável de pesquisas tem sido realizada sobre erosão em leitos argilosos, no entanto, os modelos preditivos ainda são rudimentares, e são poucos os dados disponíveis para dimensionamento. Esses autores esclarecem que a erosão em solos argilosos é um fenômeno complexo, determinado não somente pelas propriedades do solo e hidráulica do fluxo, mas também, pela interação química entre a água constante nos poros do solo e o fluxo que provoca erosão. Enquanto os solos sem coesão, os de textura arenosa, são cisalhados como partículas individuais, os leitos e solos argilosos com coesão são cisalhados como agregados, demonstrando, assim, que as ligações entre agregados que constituem os torrões de solo também são importantes, e assim a ligação inter-partícula também é importante.

A resistência à erosão do leito coeso, ainda citado por Utley e Wynn (2008), além de ser afetada pelo estado físico da porosidade do solo ocupada por água, também tem sido atribuída significativamente ao aumento da erodibilidade do solo, relacionada aos ciclos de umedecimento/congelamento e secagem. Considerada uma propriedade do solo, a erodibilidade do solo expressa a taxa na qual o solo será erodido, uma vez iniciada a erosão com o início de movimento.

Tipicamente, a taxa de erosão de um leito ou solo coeso, conforme Khanal et al. (2016), é predita usando-se um modelo relacionando a erodibilidade do solo e a medida das forças hidráulicas atuantes no solo. A expressão mais comum é conhecida como a equação do excesso de tensão cisalhante, a qual estabelece que a taxa de erosão é proporcional à diferença entre a tensão cisalhante aplicada ao contorno sólido e a tensão crítica de cisalhamento.

Originalmente, usado para solos não coesos, a tensão crítica de cisalhamento é definida como o estresse hidráulico no qual o solo será erodido. Para solos coesos, a tensão crítica de cisalhamento é de difícil predição. Vários pesquisadores têm desenvolvido relações empíricas entre a tensão crítica de cisalhamento e propriedades do solo, mas a predição das taxas de início de movimento no ambiente fluvial baseada em propriedades físicas tem sucesso limitado. Essa falta de métodos adequados para predição

da erodibilidade do solo e da tensão crítica de cisalhamento para solos coesos, tem levado ao desenvolvimento de vários métodos de campo usando-se a aplicação de jatos em leitos coesos.

3.2 Início de movimento

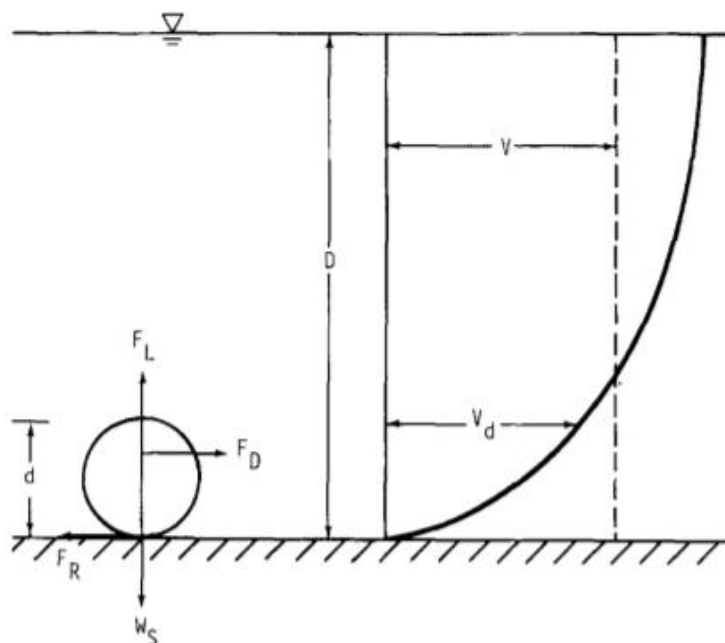
O início do movimento de uma partícula, devido à ação do fluxo de fluido, é definido como o instante em que as forças aplicadas, através do arrasto e elevação do fluido, fazem com que as partículas se movam, excedendo a força estabilizadora devido à força peso (RAUDKIVI, 1990).

Conforme Yang (1977), no estudo do transporte de sedimentos, a primeira coisa a ser considerada é a condição de fluxo sob a qual as partículas de sedimentos no leito começam a se mover, isto é, a condição de movimento incipiente. Silva e Wilson Júnior (2005) ressaltam que a mobilidade dos grãos depende, também, das características hidrodinâmicas do escoamento e sedimentológicas do material do leito móvel.

Sharma et al. (2019) ressaltam que o início do movimento das partículas de solo ocorre quando as forças hidrodinâmicas, que atuam sobre essas partículas, são maiores do que as do valor crítico. Os mesmos autores ainda destacam que o movimento de uma grande quantidade de sedimentos ocorre devido a grandes diferenças entre os valores hidrodinâmicos e forças resistivas.

Assim, Yang (1977) ainda afirma que a maioria das equações de transporte de sedimentos requer certos parâmetros em movimento incipiente, e que, a maioria dos critérios para movimento incipiente pode ser obtida a partir de um equilíbrio de forças que atuam sobre uma partícula de sedimento, como apresentada na Figura 1, ou de um equilíbrio de momentos devido a essas forças. Ressalta que as magnitudes dessas forças podem ser determinadas a partir de uma tensão de cisalhamento ou de uma abordagem de velocidade.

Figura 1. Diagrama das forças que atuam sobre uma partícula de sedimento no fluxo de canal aberto.



Fonte: Yang (1977)

De acordo com Fox e McDonald (1998), a superfície de um corpo imerso em um fluido em movimento fica submetida a uma força dinâmica, resultante de forças de pressão (normal à superfície) e de cisalhamento (tangente à superfície). Couto et al. (2004) confirmaram que as tensões cisalhantes devidas à viscosidade e gradientes de velocidade na superfície do corpo, causam forças tangenciais à superfície enquanto variações nas intensidades de pressão ao longo da superfície, devidas aos efeitos dinâmicos, resultam em forças normais à superfície do corpo. A componente da força total exercida pelo fluido no sólido, na direção do escoamento é denominada arraste.

O movimento de sedimentos nos rios tem sido estudado por engenheiros hidráulicos e geólogos há séculos por causa de sua importância no entendimento da hidráulica, morfologia e assuntos relacionados (YANG, 1977). O transporte de sedimentos é complexo e frequentemente sujeito a tratamento semi-empírico ou empírico (GRAF, 1984).

Com base na velocidade mínima ou no esforço mínimo de cisalhamento em uma profundidade ou fluxo especificado, dois critérios simples, geralmente usados como fonte, foram definidos em diferentes países para estimativas na prevenção de sedimentação em diferentes seções de fluxo sob condições de não deposição (ASHLEY et al., 2005).

Velocidade constante e tensão de cisalhamento foram apresentadas de forma abrangente por Vongvisessomjai et al. (2010). Esses métodos não consideram características de sedimentos e vazões. Portanto, a velocidade limite, que geralmente é apresentada como subestimada ou superestimada. (BONAKDARI e EBTEHAJ 2014a; SAFARZADEH e MOHAJERI, 2016).

Por esses motivos, muitos estudos experimentais e analíticos foram conduzidos para investigar os fatores que influenciam a estimativa da velocidade limite (NALLURI e GHANI, 1996; OTA e NALLURI, 2003; BANASIAK, 2008; VONGVISESSOMJAI et al., 2010; BONAKDARI e EBTEHAJ, 2014b) e várias análises baseadas em regressões e equações foram recomendadas. Esses estudos foram baseados na difícil compreensão dos mecanismos de transporte de sedimentos, em canais abertos, devida à sua natureza tridimensional complexa, uma vez que, as equações existentes não fornecem estimativas precisas da velocidade limite (EBTEHAJ et al., 2014).

3.3 Critérios de início de movimento

Graf (1984) cita três principais critérios para estabelecer as condições de início do movimento: 1. o critério da velocidade crítica considerando o impacto do fluxo nas partículas; 2. o critério de tensão crítica de cisalhamento considerando o arraste friccional nas partículas; e o critério 3 que trata da força de elevação, que considera as diferenças de pressão devidas aos gradientes de velocidade.

A partir das equações de velocidade crítica, é possível se determinar o valor máximo da velocidade média do fluxo sem destruição do canal, ou seja, a desagregação de partículas do contorno sólido (MIRTSKHOULAVA, 1997).

Para Mikhnevich (1989) as equações existentes apresentam deficiências em comum, pois não levam em consideração características importantes no processo, como a resistência do solo, o coeficiente de fricção interna, porosidade, entre outras. Essa falha se deu 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 de canais.

A equação de Manning desenvolvida em 1891, para a verificação da velocidade em canais aluviais, não leva em consideração a diversidade textural do material do leito, e pode subestimar a velocidade do escoamento para leitos argilosos, uma vez que a mesma foi desenvolvida para solos predominantemente arenosos. Nesse contexto, diversos pesquisadores desenvolveram métodos e equações para a predição de velocidades

permissíveis em leitos aluviais, como, por exemplo, Fortier e Scobey (1926), Mavis (1935), Garbrecht (1961), Carstens (1964), Mirtskhoulava (1966a), entre outros.

Quando a água flui sobre solos coesivos, tanto a superfície quanto a estrutura do solo respondem quimicamente por meio de troca iônica, para se ter a eletroneutralidade (WINTERWERP e VAN KESTEREN, 2004), e fisicamente por meio da absorção de água (MITCHELL e SOGA, 2005). A erosão dos solos não coesivos ocorre sobre as partículas individuais, enquanto, nos solos coesivos, a mesma se dá sobre os agregados, assim, as ligações inter-partículas são importantes. Mirtskhulava, (1966b), Raudkivi (1998), Utley e Wynn (2008) acrescentam que para forças hidráulicas suficientemente grandes, elas superam as forças de atração inter-partículas dos agregados.

No controle da velocidade média do escoamento, a vegetação é um dos fatores que devem ser considerados, uma vez que ela muda a hidráulica local (ROMINGER et al., 2010; NEPF, 2012) e as condições de transporte de sedimentos (CURRAN e HESSION, 2013; YAGER e SCHMEECKLE, 2013; MANNERS et al., 2015). Walczak et al. (2018) ressaltam que, em canais naturais, a vegetação pode interferir na largura, na vazão e na velocidade do fluxo superficial e que quando construídos em áreas de inundação apresentam uma larga complexidade hidrológica no fluxo pois este é afetado pela vegetação.

A erosão, produção e a distribuição de sedimentos são processos geológicos fundamentais relacionados à evolução da paisagem, ao processo de transferência de massa entre os continentes e os oceanos, para reciclagem de materiais na terra e para disponibilidade de solos (COOK et al., 2015). Li et al. (2018) ressaltam que o transporte de sedimentos faz parte dos processos fluviais e está profundamente relacionado às mudanças morfológicas e a natureza do leito, sendo que esse transporte assume duas formas, denominadas de carga de fundo e carga suspensa.

Assim, apesar do avanço em modelos de hidrodinâmica e de transporte de sedimentos, ainda encontram-se dificuldades para se prever erodibilidade do sedimento coeso. Essa contraposição é causada por dificuldades na modelagem da erosão em solos coesivos devidas às fortes atrações entre partículas encontradas em sedimentos coesos (BLACK et al., 2002; WINTERWERP e VAN KESTEREN, 2004), diferentemente de leito aluvial, onde a resistência à erosão depende principalmente do peso da partícula (MIRTSKHOULAVA, 1991).

Referente a essas forças e às propriedades físico-mecânicas, Mirtskhoulava (1991) acrescenta que estudos vêm sendo realizados para se ter a descrição da erosão e a previsão

de velocidades não-abrasivas, uma vez que esse processo se configura como um dos problemas mais importantes da hidráulica e da morfologia dos rios.

Na mecânica dos fluidos, muitos problemas não podem ser resolvidos apenas por métodos teóricos. Assim, Schiozer (1996), Zitterell et al. (2013) e Vilaça et al. (2017) abordam em seus estudos que métodos teóricos podem ser combinados com dados experimentais para desenvolver soluções práticas para problemas hidráulicos e de mecânica dos fluidos, assim como nas diversas áreas de Engenharia (OSGOOD, 2009).

Vekariya et al. (2011) afirmam que a partir da análise dimensional é possível resolver problemas de fluxo de fluido, por ser um método simples, claro e intuitivo para se determinar a dependência funcional dos fatores físicos que influenciam um processo. Vilaça et al. (2017) ressaltam que a análise dimensional é uma ferramenta útil para o desenvolvimento de equações preditivas, reduzindo o número de variáveis necessárias para modelagem física, para grupos sem dimensão chamados termos Pi (Π).

Como já relatado por Graf (1984), o movimento inicial das partículas no leito de canais, frequentemente chamado de condição crítica de início de movimento pode ser abordado por três formas.

De acordo com Bernardino (2005), os métodos baseados na velocidade crítica procuram definir uma velocidade de escoamento (junto ao fundo, ou mesmo, velocidade média) capaz de provocar o início do movimento das partículas sólidas do leito. Já os métodos baseados na tensão crítica são mais racionais e precisos, pois se preocupam em avaliar diretamente o esforço que é efetivamente responsável pela movimentação do sedimento, ou seja, a tensão de arraste provocada pelo escoamento.

3.3.1 Equações de velocidade crítica

Conforme Qasem et al. (2017), os métodos convencionais existentes para a determinação da velocidade limite de escoamento, adotam velocidades constantes ou tensão de cisalhamento adquiridas em experiências práticas de Engenharia, obtida de um projeto para outro.

Graf (1984) apresenta a Equação 1 como método de determinação dessa velocidade, entretanto, o mesmo autor afirma que a verificação, da mesma, é particularmente difícil, devido à falta de uma boa definição da velocidade de fundo e às dificuldades encontradas na medição com precisão.

$$\frac{(u_b)_{cr}^2}{\left(\frac{\rho_s}{\rho-1}\right)gd} = \frac{2k_3(\tan \varphi \cos \alpha' - \sin \alpha')}{C_D k_1 + C_L k_2 \tan \varphi} \quad (1)$$

Nota-se que para se obter o valor da denominada velocidade crítica do leito $((u_b)_{cr})$, em $m s^{-1}$, é necessário o estabelecimento de diversos parâmetros, como a densidade do sedimento (ρ_s) e da água (ρ), em $kg m^{-3}$, a aceleração da gravidade (g), em $m s^{-2}$, o diâmetro da partícula (d), em m , e alguns adimensionais como os coeficientes de arrasto (C_D) e elevação (C_L), os fatores de forma das partículas (k_1 e k_2) e o ângulo de repouso (φ) e de inclinação do leito (α').

As importantes contribuições do século passado estão resumidas em Forchheimer (1914), que apresenta alguns resultados em forma de tabela e outros na forma de uma equação, dada por Sternberg como a Equação 2, onde ξ é um valor adimensional obtido com diferentes experiências por vários engenheiros, que é em média $\xi \approx 4$.

$$(u_b)_{cr} = \xi \sqrt{d} \quad (2)$$

Fortier e Scobey (1926) relatam um estudo mais extenso sobre "velocidades admissíveis de canal", o "valor máximo permitido das velocidades médias". Após uma discussão crítica de alguns dados de laboratório, eles concluem que o melhor conhecimento das velocidades de cisalhamento vem de deduções, quanto ao desempenho de canais individuais e não de trabalho experimental direto. Com esse entendimento os mesmos autores citados anteriormente, enviaram questionários a vários engenheiros de irrigação cuja experiência os qualificou para formar estimativas autorizadas das velocidades médias máximas permitidas em canais de vários materiais (Tabela 1).

Tabela 1. Velocidades médias máximas permitidas em canais abertos.

Material original do canal	Velocidade ($m s^{-1}$)		
	Fluxo sem detritos	Fluxo transportando Coloides	Fluxo transportando material não coloidal
Areia fina	0,45	0,75	0,45
Franco-arenoso	0,525	0,75	0,6
Franco-siltoso	0,6	0,9	0,6
Silte aluvial	0,6	1,05	0,6
Cinza vulcânica	0,75	1,05	0,6
Cascalho fino	0,75	1,5	1,125
Argila consolidada	1,125	1,5	0,9
Concreções de argila	1,125	1,5	1,5
Silte aluvial + Argila	1,2	1,65	1,5
Cascalho grosso	1,2	1,8	1,95
Concreções em material cerâmico	1,5	1,65	1,95
Material sedimentar estratificado argiloso e camadas endurecidas (pans)	1,8	1,8	1,5

*Considerando-se profundidades de 0,91 m ou menor. Fonte: Fortier e Scobey (1926)

3.3.2 Critério da tensão crítica de cisalhamento

De acordo com Graf (1984) e Forchheimer (1914), a relação entre o componente de peso de uma coluna de água e a força de atrito no fundo pode ser dada conforme a Equação 3.

$$\gamma DS = k_4 u_b^2 \quad (3)$$

γ é o peso específico da água (N m^{-3}), D profundidade da água (m), S é a declividade (m m^{-1}) e k_4 uma constante (adm). Logo, a expressão γDS é denominada como “força de tração” por unidade de superfície, ou tensão de cisalhamento e força de arrasto, simbolizado por τ_0 , podendo ser rescrita da seguinte forma (Equação 4):

$$\tau_0 = \gamma DS \quad (4)$$

A equação 4 tornou-se a equação geral da tensão de cisalhamento, quando a profundidade é substituída pelo raio hidráulico (R_h), em m, na forma da Equação 5:

$$\tau_0 = \gamma R_h S \quad (5)$$

Assim, tomando como base a Equação 1, citada anteriormente e fazendo-se um arranjo matemático entre as Equações 3 e 4, tem-se a Equação 6, na qual é possível se obter a tensão crítica de cisalhamento $(\tau_0)_{cr}$, no ponto de movimento incipiente, onde A'' é o coeficiente de sedimentos (adm), d o diâmetro da partícula (m), e o peso específico do sedimento (γ_s) e da água (γ), em N m^{-3} .

$$\frac{(\tau_0)_{cr}}{(\gamma_s - \gamma)d} = A'' \quad (6)$$

A determinação de parâmetros de tensão crítica de cisalhamento e a erodibilidade de diferentes solos e materiais de fundo, que possibilitem a avaliação de sua resistência, juntamente com modelos de direcionamento e controle de drenagem em estradas não pavimentadas, devem fazer parte de estudos que visem combater a erosão e proteger o meio ambiente (OLIVEIRA et al., 2009).

Sharma et al. (2019), em seus experimentos, constataram que as tensões de cisalhamento são mais altas na extremidade a montante do canal, fazendo com que haja desagregação de sedimentos na seção correspondente. Consequentemente, este material desagregado é depositado na superfície do canal na próxima seção a jusante, avançando ainda mais a jusante ao longo de todo o canal. Assim, grandes quantidades de solo

desagregado são transportadas como carga fundo, de tal maneira que os materiais deslizam um sobre o outro.

3.3.3 Critério da força de elevação

Graf (1984) cita que o primeiro a mostrar que a hidrodinâmica clássica fornece uma explicação simples do levantamento e transporte de partículas sólidas em fluidos, foi Jeffreys em 1929. Dessa forma, as forças de elevação podem surgir por pelo menos duas razões: 1º) suponha que a partícula em consideração repouse no fundo de um canal, que é a zona onde ocorrem os gradientes de velocidade mais acentuados, podendo ser estabelecida uma diferença de pressão que resulta no levantamento da partícula (GRAF, 1984); 2º) a mesma partícula pode sofrer elevação por causa dos componentes de velocidade ascendente adjacentes ao leito como resultado da turbulência.

Se a magnitude do levantamento se igualar ao peso, a menor força de arraste seria suficiente para causar o início do movimento. Isso pode ser visto claramente na Equação 7, se for assumido um leito de canal horizontal, ou seja, $\alpha \approx 0$.

$$\tan \varphi = \frac{W \sin \alpha + F_D}{W \cos \alpha - F_L} \quad (7)$$

Onde, φ é o ângulo de repouso, obtido a partir da relação entre as forças paralelas que atuam sobre a partícula; α é o ângulo de inclinação do leito, no qual o movimento incipiente do sedimento ocorre, W é o peso específico da partícula submersa (N m^{-3}), F_D e F_L são as forças de arraste hidrodinâmico e de elevação, respectivamente.

Logo, tem que ser investigado qual é o valor da força de elevação (F_L), por meio da Equação 8.

$$F_L = C_L k_2 d^2 \frac{\rho u_b^2}{2} \quad (8)$$

Em que C_L é o Coeficiente de elevação (adm), k_2 é o fator de forma das partículas (adm), d o diâmetro da partícula (m), ρ densidade da água (kg m^{-3}) e u_b a velocidade do fluido na parte inferior do canal (m s^{-1}).

3.3.3.1 Erodibilidade e tensão crítica de cisalhamento do solo/leito

Os principais índices que caracterizam a resistência do solo e leito de rios à erosão são a erodibilidade e a tensão crítica de cisalhamento (KNAPEN et al., 2007; KNAPEN e POESEN, 2010). A estimativa desses índices é fundamental para a determinação da capacidade resistiva do solo e, assim, para a definição de estratégias visando o controle da erosão (LAFLEN et al., 1991; GRIEBELER et al., 2005a; SILVA, 2009; SCHULTZ, 2011).

O fator erodibilidade do solo, é definido por Morgan (2005), como a capacidade de resistência inerente do solo, tanto pela desagregação causada pelo impacto das gotas de chuva, quanto pelo escoamento superficial, e os fatores que afetam esse parâmetro podem ser classificados como físicos, geoquímicos ou biológicos (GRABOWSKI et al., 2011).

Este fator, no entanto, é uma propriedade intrínseca do solo, que reflete a sensibilidade do mesmo à erosão sob certas forças de erosividade e condições ambientais, que, por sua vez, são controladas principalmente pela estabilidade estrutural do solo (BEN-HUR e AGASSI, 1997). Em geral, quanto menor a estabilidade estrutural, maior a susceptibilidade do solo à erosão, ou seja, maior erodibilidade (TANNER et al., 2018).

Arelado a isso, tem-se a tensão crítica de cisalhamento, relatada por Griebeler et al. (2005a), como a força hidráulica requerida para iniciar a desagregação das partículas de solo, sendo a taxa de erosão considerada como zero, quando as tensões de cisalhamento aplicadas estão abaixo da tensão crítica de cisalhamento do solo (VAN KLAVEREN e MCCOOL, 1998).

A erodibilidade e a tensão crítica de cisalhamento têm sido determinadas através de métodos indiretos baseados nas características físico-químicas dos solos, e por métodos diretos a partir da relação entre as perdas de solo e a tensão cisalhante (ENRIQUEZ et al., 2015). Assim, métodos de determinação direta têm sido propostos para a estimativa desses índices destacando-se principalmente aqueles do tipo canal hidráulico, como o ensaio de Inderbitzen (INDERBITZEN, 1961) e o simulador de escoamento (GRIEBELER et al., 2005b).

Fisicamente, a água que flui sobre uma superfície exercendo tensão de cisalhamento naquela superfície (AKINOLA et al., 2018). Os fatores físicos que afetam a erodibilidade do solo incluem o tamanho médio e a distribuição das partículas (THOMSEN e GUST, 2000; GERBERSDORF et al., 2007), densidade e consolidação

(AMOS et al., 2004; BALE et al., 2007), conteúdo da água (VAN LEDDEN et al., 2004), pressão da água nos poros (SIMON e COLLISON, 2001) e temperatura (MEHTA e PARCHURE, 2000; PARKS, 2012). Além disso, Rao et al. (2011) citam que as tensões de cisalhamento de fundo aumentam com a infiltração, resultando em maiores taxas de transporte de sedimentos.

Os fatores geoquímicos estão intimamente ligados à distribuição e ao diâmetro médio das partículas e incluem a mineralogia da argila (KANDIAH, 1974), pH, Salinidade Total, taxa de Adsorção de sódio (KANDIAH, 1974; PARCHURE e MEHTA, 1985; WINTERWERP e VAN KESTEREN, 2004; DEBNATH et al., 2007), Metais (WINTERWERP e VAN KESTEREN, 2004) e conteúdo orgânico (LICK e MCNEIL, 2001; GERBERSDORF et al., 2007).

As taxas de erosão hidráulica têm relações diretas com os valores de tensão de cisalhamento ao longo dos taludes (NANSON e HICKIN, 1986; DARBY e THORNE, 1997), com a eficácia de aplicação de tensão de cisalhamento (SHUR et al., 1978; ARE, 1983; NANSON e HICKIN, 1986), com as propriedades coesivas de sedimentos (SHUR et al., 1978; JULIAN e TORRES, 2006; PARKER et al., 2008) e com a vegetação (THORNE, 1990; MILLAR, 2000).

A potência do escoamento é uma variável que pode ser usada para conhecimento da força com a qual o escoamento exerce ação sobre as margens, enquanto as propriedades resistivas do material dos taludes e do sedimento depositado no fundo restringem a ação fluvial, e ainda, vale ressaltar que as margens dos rios são interfaces dinâmicas entre os domínios fluvial, atmosférico e solo, onde cada meio contribui para sua transformação (TANANAIEV, 2016).

A tensão crítica de cisalhamento do leito (τ_{cr}), referenciada por Grabowski et al. (2011), é a responsável por iniciar a erosão do solo, enquanto a taxa de desagregação (D_r) é a massa de sedimentos erodidos por unidade tempo uma vez que o limite é excedido, isto é, com uma tensão cisalhante excessiva. Ha (2018), concluiu então, que a erosão do solo ocorre na interface solo-água quando a τ_{cr} excede a resistência à erosão do leito de sedimentos.

3.3.3.2 Resistência mecânica do solo sob cisalhamento direto

Conforme Zhu et al. (2010) e Alves (2017) a estrutura do solo é um importante índice para se avaliar a resistência do solo ao cisalhamento e essa resistência varia de

acordo com a porosidade, textura, densidade do solo, teor inicial de água, teor de material orgânico e o grau de decomposição deste solo.

Vargas (1989) apresenta a equação de Coulomb (Equação 9) como uma forma de se determinar a resistência ao cisalhamento dos solos, em que a τ (máxima pressão cisalhante suportada pelo solo) é determinada pela soma de “c”, o valor da coesão do solo (kPa), com o produto da tensão normal existente no plano de cisalhamento (τ_n), em kPa, e o ângulo de atrito interno (arco tangente) entre as partículas do solo ($\text{tg}\phi$), sendo ela expressa da seguinte maneira:

$$\tau = c + \tau_n \text{tg}\phi \quad (9)$$

Rocha et al. (2002) concluíram que esta equação define o limite de resistência dos solos, ou seja, qualquer força cisalhante que esteja acima deste limite promoverá a ruptura do solo. Os parâmetros τ_n e ϕ são características intrínsecas dos solos (BENJAMIM e CRUSE, 1985). Para condição de solo seco, ϕ tende a aproximar-se de zero e τ_n tem o seu maior valor, e vice-versa em uma situação de saturação (PARTHENIADES, 2009). Ressalta-se que a condição de uso da Equação 9 se refere a solo não saturado, por isso em kPa, distinta da condição do cisalhamento pelo escoamento, com a superfície do leito próximo da saturação ou saturado, e assim em Pascal.

Barbosa e Lima (2013) relatam que para se avaliar a resistência do solo ao cisalhamento, deve-se também considerar a interação solo-raiz. Fiori e Carmignani (2009) enfatizam que as raízes podem ser tratadas como elementos flexíveis e elásticos, que, penetradas no solo, levam a um aumento da resistência contra eventuais deslizamentos nas encostas. De acordo com Ebtehaj et al. (2013) o aumento da deposição de sólidos suspensos e a consolidação em tubulações afetam a velocidade e a tensão de cisalhamento.

Considerando-se a mineralogia do solo, os sedimentos podem ser coesos, quando suas partículas formadas por silte e argila são menores que 63 μm (MITCHENER e TORFS, 1996), e requerem uma maior tensão de cisalhamento para erosão do leito (HOUWING e VAN RIJN, 1998); ou não coesos, com partículas maiores que 63 μm (ARAUJO, 2004), formadas por areia e cascalho, o que as deixam mais leves.

Para solos não coesivos, a desagregação e o transporte de partículas individuais ocorrem quando as forças de erosão são maiores do que as forças resistentes, tendo uma relação direta com o peso individual das partículas, do material agregado e do ângulo de exposição (AKINOLA et al., 2018). Já para solos coesos, a resistência do solo à abrasão

depende das propriedades físico-químicas do solo, da interação entre a química do solo e da água (RAUDKIVI e TAN, 1984; RAUDKIVI, 1998; PARTHENIADES, 2009). Assim sendo, são necessários métodos que prevejam a velocidade mínima para evitar a desagregação e o transporte do sedimento.

3.4 Erosão e início de movimento em leitos argilosos

Conforme Partheniades (1965) e Paaswell (1973), a erosão do leito argiloso ocorre sempre que a tensão de cisalhamento do leito é grande o suficiente para romper as ligações interparticulares eletroquímicas, ocorrendo assim, a remoção de partículas individuais de sedimentos e /ou flocos. Esse tipo de erosão depende do tempo e é definida como erosão ou ressuspensão da superfície.

Por outro lado, Hayter (2013) cita outro tipo de erosão, que por sua vez, ocorre mais ou menos instantaneamente pela remoção de partes relativamente grandes do leito. Este processo é referido como erosão de massa, e ocorre quando a tensão de cisalhamento do leito excede a força do leito ao longo de algum plano profundo que é tipicamente muito maior do que a força de cisalhamento do sedimento superficial.

Enriquez et al. (2015) chegaram à conclusão que o processo erosivo se inicia quando o escoamento superficial se concentra ao longo do canal de drenagem e atinge determinada tensão cisalhante, com magnitude superior à tensão crítica de cisalhamento do solo, e assim, a partir deste momento, o escoamento superficial passa a provocar o desprendimento de partículas do solo, geralmente transportadas até os cursos d'água.

Na avaliação do transporte de sedimentos, os depósitos de sedimentos dependem do tamanho da partícula de solo e da tensão de cisalhamento do solo, e podem ser classificados em duas categorias, de acordo com a mineralogia: coesivo e não coesivo (DALPIAZ, 2014). Sedimentos coesivos são sedimentos lamacentos, compostos por argila e silte, com tamanho de grão inferior a 63 μm . Nestes, além das forças eletroquímicas, conteúdo orgânico e processos biológicos são parâmetros que afetam a sedimentação e erosão do leito (MITCHENER e TORFS, 1996).

Conforme Souza (2011) os sedimentos coesivos são aqueles para os quais a resistência ao movimento inicial depende também das forças de coesão entre as partículas. Em geral, a resistência devida à esta força supera à das características das partículas individuais. Esta classe de sedimentos inclui as argilas, encontradas principalmente em reservatórios e regiões portuárias.

Em sedimentos coesivos, em que a floculação tem lugar, a formação de flocos e preservação depende da turbulência. Se a tensão de cisalhamento do leito é reduzida, a turbulência é baixa e, portanto, as interações entre partículas não são suficientemente intensas para causar a floculação, mas se for muito alta, as colisões de partículas são aumentadas e os flocos se quebram (MIKKELSEN, 2002).

A coesão do solo é resultado da atração eletrostática entre as superfícies de partículas que estão muito próximas, e, ou, resultante do efeito de agentes cimentantes tais como óxidos e argila (MITCHELL, 1976; KIMPE et al., 1983). Outra parcela da coesão do solo é resultado da tensão superficial da água nos capilares do solo, que tende a aproximar as partículas entre si, sendo uma parcela da resistência ao cisalhamento de solos parcialmente saturados (FREDLUND e RAHARDJO, 1993)

Para partículas do tamanho de argila, as forças físico-químicas da superfície exercem uma influência distinta sobre o comportamento das partículas devido à grande área específica, ou seja, razão entre a área da superfície e o volume (HAYTER, 2013). De fato, a força superficial média em uma partícula de argila é várias ordens de magnitude maior que a força gravitacional (PARTHENIADES, 1962).

Partículas de sedimentos coesivos tendem a ficar juntas, formando agregados grandes (flocos), que tem uma velocidade de sedimentação muito mais elevada do que as partículas individuais. O que, por sua vez, requer maiores tensões de cisalhamento para erosão do leito (HOUWING e VAN RIJN, 1998).

As características coesivas e friccionais entre as partículas do solo são os fatores que determinam a resistência do solo ao cisalhamento (PINTO, 2000), sendo esta definida como a tensão máxima cisalhante que o solo pode suportar sem sofrer ruptura (SILVA e CABEDA, 2005).

3.5 Parâmetro crítico de Shields para sedimento coeso

O primeiro a conceituar a tensão de cisalhamento no leito e conduzir experimentos sobre o movimento das partículas que a compõem foi DuBuat (1779). A partir disso, diversos estudos foram conduzidos sobre as condições críticas de movimento dos sedimentos, estando entre eles os de Lamb et al. (2008), Alfadhli et al. (2014) e Safari et al. (2016). Inúmeras expressões baseadas no critério de tensão crítica de cisalhamento, foram propostas para prever as condições de início do movimento das partículas (AGUIRRE-PE et al., 2000).

A relação mais conhecida para descrever a iniciação do movimento foi proposta por Shields (1936), que realizou experimentos sistemáticos e usou dados obtidos por outros pesquisadores para determinar a tensão crítica de cisalhamento. Conforme Cao et al. (2006), a condição crítica para o movimento incipiente do sedimento normalmente é medida a partir da tensão crítica de cisalhamento do leito (τ_{cr}), também chamado de parâmetro crítico Shields.

Logo, para sedimentos não coesivos, o parâmetro crítico de Shields (θ_{cr}), é um valor adimensional, sendo ele obtido a partir da Equação 10.

$$\theta_{cr} = \frac{\tau_{cr}}{(\rho_s - \rho)gd_{50}} \quad (10)$$

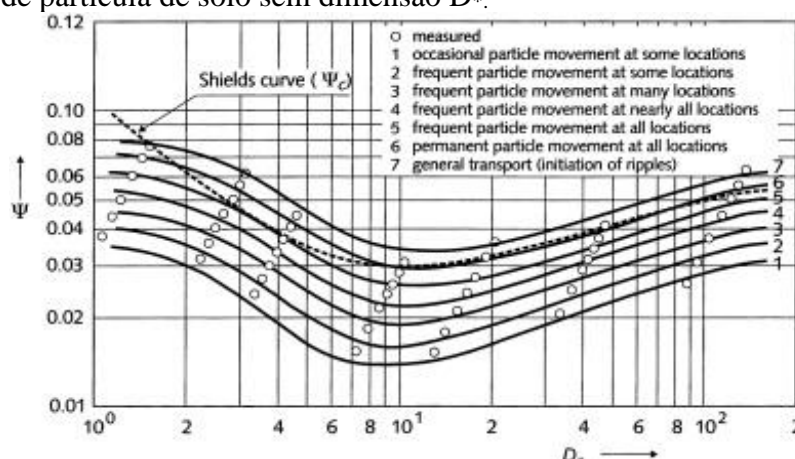
sendo tensão crítica de cisalhamento do leito (τ_{cr}), em $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-2}$, a densidade do sedimento (ρ_s) e da água (ρ), em kg m^{-3} , a aceleração da gravidade (g), em m s^{-2} e o diâmetro característico da partícula (d_{50}), em m.

Assim, o denominado diagrama de Shields estabelece uma relação entre a tensão de cisalhamento crítica, sem dimensão, em função do número de Reynolds das partículas ($\theta_{cr} = f(\text{Re}_*)$). Além dessa relação, Hoffmans e Verheij (1997) observaram que, devido à distribuição não uniforme das misturas, Shields desenhou não uma única curva, mas uma faixa larga. Eles apresentaram uma variação na curva de Shields, mostrada na Figura 2, plotando o parâmetro Shields versus o tamanho de partícula adimensional D_* , definido como a Equação 11.

$$D_* = d_{50} \left[g \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho \nu^2} \right) \right]^{\frac{1}{3}} \quad (11)$$

onde d_{50} é o diâmetro característico do sedimento (m), ρ_s e ρ são densidade da partícula e da água (kg m^{-3}), respectivamente, g é a aceleração da gravidade (m s^{-2}), ν é a viscosidade cinemática ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$).

Figura 2. Diagrama de Shields modificado plotando o parâmetro Shields (ψ) em função do tamanho de partícula de solo sem dimensão D_* .



Fonte: Hoffmans e Verheij (1997)

Para Vos et al. (2011), a Figura 2 mostra que o critério de Shields realmente corresponde à iniciação do movimento em todo o leito, e que, o movimento de partículas pode ocorrer em alguns locais para valores muito menores do parâmetro Shields. Já para sedimento coeso, o valor de θ_{cr} diminui com o aumento de D_* (VAN RIJN, 1984; YU e LIM, 2003). Outros pesquisadores como Beheshti e Ataie-Ashtiani (2008) e Miedema (2010), também adotaram o D_* em seus estudos.

Ainda assim, para sedimentos coesos, as relações existentes a partir do estudo de Shields ainda são ambíguas. Logo, segundo Zhang e Yu (2017), para entender o mecanismo do início do movimento para sedimentos coesos, vários estudos tentaram analisar os fatores que governam a resistência à erosão. A maioria desses estudos concentrou-se na influência do conteúdo de água, da densidade aparente ou da força dos sedimentos coesos (POSTMA, 1967; WINTERWERP e VAN KESTEREN, 2004; BALE et al., 2006, 2007; XU et al., 2015).

Conforme Zhang e Yu (2017), a dificuldade em estudar o movimento do sedimento coeso está intimamente relacionada às propriedades reológicas complexas desse material. Assim, os autores citados anteriormente sugerem a utilização da Equação 12, como forma de expressar a condição crítica de movimento para sedimento coeso (θ_{cr}), adotando além do D_* , um parâmetro de tensão produzida adimensional (τ_r), que pode ser obtida pela Equação 13.

$$\theta_{cr_c} = (0,056 - 0,033e^{-0,0115D_*} + 0,12e^{-0,25D_*} + 0,48e^{-3,8D_*}) \times (e^{9,8 \times 10^{-4} \times \tau_r \times \exp(-0,4D_*)}) \quad (12)$$

$$\tau_r = \frac{\tau_y}{\rho_s(\nu g)^{\frac{2}{3}}} \quad (13)$$

onde ρ_s é a densidade da partícula (kg m^{-3}), g é a aceleração da gravidade (m s^{-2}), ν é a viscosidade cinemática ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$), τ_y é a tensão produzida (N m^{-2}), ou seja, a tensão de cisalhamento na qual a amostra passa do estado sólido para estado líquido e começa a fluir, e está diretamente relacionada à interação interpartículas (ANCEY, 2007).

3.6 Hidráulica do escoamento concentrado em leitos argilosos

Segundo Hayter (2013), o regime de transporte de sedimentos é controlado pela hidrodinâmica, composição química do fluido e propriedades físico-químicas dos sedimentos coesivos, afetando os processos de convecção, advecção, dispersão, floculação, deposição e consolidação do material argiloso.

Inúmeros pesquisadores atrelam a utilização da resistência à penetração à condutividade hidráulica (GIAROLA et al., 2003; SANTANA et al., 2006) como atributo quantitativo para essa identificação de coesão do solo, tendo em vista que, aliada a outros parâmetros (densidade do solo e porosidade do solo), esta medida pode ser útil na caracterização, e também, na identificação do comportamento de solos coesos.

Diversos fatores como a intensidade da chuva, a inclinação da encosta e propriedades do solo, são parâmetros importantes para determinar a concentração de sedimentos (DEFERSHA e MELESSE, 2012; SAJJADI e MAHMOODABADI, 2015). Além disso, vários parâmetros hidráulicos, como por exemplo profundidade e velocidade do fluxo, tensão de cisalhamento, potência do escoamento e potência unitária do escoamento, são usados para caracterizar a potência erosiva do fluxo terrestre e para determinar a concentração de sedimentos (TROUT e NEIBLING, 1993; SHIH e YANG, 2009).

Polyakov e Nearing (2003) ressaltam que a desagregação e o transporte das partículas do solo se dão por ação das forças hidráulicas provocadas pelo escoamento superficial concentrado. Atrelado a todos esses fatores, diversas pesquisas, principalmente em laboratório, vêm sendo desenvolvidas para determinar a resistência hidráulica em canais (BUSARI e LI, 2016; DUPUIS et al., 2017; GEMICI et al., 2017; YANG et al., 2017). Essa resistência, por sua vez, relaciona-se com o perfil de velocidade do canal, influenciando diretamente o fluxo de sedimentos e os parâmetros hidráulicos (FERRO, 2017; TORABIZADEH et al., 2018).

Em situações de maiores potências erosivas, devidas a maiores vazões, a concentração de sedimentos aumenta (SIRJANI e MAHMOODABADI, 2012a). De fato, a potência do escoamento é obtida multiplicando-se a tensão de cisalhamento hidráulico e a velocidade do fluxo e ambos dependem da inclinação. Além disso, a desagregação agregada às chuvas, que depende da resistência do solo, é um parâmetro-chave no controle da concentração de sedimentos (LE BISSONNAIS, 1995; CERDÀ, 1996; BRYAN, 2000).

Simons e Senturk (1992) enfatizam que é uma 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.

3.7 Análise dimensional para as condições de início de movimento

A análise dimensional baseia-se no conceito de quantidades dimensionais (OSGOOD, 2009). Essas dimensões são as fundamentais, tais como massa (M), comprimento (L) e tempo (T), ou derivadas, as quais consistem em todas as outras, ou seja, são aquelas que podem ser expressas em termos das três primárias (TRANCANELLI, 2016).

Medeiros et al. (2014) defendem que a análise dimensional de um fenômeno seja usada para facilitar a sua compreensão em função dos parâmetros dos quais esse depende. Na Engenharia, os números adimensionais são utilizados com frequência, dentre eles, Osgood (2009) destaca o número de Mach e o número de Reynolds, como forma de prever características condicionais de velocidade, escoamento, compressibilidade ou incompressibilidade e, as consequências dos efeitos viscosos.

Osgood (2009) ressalta que as quantidades sem dimensão são diferenciadas pelo fato de seus valores numéricos serem independentes do sistema de unidades empregado, ou seja, eles mantêm seus valores independentemente de nossas convenções de medição. Contudo, com os coeficientes adimensionais se preveem possibilidades de cálculos com uma maior aproximação e simplificação possíveis da realidade (FREITAS et al., 2015).

Segundo alguns estudos, no transporte de sedimentos, a análise dimensional vem sendo aplicada em diversos aspectos. Xiaoxie et al. (2014) relacionaram a taxa de transporte de sedimentos e a variação temporal com objetivo de investigar o comportamento dos sedimentos na presença de infiltração descendente. Mrokowska et al.

(2018) analisaram a relação entre a dinâmica do transporte de carga e os parâmetros de fluxo do sedimento obtidos por análise dimensional. Já Sharma et al. (2019), utilizaram da análise dimensional para desenvolvimento de uma expressão empírica para o transporte de fundo sob o efeito de “*seepage*” (exfiltração ou surgência), em canal de fundo arenoso de distribuição não uniforme.

Nesse âmbito, Kapoor et al. (2020) concluíram que o teorema dos Pis de Buckingham fornece uma abordagem racional bem conhecida para o desenvolvimento de números sem dimensão, de problemas físicos complexos. Esta técnica foi apresentada pela primeira vez por Buckingham, por isso é chamado de "teorema de Buckingham" ou "teorema dos Pis" (BUCKINGHAM, 1914).

Na hidráulica, esse teorema também está sendo aplicado, para determinação da similaridade hidráulica de sistemas hidrológicos, como apresentado em Ortiz-Vera (2015), para propor modelos matemáticos para se determinarem as perdas de carga localizadas em conexões de sistemas de irrigação (BOMBARDELLI et al., 2019), modelar vazões de injetores Venturi, empregados para fins de fertirrigação na agricultura (SOBENKO, 2019) e para estimar pressões com grandes variações na velocidade em instalações hidráulicas (CASAS et al., 2015).

4 MATERIAL E MÉTODOS

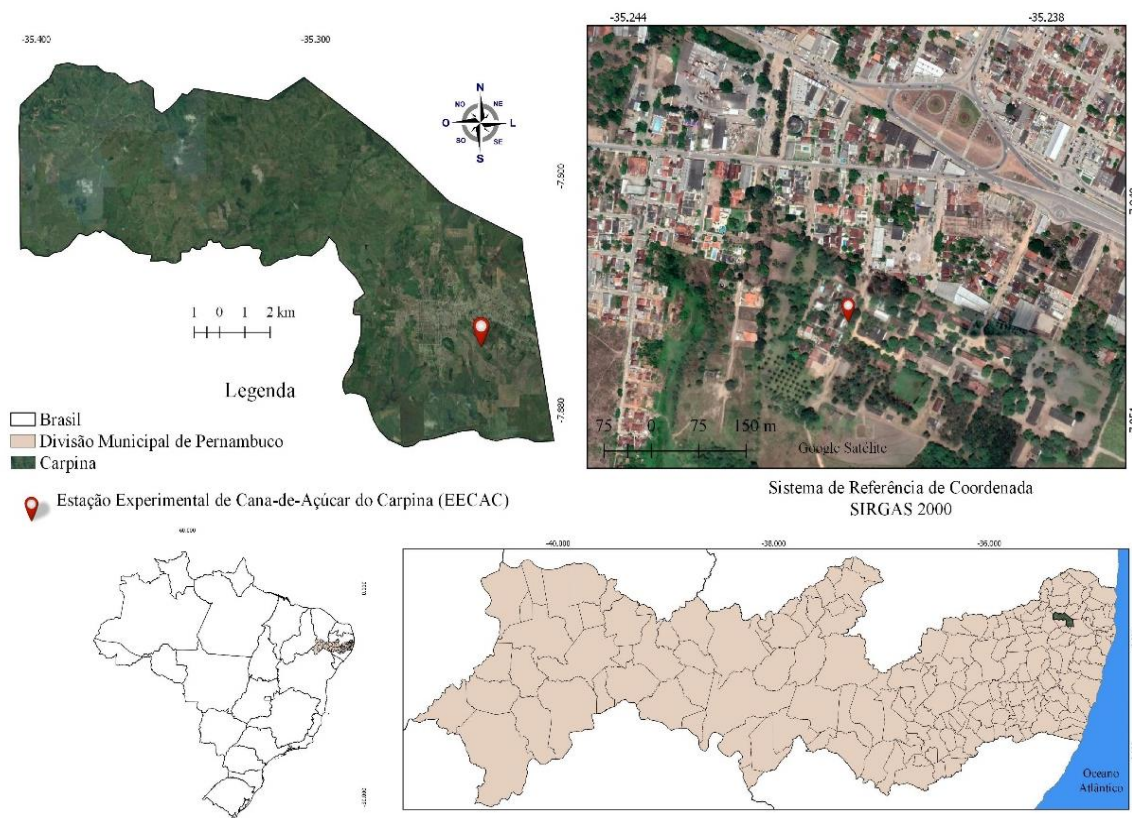
4.1 Área de estudo e descrição do esquema experimental

Para a investigação e análise experimental foram utilizados dados experimentais de campo obtidos por Alves (2017), que realizou seu estudo em canais construídos para simulação de fluxos concentrados sobre leito de textura argilosa, a fim de se avaliar a equação de velocidade crítica do escoamento desenvolvida por Mirskhoulava (1966b).

O estudo foi realizado na Estação Experimental de Cana-de-Açúcar de Carpina (EECAC), da Universidade Federal Rural de Pernambuco, no município de Carpina (7° 51'13"S, 35°14'10"W), a 180 m de altitude. Carpina é um município da Zona da Mata Norte pernambucana e está a 45 km da capital Recife (Figura 3).

O clima da região é caracterizado como quente, úmido, pseudotropical, de acordo com a classificação de Köppen. Existem duas estações distintas: uma estação chuvosa de março a agosto e uma estação seca de setembro a fevereiro (MOURA et al., 2007). O solo da área de estudo foi classificado, por Santos et al. (2013), como Argissolo Vermelho Amarelo Tb Distrófico, A moderado, textura média/muito argilosa.

Figura 3. Localização da Área em estudo.



Fonte: o autor (2020)

Os dados obtidos nesse experimento foram utilizados para a análise dimensional, utilizada na busca de uma expressão de velocidade máxima permitida do escoamento superficial concentrado em canais pré-formados (Figura 4). Esses canais foram construídos sobre um horizonte Bt (B textural) de um Argissolo com elevado teor de argila. No total foram 16 canais pré-formados, sendo 4 maiores com dimensões de 0,5 m de largura, 0,2 metros de profundidade e 4 metros de comprimento, e os demais canais tinham dimensões de 0,1 m de largura, 0,05 m de profundidade e 4 m de comprimento.

Figura 4. Canal construído na Estação Experimental de Carpina-PE.



Fonte: Alves (2017)

O leito de construção dos canais foi uma superfície com uma proporção de argila em torno de 60 % (horizonte B textural) do Argissolo. A caracterização granulométrica do horizonte B textural, que constitui o leito argiloso dos canais para os quatro blocos considerados, foi realizada adotando-se o método do hidrômetro (GEE e OR, 2002); as classes texturais foram determinadas seguindo-se a classificação do sistema brasileiro (SANTOS et al., 2013), dispostas na Tabela 2. A densidade do solo (ρ_{solo}) foi determinada seguindo-se metodologia proposta por Grossman e Reinsch (2002); a densidade de partículas sólidas do solo (sedimento) (ρ_s) foi obtida de acordo com Blake e Hartge (1986) e a porosidade total (α'') foi com base em Flint e Flint (2002). A Tabela 3 resume as análises físicas realizadas do material do leito argiloso.

Tabela 2. Caracterização granulométrica e carbono orgânico.

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

Sendo: CO – carbono orgânico

Fonte: Alves (2017)

Tabela 3. Caracterização física do leito argiloso dos canais pré-formados.

ρ_{solo}	ρ_s	α''	θ
----- kg m ⁻³ -----		----- m ³ m ⁻³ -----	
1381	2675	0,484	0,356

Sendo: ρ_{solo} – densidade do solo, ρ_s - densidade de partículas sólidas do solo (sedimento), α'' - porosidade total e θ - umidade do solo.

Fonte: Alves (2017)

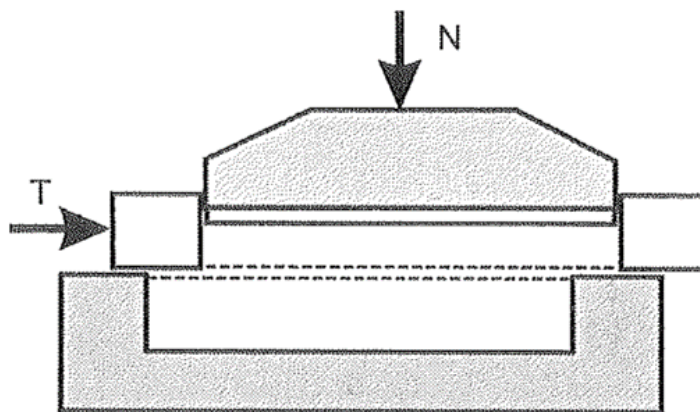
Os fluxos ensaiados foram obtidos a partir de um reservatório conectado por mangueiras para os canais menores e, para os canais maiores, a partir de um sistema de irrigação conectado diretamente na extremidade superior do canal. Os níveis de fluxo aplicados foram de $Q_1 = 70$, $Q_2 = 132$, $Q_3 = 210$ L min⁻¹ para os canais de menores dimensões e de $Q_4 = 545$ L min⁻¹ para os canais de maiores dimensões, sendo cada ensaio realizado com duração de 20 minutos. Para coleta do escoamento (descarga líquida) e da descarga sólida (sedimento) foram instaladas calhas metálicas, que permitiram a amostragem do escoamento superficial e da descarga de sedimento. Na extremidade inferior dos canais foi instalada uma calha coletora para auxiliar nas amostragens das descargas sólida e líquida.

Com o objetivo de avaliação da resistência do solo ao cisalhamento (obtenção da coesão do solo) e alguns parâmetros físicos, foram coletadas 32 amostras de solo com dimensões retangulares (0,06 m x 0,06 m x 0,043 m), correspondentes à caixa do aparelho de cisalhamento direto, as quais foram posteriormente envolvidas em plástico bolha e acondicionadas em caixas de isopor.

Para a realização dos ensaios de cisalhamento direto, os corpos de prova do solo foram colocados parcialmente numa caixa de cisalhamento, ficando com sua metade superior dentro da caixa bipartida, como é mostrado esquematicamente na Figura 5. Uma força vertical N e uma força tangencial T foram 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 tensão normal (τ_n) e tensão crítica ou de falha (τ_c) que nele ocorreram, conforme as Equações 12 e 13, respectivamente. A força T provocou o deslocamento com velocidade constante na metade do corpo de prova, cuja resistência oferecida pela outra metade foi registrada por leitura no relógio comparador do anel dinamométrico. Dessa forma, determinou-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 e PINTO, 2006).

Figura 5. Detalhe de parte do equipamento utilizado para o ensaio de cisalhamento direto do solo do leito argiloso, no laboratório de Engenharia de Manejo e conservação do solo da UFRPE.



Fonte: Ortigão (2007).

Os ensaios realizados por Alves (2017), consistiram em duas fases: a primeira quando ocorreu a aplicação da tensão normal (N), onde as condições foram equivalentes às do ensaio oedométrico, pois não se permitiu a deformação lateral (ORTIGÃO, 2007); na segunda fase, aplicou-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 foi obtida por meio do anel dinamométrico que permitiu a medição da carga aplicada. Extensômetros permitiram medir os deslocamentos verticais e horizontais durante o ensaio e, assim, no término das duas fases, obtiveram-se os dados para preencher os requisitos das seguintes Equações 14 e 15.

$$\tau_n = \frac{N}{a} \quad (14)$$

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

$$\tau_c = \frac{T}{a} \quad (15)$$

onde τ_c é a tensão de cisalhamento (kgf cm⁻²) e T a força aplicada no corpo de prova (kgf cm⁻², kPa); e 'a' a área da seção transversal da amostra (m²).

Vale ressaltar que para obtenção das tensões produzidas, foram realizados testes de cisalhamento direto de acordo com a norma D-3080/98 da Sociedade Americana para Testes de Materiais (ASTM D 3080-98, 2003), sendo eles conduzidos em um aparelho de cisalhamento direto com velocidade de cisalhamento constante de 0,125 mm min⁻¹. As tensões normais aplicadas durante os testes foram 50, 100, 150 e 200 kPa.

4.2 Parâmetros analisados

Para a análise dimensional, foram considerados os parâmetros importantes na determinação da velocidade crítica, como os parâmetros hidráulicos e morfométricos, e os parâmetros ligados à natureza dos canais de leito argiloso, elencados a seguir:

4.2.1 Descarga Líquida (Q), Raio Hidráulico (R_h), Velocidade Média (V_m) e Declividade (S)

A determinação da descarga líquida (Q) foi realizada a partir da amostragem do escoamento, 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, com o auxílio de um micromolinete fluviométrico. 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 m².

4.2.2 Coeficiente de Darcy–Weisbach (f)

A equação de Darcy-Weisbach, originalmente desenvolvida para condutos, também tem sido utilizada em escoamentos de canais abertos. O fator de atrito de Darcy-Weisbach (f), é definido conforme a Equação 16.

$$f = \frac{8gR_h S}{V_m^2} \quad (16)$$

onde f é o coeficiente de Darcy-Weisbach (adm), g a aceleração da gravidade ($m\ s^{-2}$), R_h o raio hidráulico (m), S a declividade de superfície da água ($m\ m^{-1}$) e V_m a velocidade média do escoamento ($m\ s^{-1}$).

4.2.3 Tensão crítica de cisalhamento

Para determinação da tensão crítica de cisalhamento foi necessário o conhecimento de dois outros parâmetros: taxa de desagregação de solo (D_r) e a tensão cisalhante (τ_f). Por meio da Equação 17, proposta por Flanagan e Nearing (1995) foi possível a determinação da taxa de desagregação do solo, a seguir:

$$D_r = \frac{QC_s}{LP_m} \quad (17)$$

sabendo que D_r é a taxa de desagregação do solo pelo fluxo concentrado ($kg\ m^{-2}\ s^{-1}$); Q a descarga líquida ($L\ s^{-1}$); C_s a concentração de sedimentos no escoamento ($kg\ L^{-1}$); L o comprimento do canal (m) e P_m o perímetro molhado (m). A concentração de sedimentos ou de sólidos no escoamento, por sua vez, foi determinada a partir da relação entre a massa de solo seco e a massa de mistura água e sedimento.

O segundo parâmetro, a tensão de cisalhamento do fluxo (τ_f), foi determinado conforme a Equação 18, fazendo-se o produto entre γ = peso específico da água ($N\ m^{-3}$), R_h = raio hidráulico do sulco (m) e S = declive do sulco ($m\ m^{-1}$).

$$\tau_f = \gamma R_h S \quad (18)$$

Desta maneira, a tensão crítica de cisalhamento (τ_c) foi determinada a partir da relação dos coeficientes da reta: $\tau_c = -a/b$ (LAFLEN e THOMAS, 1987).

4.3 Parâmetro crítico de Shields para sedimento coeso

Para determinação do parâmetro crítico de Shields, utilizou-se a metodologia proposta por Zhang e Yu (2017), onde eles enfatizam que a fórmula usada para expressar a condição crítica de movimento para sedimento coeso deve conter dois termos, um termo reológico e o termo da gravidade. Logo, considerando que as dimensões estão em harmonia, um parâmetro de tensão produzida adimensional (τ_r) foi proposto por Zhang e Yu (2017), sendo ela descrita pela Equação 19:

$$\tau_r = \frac{\tau_y}{\rho_s(\nu g)^{\frac{2}{3}}} \quad (19)$$

onde ρ_s é a densidade da partícula (kg m^{-3}), g é a aceleração da gravidade (m s^{-2}), ν é a viscosidade cinemática ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$), τ_y é a tensão produzida, que por sua vez, foi obtida a partir da aplicação da tensão normal durante o teste de cisalhamento direto.

A partir da posse desse valor da tensão produzida adimensional (τ_r), Zhang e Yu (2017) apresentam a Equação 20 abaixo, utilizada para se obter o parâmetro crítico de Shields (θ_{cr_c}) para sedimento coesivo dos canais ensaiados com aplicação de fluxo.

$$\theta_{cr_c} = (0,056 - 0,033e^{-0,0115D_*} + 0,12e^{-0,25D_*} + 0,48e^{-3,8D_*}) \times (e^{9,8 \times 10^{-4} \times \tau_r \times \exp(-0,4D_*)}) \quad (20)$$

Ainda foi adotado o parâmetro de tamanho de partícula de solo sem dimensão (D_*), conforme a Equação 21, a seguir:

$$D_* = d_{50} \left[g \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho \nu^2} \right) \right]^{\frac{1}{3}} \quad (21)$$

onde d_{50} é o diâmetro do sedimento (m), ρ_s e ρ são densidade da partícula e da água (kg m^{-3}), respectivamente, g é a aceleração da gravidade (m s^{-2}), ν é a viscosidade cinemática ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$).

4.4 Análise dimensional

A análise dimensional foi baseada no teorema dos Pi de Buckingham (BUCKINGHAM, 1914), e no método de variáveis repetidas (FREITAS et al., 2015). Esse método compreende uma análise a partir da diferença entre o número de variáveis dimensionais que descrevem um processo (k), e o número de dimensões que referenciam essas variáveis (r), e assim resultando no número de grupos sem dimensão (termos Pi).

Para as dimensões de referência, utiliza-se um conjunto de dimensões fundamentais como a [Massa] = M, o [Comprimento] = L, e o [Tempo] = T (DYM et al., 2010). Inicialmente, definiu-se a variável dependente e independentes, conforme a Equação 22:

$$q_1 = f(q_2, q_3, q_4, \dots, q_n) \quad (22)$$

O teorema estabelece ser possível ajustar a relação entre n variáveis da seguinte forma (Equação 23):

$q(q_1, q_2, q_3, q_4 \dots q_n) = 0$ (23)
 sendo que estas n variáveis podem ser agrupadas em k - n razões adimensionais independentes, ou parâmetros π , expressos sob a forma funcional (Equação 24) que, por sua vez, foi reescrita conforme a Equação 25:

$$G(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4, \dots \pi_{k-n}) = 0 \quad (24)$$

$$\pi_1 = G_1(\pi_2, \pi_3, \pi_4, \dots \pi_{k-n}) \quad (25)$$

De acordo com Fox et al. (2014), após a determinação de quantos grupos π foram possíveis de se encontrar, estabeleceu-se um conjunto de parâmetros dimensionais, que apresentem todas as dimensões primárias, sendo estes parâmetros chamados de parâmetros repetentes (m) e normalmente $m = r$. Assim, combinaram-se os parâmetros repetentes com os remanescentes.

Seguiu-se Díaz (2012), na averiguação se a variável encontrada pertence ao grupo π . A primeira averiguação foi que se uma variável é adimensional, ela é automaticamente um grupo π ; e a segunda foi que quaisquer duas variáveis que têm as mesmas dimensões, a sua relação é um grupo π . E por fim, os grupos dimensionais são resolvidos, e transformados em adimensionais (MUNSON et al., 2004).

4.5 Velocidade permissível segundo Mirtskhoulava (1966a)

A equação de velocidade permissível (Equação 26), desenvolvida por Mirtskhoulava (1966a), foi analisada e comparada com os valores de velocidade obtidos pelo molinete fluviométrico para os canais construídos.

$$V_p = \log_{10} \frac{8,8R_h}{d} \sqrt{\frac{2gm}{2,6\gamma n'} [(\gamma_p - \gamma)d + 1,25C_f K]} \quad (26)$$

em que V_p é 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 27.

$$n' = 1 + \frac{d}{0,00005+0,3d} \quad (27)$$

Por meio da Equação 28, foi possível se determinar o valor da coesão na ruptura (C_f), no limite de fraqueza.

$$C_f = 0,035C \quad (28)$$

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, que diz respeito ao desvio dos valores médios de coesão (admite valores de 0 a 1) e é determinado pela Equação 29:

$$K = 1 - \frac{\alpha\sigma}{C} \quad (29)$$

adotando-se um coeficiente (α) caracterizando-se 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.

4.6 Análise estatística e regressão múltipla

Realizou-se a análise de variância para o delineamento em blocos casualizados e o teste de Tukey para a comparação das médias dos parâmetros obtidos no estudo, todos a 5% de probabilidade. Após a análise dimensional, foi também realizada a análise de regressão múltipla para se descobrirem as relações entre os parâmetros adimensionais (SINNAKAUDAN et al., 2006). Os dados foram analisados usando-se o software Microsoft Excel XLSTAT, versão 2019.3.2 (ADDINSOFT, 2019).

5 RESULTADO E DISCUSSÃO

5.1 Características globais da hidráulica de escoamento concentrado em canais de leito argiloso

Na Tabela 4 estão dispostos os valores médios obtidos das variáveis hidráulicas avaliadas nos canais construídos em leito argiloso.

Tabela 4. Variáveis hidráulicas globais obtidas a partir dos fluxos ensaiados nos canais construídos em leito argiloso.

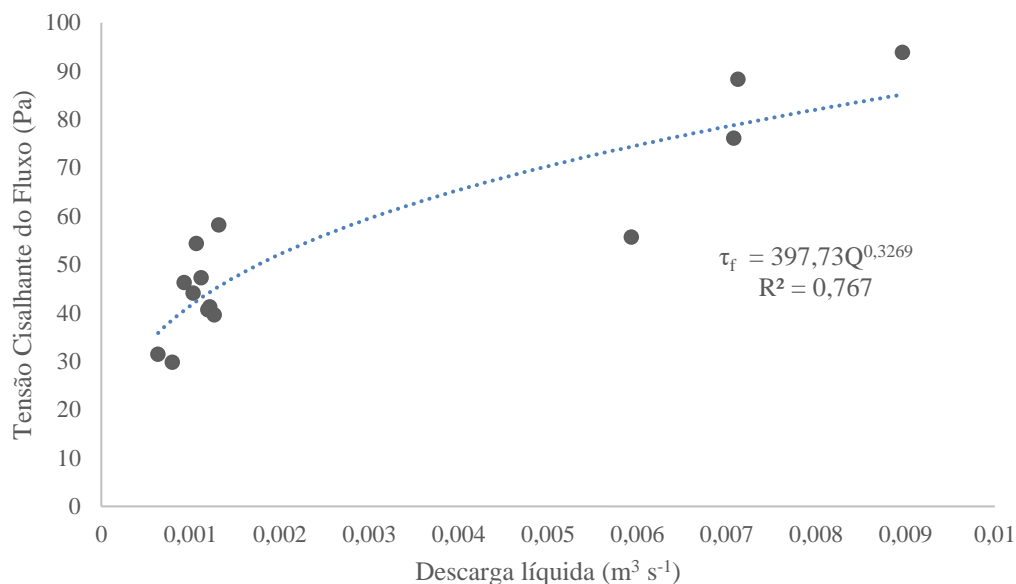
Fluxos aplicados x 10 ⁻³ (m ³ s ⁻¹)	Q x 10 ⁻³ (m ³ s ⁻¹)	S (m m ⁻¹)	R _h (m)	τ _f (Pa)
1,17	0,88b	0,139a	0,0259c	35,640b
2,20	1,10b	0,164a	0,0284bc	46,625b
6,83	1,17b	0,152a	0,0317b	49,077b
9,08	7,28a	0,1359a	0,0582a	78,552a

Médias seguidas pela mesma letra, na coluna, não diferem entre si (Tukey, P < 0,05). Sendo: Q – descarga líquida, S – declividade, R_h – Raio hidráulico e τ_f - tensão cisalhante do fluxo.

Observa-se variação significativa da descarga líquida, do raio hidráulico e das tensões de cisalhamento desenvolvidas pelo escoamento nos canais de fundo argiloso, em resposta ao incremento dos fluxos aplicados. No entanto, a diferenciação da tensão cisalhante do escoamento concentrado só apareceu para o maior nível de fluxo aplicado. Provavelmente, isso ocorreu devido ao elevado teor de argila e coesão do solo, o que demandou um nível de tensão cisalhante do escoamento mais alto, para uma variação significativa. Este valor de tensão de cisalhamento mais elevado deve estar relacionado com os maiores valores de desagregação do leito.

Na Figura 6, encontra-se um ajuste potencial das tensões cisalhantes produzidas pelo fluxo em função das descargas líquidas obtidas.

Figura 6. Relação Potencial das Tensões Cisalhantes (Pa) e das Descargas Líquidas obtidas nos canais de leito argiloso ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$).

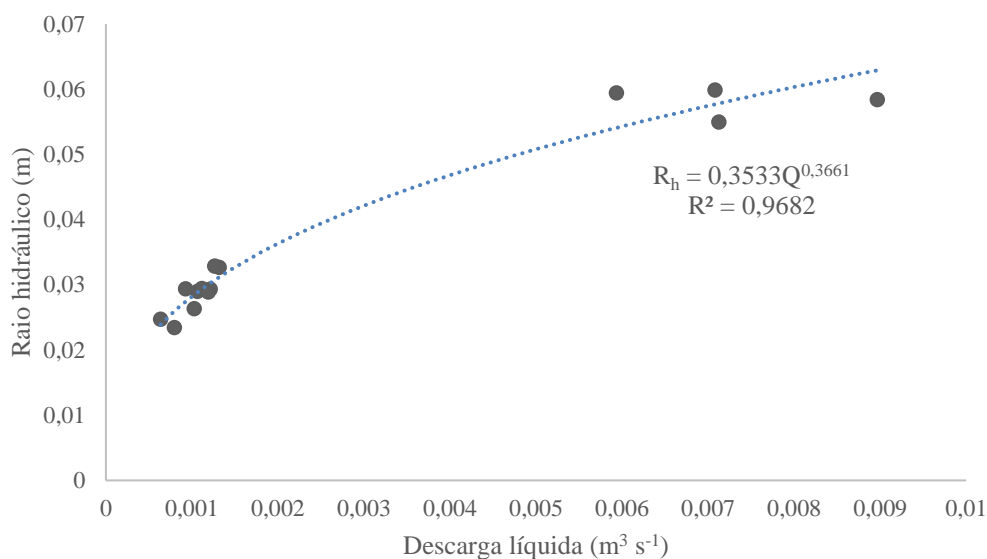


O aumento das tensões cisalhantes do fluxo, em decorrência das taxas de descargas líquidas obtidas, foram ajustadas numa relação de potência, para um coeficiente de determinação (R^2), igual a 0,767, demonstrando a resposta cisalhante do escoamento concentrado produzido, ou seja, sua capacidade de desagregar o solo do leito argiloso, o que está de acordo com Mrokowska (2018), ao descrever que quando ocorre o aumento da descarga líquida (Q) a tensão de cisalhamento do fluxo responderá significativamente.

O coeficiente da relação de potência foi igual a 0,3269, sendo este valor acima de 0,2624 que foi obtido por Bezerra et al. (2010) em um Cambissolo; e abaixo dos valores obtidos por Cantalice et al. (2005), que obtiveram 0,458 em um Argissolo Vermelho distrófico, e de Gonçalves (2007) com um valor de 0,41 em um Argissolo Vermelho Amarelo. Essas diferenças, podem estar relacionadas, ainda, ao pouco conhecimento da interação entre os fluxos aplicados e à natureza do solo.

Além disso, o aumento na descarga líquida resultou também no aumento do raio hidráulico pelo ajuste de potência (Figura 7), o que ocorreu devido à deformação da secção transversal do sulco, aumentando também outros parâmetros, como descritos em Cantalice et al. (2005).

Figura 7. Relação Potencial do Raio Hidráulico (m) x Descarga líquida ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) obtidas nos canais de leito argiloso



Neste caso, o melhor ajuste da curva de tendência foi em forma de potência, obtendo-se um $R^2=0,9682$, diferente de Bezerra et al. (2010) que, ao fazer a mesma relação, encontraram um melhor ajuste do tipo exponencial com $R^2=0,88$.

Essa relação se apresenta em concordância com Alves (2017), tanto o aumento da tensão de cisalhamento do fluxo, quanto do raio hidráulico, neste caso, se deu devido ao aumento significativo dos fluxos aplicados, pois a geometria do canal foi alterada pelo incremento do perímetro molhado e área, o que permitiu a diferenciação do raio hidráulico (R_h), acarretando o aumento significativo da tensão de cisalhamento do fluxo (τ_f). No entanto, no leito argiloso dos canais ora avaliados, houve unicamente aumento significativo da tensão de cisalhamento do fluxo para o maior fluxo ensaiado.

5.2 Resistência: tensão crítica de cisalhamento e erodibilidade do leito argiloso

Apresentam-se, na Tabela 5, os valores médios do coeficiente de atrito de Darcy-Weisbach (f), a velocidade média (V_m), a taxa de desagregação de solo (D_r), a concentração de sedimentos (C_s), o tamanho de sedimento sem dimensão (D_*), a tensão produzida (τ_y), tensão produzida adimensional (τ_r) e o parâmetro crítico de Shields (θ_{cr}) para o leito argiloso dos canais construídos.

Tabela 5. Parâmetros obtidos no experimento para canais coesivos.

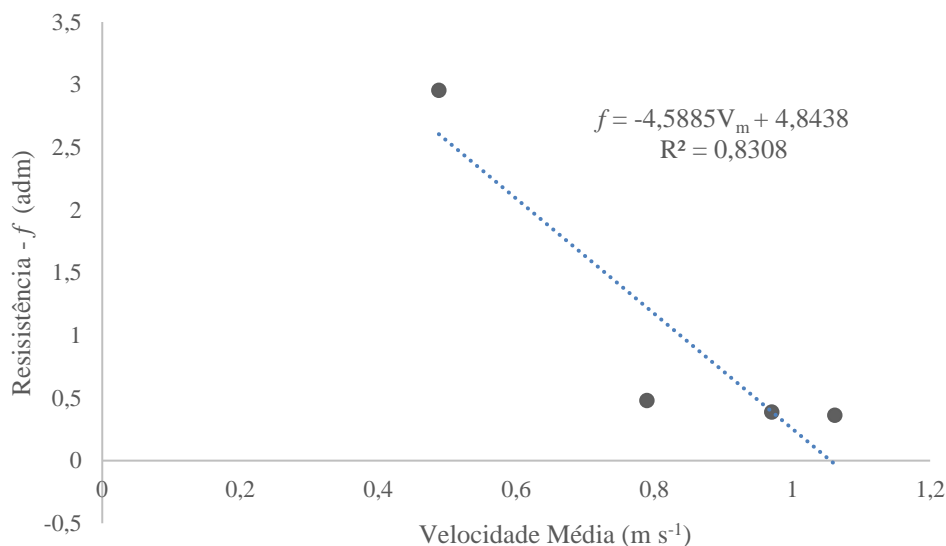
f (adm)	V_m (m s ⁻¹)	D_r (kg m ⁻² s ⁻¹)	C_s (kg m ⁻³)	D_* (adm)	τ_y (Pa)	τ_r (adm)	θ_{cr} (adm)
0,481b	0,789a	0,003a	1,986 ^a	0,005158a	147,33a	13,36a	0,639a
0,388b	0,970a	0,002a	1,741 ^a	0,005415a	148,015a	13,78a	0,639a
0,363b	1,292a	0,001a	1,292 ^a	0,006077a	131,98a	11,70a	0,635a
2,956a	0,488b	0,001a	0,771 ^a	0,007495a	92,24b	8,30b	0,630a

Médias seguidas pela mesma letra, na coluna, não diferem entre si (Tukey, $P < 0,05$). Sendo: f – coeficiente de atrito (f) de Darcy-Weisbach, V_m – velocidade média, D_h – taxa de desagregação de solo, C_s – concentração de sedimentos, D_* – tamanho de sedimento sem dimensão, τ_y – tensão produzida, τ_r – tensão produzida adimensional e θ_{cr} – parâmetro crítico de Shields.

Observa-se que houve diferença estatística para o último fluxo aplicado (Tabela 4), para os parâmetros do coeficiente de rugosidade de Darcy-Weisbach (f) e velocidade média do escoamento concentrado (V_m). Observa-se que a tensão produzida e a tensão produzida adimensional também tiveram uma variação estatística para o maior nível de fluxo aplicado, embora os mesmos tenham sido obtidos a partir dos testes de cisalhamento direto saturado, demonstrando o mesmo comportamento do leito argiloso sob os cisalhamentos aplicados.

A partir dos dados apresentados na Tabela 5, foi possível a obtenção de algumas relações, dentre elas, o ajuste demonstrado na Figura 8, obtido entre a velocidade média e o coeficiente de atrito de Darcy-Weisbach.

Figura 8. Comportamento da rugosidade hidráulica em função da velocidade média do escoamento concentrado nos canais de leitos argilosos.

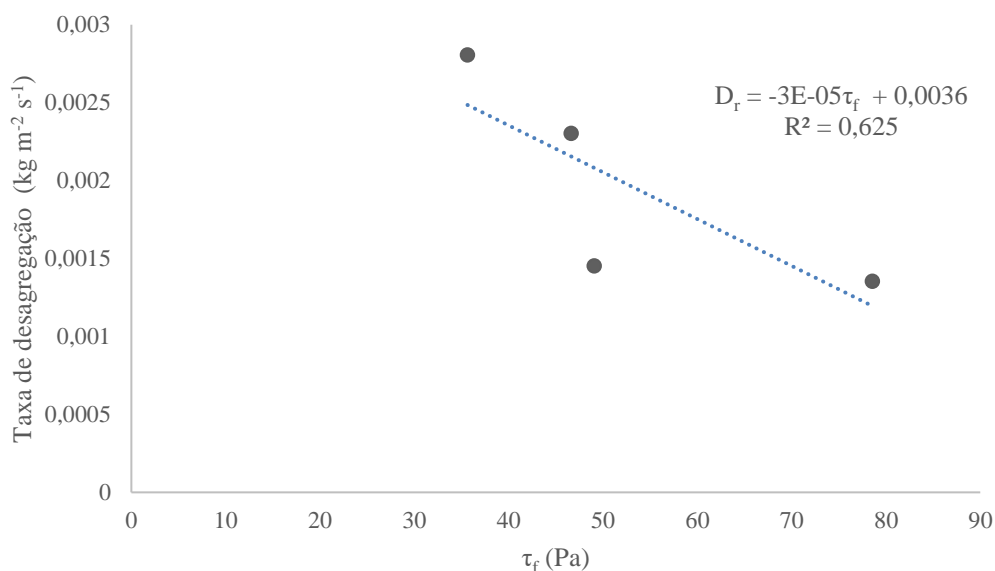


Observa-se na Figura 8, que quanto menor as velocidades sobre os canais de leito argiloso, maior foi a resistência hidráulica produzida, melhor ajustadas numa relação matemática linear, por meio de um coeficiente de determinação R^2 igual a 0,8308. Estes

resultados estão em concordância com Rodrigues et al. (2003), ao afirmarem que a variação da resistência do leito pode ser expressa na forma do coeficiente de atrito (f) de Darcy-Weisbach. Gualtieri et al. (2018) e Shen (2002) enfatizam que as equações tradicionais que quantificam a resistência ao escoamento, como Darcy-Weisbach, Chezy ou Manning, promovem bons ajustes em canais sem grandes elementos de rugosidade.

A tensão crítica de cisalhamento (τ_{cr}) e a erodibilidade (K_r) do solo argiloso foram determinadas a partir da relação linear entre as taxas de desagregação de solo (D_r), apresentada na Tabela 5, e as tensões cisalhantes do fluxo (τ_f), apresentadas na Tabela 4, conforme demonstrado na Figura 9.

Figura 9. Relação entre as taxas de desagregação (D_r) nos canais de leito argiloso e as tensões de cisalhamento do fluxo (τ_f) observados.



Os valores da tensão crítica de cisalhamento (τ_{cr}) e erodibilidade do leito argiloso (K_r) encontrados foram de 120 Pa e $-0,00003 \text{ kg N}^{-1} \text{ s}^{-1}$, respectivamente. Gen et al. (2017) avaliaram 12 tipos de solos, no Leste da China, e obtiveram valores de erodibilidade (K_r) variando entre $0,000456 \text{ kg N}^{-1} \text{ s}^{-1}$ a $0,826 \text{ kg N}^{-1} \text{ s}^{-1}$.

Gen et al. (2017) citam que é provável que a argila resiste melhor ao fluxo, após o umedecimento, por conta da maior coesão por meio do número relativamente maior de ligações entre as partículas de argila, resultando em menor valor de erodibilidade.

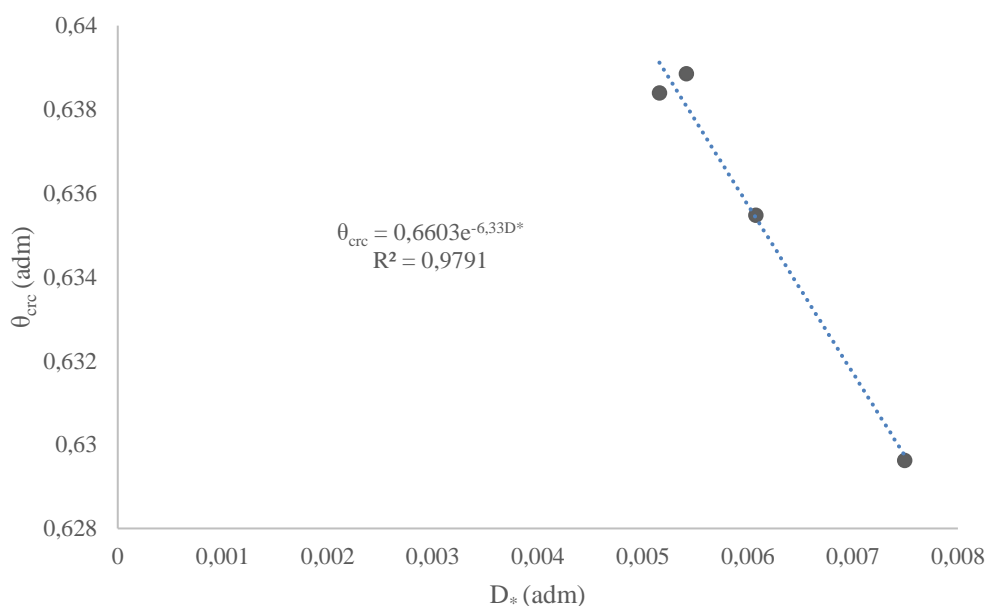
Lafayette et al. (2011) obtiveram erodibilidade de $0,0016 \text{ kg N}^{-1} \text{ s}^{-1}$ e tensão crítica de cisalhamento, de 4,27 Pa, para um Latossolo argilo arenoso. Para um Argissolo Vermelho distrófico arênico, Braida e Cassol (1996) determinaram valores de K_r igual a $0,0104 \text{ kg N}^{-1} \text{ s}^{-1}$ e τ_{cr} igual a 4,81 Pa. Observa-se que, no presente estudo, o valor de

erodibilidade do solo foi menor do que todos aqueles encontrados pelos autores citados acima, bem como, teve uma tensão crítica de cisalhamento bem mais elevada que as citadas pelos autores supracitados, demonstrando, marcadamente, o efeito da alta proporção de argila (60%) do leito dos canais pré-formados ou construídos, estando de acordo com Gen et al. (2017).

Oliveira et al. (2009) citam que uma correlação exponencial entre a taxa de desagregação e a tensão de falha do fluxo resulta em um melhor coeficiente de determinação (R^2). Entretanto com essa relação se obtém um valor da erodibilidade dinâmica, o que dificulta a aplicação prática principalmente em dimensionamento de projetos. Contudo, o conhecimento da erodibilidade do solo é essencial para a compreensão dos impactos humanos nas propriedades do solo (BREVIK et al., 2015).

Uma relação entre o parâmetro crítico de Shields (θ_{cr_c}) e o diâmetro de sedimento adimensional (D_*), usando-se a metodologia proposta por Zhang e Yu (2017) foi obtida (Figura 10), por meio de uma excelente relação exponencial ($R^2= 0,9791$).

Figura 10. Comportamento do parâmetro Shields, conforme a equação proposta por Zhang e Yu (2017), em relação ao diâmetro adimensional do sedimento argiloso.



Assim como observado nos estudos de Van Rijn (1984) e Yu e Lim (2003), o valor de θ_{cr} diminui com o aumento do diâmetro adimensional do sedimento argiloso (D_*), e ainda, o parâmetro crítico de Shields (θ_{cr_c}) é uma função exponencial positiva do diâmetro adimensional do sedimento argiloso D_* , como também averiguado em Zhang e Yu (2017).

As Figuras 11 e 12 mostram a relação da tensão produzida (τ_y) e da tensão produzida adimensional (τ_r) em relação à concentração de sedimentos obtida nos canais construídos de leito argiloso. O melhor ajuste obtido foi o exponencial, tanto para a relação entre a concentração de sedimentos e a tensão produzida com coeficiente de determinação de 0,8178, quanto para a relação concentração de sedimentos e tensão produzida adimensional (τ_r) com um coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,9537. Pode-se inferir a partir dessas relações que o solo de leito argiloso reage da mesma forma ao cisalhamento promovido pelo escoamento superficial e ao cisalhamento produzido no laboratório, ou seja, nos testes de cisalhamento direto em condição de umidade saturada.

Figura 11. Relação entre a Concentração de sedimentos e a tensão cisalhante produzida, nos canais de leito argiloso.

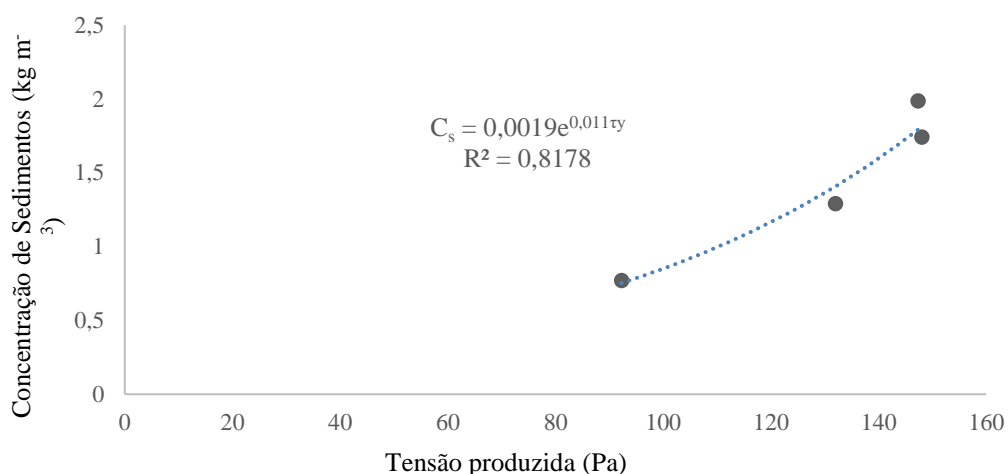
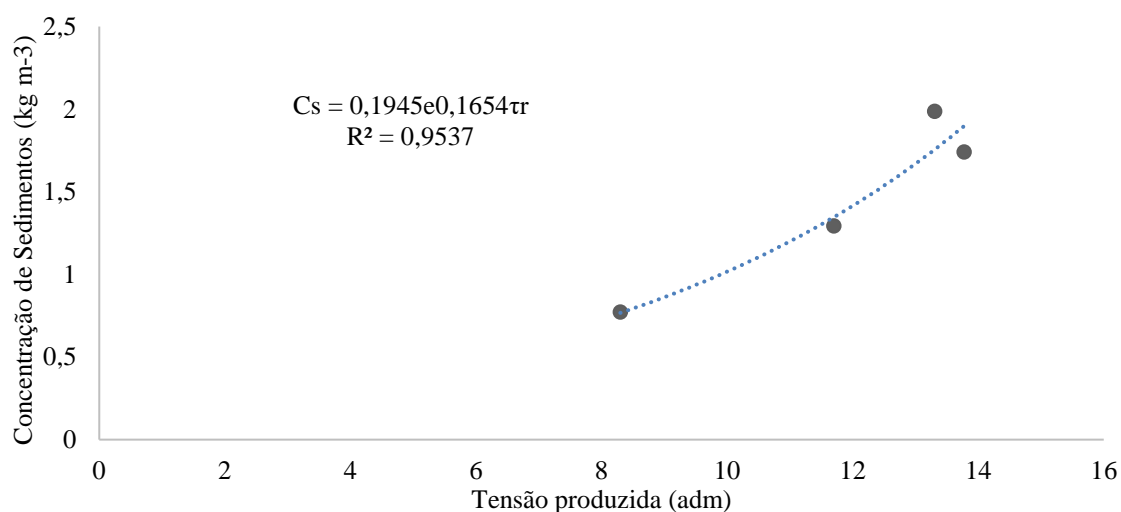


Figura 12. Relação exponencial entre a concentração de sedimentos e a tensão produzida adimensional nos canais argilosos.



5.3 Análise dimensional e velocidade permissível em canais de leito argiloso

A análise dimensional foi realizada levando-se em conta os parâmetros experimentais envolvidos no fenômeno da velocidade do escoamento em canais de leito argiloso, que se constituíram nas características hidráulicas e geométricas do canal sob escoamento concentrado e, pelas características do meio ou material que sofreu a ação do escoamento, ou seja, o leito argiloso. Então, doze parâmetros estão arranjados empiricamente na seguinte relação matemática (Equação 30):

$$V_m = f(Q, R_h, C_s, D_r, \rho, S, f, C, C_f, \tau_f, \tau_{cr}) \quad (30)$$

em que V_m é a velocidade média do fluxo ($m\ s^{-1}$), Q a descarga líquida ($m^3\ s^{-1}$), R_h o raio hidráulico do sulco (m), C_s a concentração de sedimentos ($kg\ L^{-1}$), D_r é a taxa de desagregação do solo pelo fluxo concentrado ($kg\ m^{-2}\ s^{-1}$), ρ a densidade da água ($kg\ m^{-3}$), S a declividade do sulco ($m\ m^{-1}$), f é o coeficiente de atrito de Darcy-Weisbach (adm), C o coeficiente de coesão (Pa), C_f coesão de falha, na ruptura da amostra (Pa), τ_f tensão de cisalhamento do fluxo (Pa) e τ_{cr} é a tensão crítica do cisalhamento (Pa).

De acordo com Fox et al. (2014), na aplicação do teorema Pi ou de Buckingham para a análise dimensional, as dimensões L, M e T foram tomadas como fundamentais na especificação das dimensões de cada um dos parâmetros envolvidos, descritos a seguir: $[V_m]=L\ T^{-1}$; $[Q]=L^3\ T^{-1}$; $[R_h]=L$; $[C_s]=M\ L^{-3}$; $[D_r]=M\ L^{-2}\ T^{-1}$; $[\rho]=M\ L^{-3}$; $[C]=M\ L^{-1}\ T^{-2}$; $[C_f]=M\ L^{-1}\ T^{-2}$; $[\tau_f]=M\ L^{-1}\ T^{-2}$; $[\tau_{cr}]=M\ L^{-1}\ T^{-2}$; restando S e f que são adimensionais.

Analisando-se os parâmetros escolhidos e as propriedades π , observa-se que a declividade do sulco (S) e o coeficiente de atrito de Darcy-Weisbach (f), já são termos Pi, por serem adimensionais, correspondentes a π_4 e π_5 , respectivamente. Como realizou-se a relação das variáveis que apresentam as mesmas dimensões de referência, têm-se outros termos Pi, como no caso da densidade da água (ρ) e da concentração de sedimentos (C_s); do coeficiente de coesão (C) e da coesão de falha na ruptura da amostra (C_f); e da tensão de cisalhamento do fluxo (τ_f) e tensão crítica do cisalhamento (τ_{cr}). Desta forma, para determinação dos dois grupos restantes, foram considerados os parâmetros V_m , R_h e C_s como repetitivos, e assim determinados π_1 e π_2 . Daí se produziu o arranjo dos grupos π .

Tendo em vista que se escolheu trabalhar com dez variáveis dimensionais ($k=10$), e que três números de dimensões (M, L e T) descrevem este processo, logo, a diferença entre o número de variáveis dimensionais que descrevem um processo (k), e o número de

dimensões de referência (r), necessárias para definir unidades, resultou em sete números de grupos sem dimensão, ou seja, os termos Pi, apresentados a seguir (Equações de 31 a 37):

$$\pi_1 = \frac{Q}{VR_h^2} \quad (31)$$

$$\pi_2 = \frac{D_r}{VC_s} \quad (32)$$

$$\pi_3 = \frac{\rho}{C_s} \quad (33)$$

$$\pi_4 = S \quad (34)$$

$$\pi_5 = f \quad (35)$$

$$\pi_6 = \frac{C}{C_f} \quad (36)$$

$$\pi_7 = \frac{\tau_f}{\tau_c} \quad (37)$$

Dessa forma, eles foram arranjados na forma dos grupos de Pi (Equação 38) e no arranjo dos grupos adimensionais (Equação 39), a seguir

$$\pi_1 = f(\pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5, \pi_6, \pi_7) \quad (38)$$

$$\frac{Q}{VR_h^2} = f\left(\frac{D_r}{VC_s}, \frac{\rho}{C_s}, S, f, \frac{C}{C_f}, \frac{\tau_f}{\tau_c}\right) \quad (39)$$

Em seguida, a partir da obtenção dos termos adimensionais, foi possível calcular os seus valores numéricos, dispostos na Tabela 6, como também prosseguir nas análises de regressão e obtenção de um novo modelo.

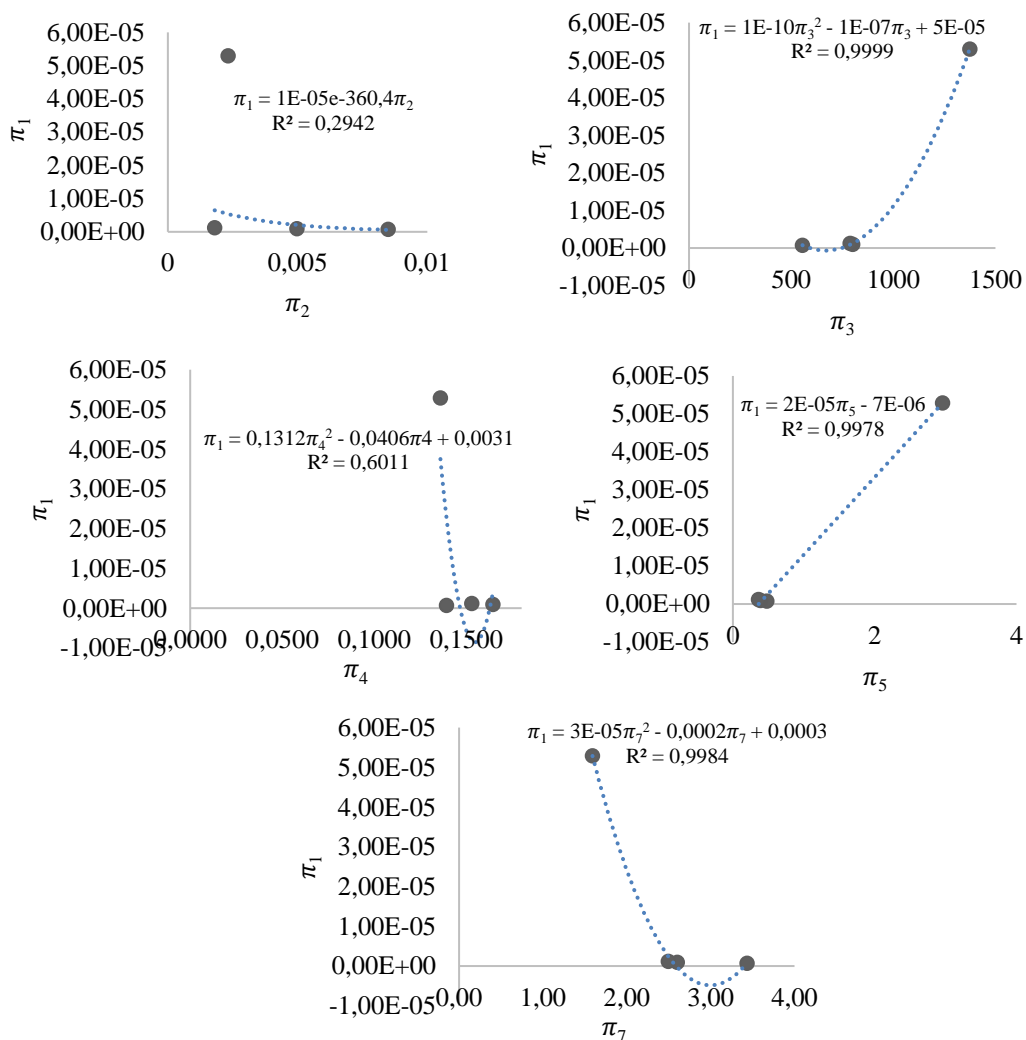
Tabela 6. Valor numérico dos termos Pi obtidos e envolvidos no fenômeno da velocidade do escoamento em canais de leito argiloso.

Ensaio	π_1	π_2	π_3	π_4	π_5	π_6	π_7
1	6,75E-07	0,020	325,65	0,161	0,800	33,192	3,006
2	1,16E-06	0,006	505,63	0,141	0,400	33,192	2,906
3	4,76E-07	0,002	748,40	0,128	0,370	33,192	3,811
4	5,40E-07	0,005	640,98	0,128	0,355	33,192	4,019
5	8,72E-07	0,012	317,29	0,188	0,405	33,192	2,206
6	9,96E-07	0,002	762,90	0,161	0,394	33,192	2,537
7	1,05E-06	0,005	534,25	0,141	0,356	33,192	2,950
8	7,64E-07	0,001	1588,59	0,168	0,398	33,192	2,720
9	1,08E-06	0,002	689,24	0,154	0,217	33,192	2,302
10	1,43E-06	0,002	710,18	0,179	0,472	33,192	2,060
11	1,42E-06	0,002	774,47	0,121	0,335	33,192	3,029

12	8,70E-07	0,001	983,16	0,158	0,429	33,192	2,592
13	6,14E-05	0,001	1889,61	0,161	2,970	33,192	1,278
14	4,27E-05	0,002	1476,99	0,161	2,732	33,192	1,358
15	7,26E-05	0,004	1088,94	0,128	4,900	33,192	1,575
16	3,50E-05	0,002	1041,49	0,094	1,223	33,192	2,153

Observa-se que todos os termos obtidos tiveram uma variação, exceto o π_6 , pois corresponde à relação entre dois parâmetros constantes em todo o experimento. Considerando todas essas informações, foram testadas as relações entre os parâmetros adimensionais, apresentadas na Figura 13.

Figura 13. Relações entre os parâmetros adimensionais dependentes e independentes.



Os gráficos revelam uma linearidade na relação entre π_1 e π_5 ($R^2=0,9978$), relação exponencial entre π_1 e π_2 , também uma relação polinomial entre π_1 e π_3 , π_4 , π_7 . Não houve correlação entre π_1 e π_6 , e conseqüentemente, π_6 não foi levado em consideração no

desenvolvimento do modelo. Nesse ajuste, consideraram-se os quatro (4) valores experimentais obtidos de cada variável.

Os valores de velocidade permissível calculada pela equação proposta por Mirtskhoulava (1966b) (Equação 24) encontram-se dispostos na Tabela 7. Além disso, considerando-se o termo dependente como também a presença da velocidade no termo π_1 , foram obtidos novos valores de velocidade permissível, a partir do ajuste matemático realizado com o π_1 , que também estão apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7. Velocidades Permissíveis (m s^{-1}) calculadas segundo Mirtskhoulava (1966b) e de acordo com o π_1 produzido a partir do experimento nos canais de leito argiloso pré-formados.

Velocidade Permissível Mirtskhoulava (1966b)	Velocidade Permissível $\pi_1(Q/VR_h^2)$	Diferença (%)
1,38	1,11	19,57
1,42	1,41	0,70
1,38	1,04	24,64
1,37	1,45	5,84
1,42	1,26	11,27
1,42	1,29	9,15
1,42	1,42	0
1,39	1,48	6,47
1,46	1,14	21,92
1,45	1,23	15,17
1,45	1,17	19,31
1,42	1,07	24,65
1,60	2,63	64,38
1,58	2,36	49,37
1,60	1,97	23,13
1,60	1,68	1,88

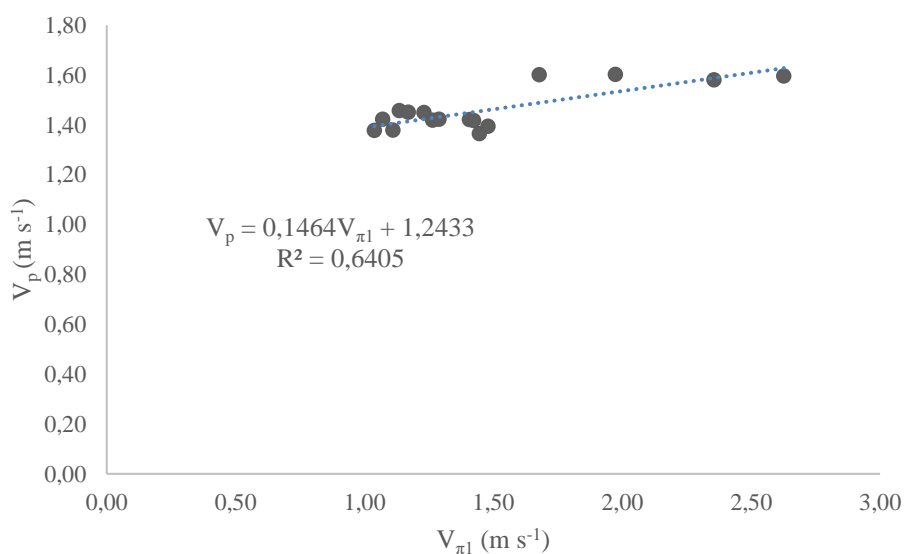
Para se obter o cálculo da velocidade permissível proposta por Mirtskhoulava (1966b), foram utilizados os seguintes parâmetros: $d_{50} = 0,000960 \text{ m}$; $g = 9,81 \text{ m s}^{-2}$; $m = 0,8$ (admitindo-se uma área recém cultivada); $C = 48321 \text{ Pa}$; $C_f = 1691,24 \text{ Pa}$; $\sigma = 17,41$, $K = 0,9991$; $\gamma_s = 26241,8 \text{ N m}^{-3}$; $\gamma = 9810 \text{ N m}^{-3}$ e o raio hidráulico R_h constante na Tabela 3. Salienta-se que para obtenção dos cálculos, foram realizados ajustes dos parâmetros para as unidades do SI.

Percebe-se que a velocidade calculada pela equação de Mirtskhoulava é próxima à velocidade calculada pela equação do π_1 . A diferença entre as duas varia de 0 a 64,38%, e essa diferença pode estar associada à descarga líquida que é utilizada na Equação proposta ($V\pi_1$). De acordo com Mirtskhoulava (1991), solos de textura argilosa com valores de coesão variando entre $0,5 - 0,6 \times 10^5 \text{ Pa}$ podem assumir velocidades permissíveis entre $1,56$ a $2,72 \text{ m s}^{-1}$. Essa afirmação endossa os valores obtidos pela

equação obtida com o π_1 , que variaram de 1,03 a 2,62 m s^{-1} para um solo com coesão igual a $0,48 \times 10^5 \text{ Pa}$.

A partir das velocidades permissíveis (m s^{-1}) calculadas segundo Mirtskhoulava (1966b) e de acordo com o π_1 produzido a partir do experimento nos canais de leito argiloso, realizou-se a regressão e obteve-se uma boa relação linear, como pode ser verificada na Figura 14.

Figura 14. Regressão entre a velocidade permissível calculada pela Equação de Mirtskhoulava e pelo termo π_1 produzido a partir do experimento nos canais de leito argiloso.



Verifica-se que o π_1 realmente tem uma boa relação com a Equação de Mirtskhoulava, obtendo-se um $R^2 = 0,6405$, e confirmando-se a proximidade dos valores obtidos e dispostos na Tabela 5. A equação de Mirtskhoulava foi elaborada para se identificar a velocidade máxima que o escoamento pode atingir, e que ao ultrapassar essa velocidade, o solo começa a desagregar.

Lombardi Neto e Drugowich (1994), apresentam que para canais escoadouros abertos, com material de alto teor de argila ($>25\%$), declive maior que 10%, e com a presença de vegetação de densidade média, a velocidade máxima permitida varia entre 0,75 e 1,05 m s^{-1} e com vegetação densa a velocidade pode chegar entre 1,35 e 1,50 m s^{-1} . Já Infante e Segerer (2010) citam que para canais construídos com material argiloso, dependendo do teor de argila, essa velocidade máxima pode variar de 0,50 a 0,70 m s^{-1} , e ainda ressaltam que quando a base do canal é composta por pedregulhos, essa velocidade pode chegar a 1,20 m s^{-1} .

Neste sentido, avaliando a tabela 3, onde apresenta-se a velocidade média obtida neste estudo, e a tabela 5 onde têm-se as velocidades permissíveis calculadas, nota-se que, durante o experimento, a velocidade não atingiu o seu valor máximo para que houvesse a desagregação do solo. As médias das velocidades máximas permitidas foram 1,39; 1,41; 1,44 e 1,60 pela equação de Mirtskhoulava e 1,25; 1,36; 1,15 e 2,16 pela equação obtida neste estudo. Assim, os valores de velocidade constantes na Tabela 5, validam tanto a aplicação da equação de Mirtskhoulava, quanto os valores de velocidade obtidos a partir da aplicação do termo π_1 .

5.3.1 Regressão Múltipla

Para se obter a regressão múltipla dos termos π_i , foi necessário a retirada do π_6 , uma vez que este apresentou um valor constante. Assim, a variável dependente Y corresponde ao π_1 , e X_1, X_2, X_3, X_4, X_6 , são respectivamente, $\pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5$ e π_7 . Para este estudo, foi adotada a regressão múltipla a 5%. Abaixo, está apresentada a matriz de correlação dos termos π_i (Tabela 8).

Tabela 8. Matriz de coeficiente de correlação para os termos π_i , no formato dos termos adimensionais.

Variáveis	π_2 (D_r/VC_S)	π_3 (ρ/C_S)	π_4 (S)	π_5 (f)	π_7 (τ_f/τ_c)	π_1 (Q/VR_p^2)
π_2 (D_r/VC_S)	1	-0,614	0,217	-0,114	0,221	-0,225
π_3 (ρ/C_S)	-0,614	1	0,006	0,549	-0,556	0,647
π_4 (S)	0,217	0,006	1	-0,132	-0,304	-0,224
π_5 (f)	-0,114	0,549	-0,132	1	-0,680	0,960
π_7 (τ_f/τ_c)	0,221	-0,556	-0,304	-0,680	1	-0,727
π_1 (Q/VR_p^2)	-0,225	0,647	-0,224	0,960	-0,727	1

Nível de significância: $p < 0,05$.

Utilizando o método de seleção de variáveis Melhor modelo, 5 variáveis foram mantidas no modelo. Foi obtido um coeficiente de determinação igual a 98%, da variabilidade da variável dependente π_1 , sendo ela explicada pelas 5 variáveis independentes. Ainda sobre a estatística, baseando-se na soma de quadrados tipo III, a variável π_2 não traz informações relevantes; já as variáveis π_3, π_4, π_5 e π_7 trazem informações significantes sobre a variável π_1 , sendo π_5 a mais influente. Assim, o melhor modelo foi o apresentado pela Equação 40 a seguir:

$$\pi_1 = (4,75)10^{-5} + (3,71\pi_2)10^{-4} + (1,02\pi_3)10^{-5} - (2,40\pi_4)10^{-4} + (1,20\pi_5)10^{-5} - (9,73\pi_7)10^{-6} \quad (40)$$

Substituindo-se os termos π_i pelas variáveis aplicadas no estudo dimensional tem-se a Equação 41:

$$\frac{Q}{VR_h^2} = (4,75)10^{-5} + \left(3,71 \frac{D_r}{VC_s}\right) 10^{-4} + \left(1,02 \frac{\rho}{C_s}\right) 10^{-5} - (2,4S)10^{-4} + (1,20f)10^{-5} - \left(9,73 \frac{\tau_f}{\tau_c}\right) 10^{-6} \quad (41)$$

Ainda, aplicando-se a correlação de Pearson a 1% à matriz produzida (Tabela 9), percebe-se a influência da variável π_5 em relação à variável π_1 , apresentando um alto coeficiente de determinação de Pearson igual a 0,922. Isto significa uma concordância entre a regressão múltipla a 5% (Melhor modelo) e a Matriz de Pearson, sobre a significância estatística das variáveis atribuídas ao estudo, e conseqüentemente ao modelo.

Tabela 9. Matriz do coeficiente de correlação de Pearson para os termos adimensionais obtidos para os canais construídos em leito argiloso.

Variáveis	π_1 (Q/VR_h^2)	π_2 (D_r/VC_s)	π_3 (ρ/C_s)	π_4 (S)	π_5 (f)	π_7 (τ_f/τ_c)
π_1 (Q/VR_h^2)	1	0,050	0,419	0,050	0,922	0,528
π_2 (D_r/VC_s)	0,050	1	0,377	0,047	0,013	0,049
π_3 (ρ/C_s)	0,419	0,377	1	0,000	0,301	0,310
π_4 (S)	0,050	0,047	0,000	1	0,017	0,093
π_5 (f)	0,922	0,013	0,301	0,017	1	0,462
π_7 (τ_f/τ_c)	0,528	0,049	0,310	0,093	0,462	1

Nível de significância: $p < 0,01$.

Vale salientar que os modelos de regressão obtidos nesta pesquisa foram válidos para os níveis de fluxo aplicados aos canais de leito muito argiloso desse experimento, com uma proporção em torno de 60% da fração argila. A aplicabilidade desses modelos precisa ser estendida para condições de maiores níveis de fluxo aplicado.

6 CONCLUSÕES

Os dados experimentais e as análises realizadas permitem concluir:

Constatou-se que só o nível de fluxo mais elevado conseguiu gerar uma tensão de cisalhamento significativa, capaz de deformar a secção transversal do canal de leito argiloso.

As tensões de cisalhamento geradas pelos fluxos 35,64-78,55 Pa não foram suficientes para atingir a tensão crítica de cisalhamento do leito 120 Pa dos canais argilosos estudados, para que assim se desse início aos processos de desagregação significativa nesses canais.

A erodibilidade do leito argiloso (K_r) foi de $-0,00003 \text{ kg N}^{-1} \text{ s}^{-1}$.

Aplicando-se a abordagem proposta por Zhang e Yu (2017), observou-se uma relevante relação linear ($R^2=0,9791$) entre o parâmetro crítico de Shields, calculada pelo modelo proposto pelos autores citados, e o tamanho do sedimento sem dimensão, para as condições ensaiadas.

Observa-se que a tensão produzida e a tensão produzida adimensional também tiveram uma variação estatística para o maior nível de fluxo aplicado, embora os mesmos tenham sido obtidos a partir dos testes de cisalhamento direto saturado, demonstrando o mesmo comportamento do leito argiloso sob diferentes cisalhamentos aplicados.

Neste estudo, com base no Teorema de Buckingham desenvolveu-se uma nova relação para previsão da velocidade permissível em canais de leito argiloso, resultando na seguinte fórmula:

$$\frac{Q}{VR_h^2} = (4,75)10^{-5} + \left(3,71 \frac{D_r}{VC_s}\right) 10^{-4} + \left(1,02 \frac{\rho}{C_s}\right) 10^{-5} - (2,45)10^{-4} + (1,20f)10^{-5} - \left(9,73 \frac{\tau_f}{\tau_c}\right) 10^{-6}$$

A equação estabelecida pelo π_1 foi eficiente para estimar a velocidade permissível quando comparada à equação de Mirskhoulava, para canais de leito argiloso pré-formados sobre o horizonte Bt do Argissolo de textura muito argilosa.

Os valores experimentais da velocidade do escoamento superficial concentrado nos canais de leito argiloso, validam tanto a aplicação da equação de Mirskhoulava, quanto os valores de velocidade obtidos a partir da aplicação do termo π_1 .

Considerando-se os diversos parâmetros, abordados neste estudo, que interferem na velocidade máxima permissível, o denominado π_5 , que se constitui no coeficiente de

atrito de Darcy-Weisbach, foi o mais influente no modelo, apresentando um coeficiente de determinação de Pearson igual a 0,922, em relação à variável dependente (π_1).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADDINSOFT, XLSTAT 2019: Data Analysis and Statistical Solution for Microsoft Excel, 2019.

AGUIRRE-PE, J.; OLIVERO, M. L.; MONCADA, A. T. Transporte de sedimentos en cauces de alta pendiente. **Ingeniería del Agua**, v. 7, n. 4, 2000.

AKINOLA, A. I.; WYNN-THOMPSON, T.; OLGUN, C. G.; CUCEOGLU, F.; MOSTAGHIMI, S. Influence of Sample Holding Time on the Fluvial Erosion of Remolded Cohesive Soils. **J. Hydraul. Eng.**, v. 144, n. 8, 2018. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001504](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001504).

ALFADHLI, I.; YANG, S. Q.; IVAKUMAR, M. Influence of vertical motion on initiation of sediment movement. **J. Water Resour. Prot.**, v. 6, n. 18, p. 1666–1681, 2014.

ALVES, Carlos Vítor Oliveira. **Velocidade Crítica do Escoamento Superficial Concentrado e Resistência Mecânica ao Cisalhamento Direto em Argissolo**. Tese (Doutorado em Ciência do Solo). Universidade Federal Rural de Pernambuco, Departamento de Agronomia, Recife, 2017.

AMOS, C. L.; BERGAMASCO, A.; UMGIESSER, G.; CAPPUCCI, S.; CLOUTIER, D.; DENAT, L.; FLINDT, M.; BONARDI, M.; CRISTANTE, S. The stability of tidal flats in Venice Lagoon—the results of in-situ measurements using two benthic, annular flumes. **J. Marine Syst.**, v. 51, n. 1–4, p. 211–241, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2004.05.013>.

ANCEY, C. Plasticity and geophysical flows: A review. **J. Non-Newtonian Fluid Mech.**, v. 142, n. 1–3, p. 4–35, 2007.

ARAÚJO, M. A. V. da C. **Erosion mechanisms in marine sediments**. Tese (Doutorado em Engenharia). Universidade do Minho, Guimarães, p. 283, 2004.

ARE, F. E. **Thermal abrasion on coasts**. Proc. Fourth Int. Conf. on Permafrost. National Academy Press. Washington D. C., p. 24–28, 1983.

ASHLEY, R. M.; BERTRAND-KRAJEWSKI, J.L.; HVITVED-JACOBSEN, T.; VERBANCK, M. **Solids in Sewers: Characteristics, Effects and Control of Sewer Solids and Associated Pollutants**. IWA Publishing, v. 4, London, UK, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.2166/9781780402727>

BALE, A. J.; STEPHENS, J. A.; HARRIS, C. B. Critical erosion profiles in macro-tidal estuary sediments: Implications for the stability of intertidal mud and the slope of mud banks. **Cont. Shelf Res.**, v. 27, n. 18, p. 2303–2312, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.csr.2007.05.015>.

BALE, A. J.; WIDDOWS, J.; HARRIS, C. B.; STEPHENS, J. A. Measurements of the critical erosion threshold of surface sediments along the Tamar estuary using a mini-annular flume. **Cont. Shelf Res.**, v. 26, n. 10, p. 1206–1216, 2006.

- BANASIAK, R. Hydraulic performance of sewer pipes with deposited sediments. **Water Sci. Technol.**, v. 57, p. 1743–1748, 2008. doi:10.2166/wst.2008.287
- BARBOSA, M. C. R.; LIMA, H. M. de. Resistência ao Cisalhamento de Solos e Taludes Vegetados com Capim Vetiver. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 37, p. 113-120, 2013.
- BEHESHTI, A. A.; ATAIE-ASHTIANI, B. Analysis of threshold and incipient conditions for sediment movement. **Coastal Eng.**, v. 55, n. 5, p. 423-430, 2008.
- BEN-HUR, M.; AGASSI, M. Predicting interrill erodibility factor from measured infiltration rate. **Water Resour. Res.**, n. 33, p. 2409-2415, 1997. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/97WR01980>.
- BENJAMIN, J. G.; CRUSE, R. M. Measurement of shear strength and bulk density of soil aggregates. **Soil. Sci. Soc. Am. J.**, v. 49, p. 1248-1251, 1985.
- BERNARDINO, J. C. de M. **Estabilidade de cursos d'água escoando sobre leitos aluvionares não coesivos**. Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do Título de Mestre em Engenharia, São Paulo, 2005.
- BEZERRA, S. A.; CANTALICE, J. R. B.; FILHO, M. C.; SOUZA, W. L. da S. Características hidráulicas da erosão em sulcos em um cambissolo do semiárido do Brasil. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, v. 34, n. 4, p. 1325-1332, 2010.
- BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Bulk Density. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis: Physical and Mineralogical Methods. Part 1**. Madison: American Society of Agronomy, p. 363-375, 1986.
- BLACK, K. S.; TOLHURST, T. J.; PATERSON, D. M.; HAGERTHEY, S. E. Working with natural cohesive sediments. **Journal of Hydraulic Engineering-ASCE**, n. 128, v. 1, p. 2-8, 2002.
- BOMBARDELLI, W. W. A.; CAMARGO, A. P. de; FRIZZONE, J. A.; LAVANHOLI, R.; ROCHA, H. D. da. Local head loss caused in connections used in micro-irrigation systems. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 23, n. 7, p. 492-498, 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v23n7p492-498>
- BONAKDARI, H.; EBTEHAJ, I. Verification of equation for non-deposition sediment transport in flood water canals. **In: Proceedings of the 7th International Conference on Fluvial Hydraulics, River Flow 2014; Lausanne; Switzerland; 3– 5 September, 2014, p. 1527–1533, 2014a.**
- BONAKDARI, H.; EBTEHAJ, I. Study of sediment transport using soft computing technique. **In: 7th International conference on fluvial hydraulic, RIVER FLOW 2014; Lausanne; Switzerland, 3–5 September, p. 933–940, 2014b. doi:10.1201/b17133-126**

BRAIDA, J. A.; CASSOL, E. A. Erodibilidade em sulcos e em entressulcos de um Podzólico Vermelho-Escuro franco arenoso. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 20, p. 127-134, 1996.

BREVIK, E. C.; CERDÀ, A.; MATAIX-SOLERA, J.; PEREG, L.; QUINTON, J.N.; SIX, J.; VAN OOST, K. **The interdisciplinary nature of Soil**, v. 1, p. 117–129, 2015. <http://dx.doi.org/10.5194/soil-1-117-2015>.

BRYAN, R. B. Soil erodibility and processes of water erosion on hill-slope. **Geomorphology**, v. 32, p. 385–415, 2000.

BUCKINGHAM, E. On physically similar systems: illustrations of the use of dimensional equations. **Physical Review**, v. 4, p. 347–376, 1914. Disponível em: <https://doi.org/10.1103/PhysRev.4.345>.

BUSARI, A. O.; LI, C. W. Bulk drag of a regular array of emergent blade-type vegetation stems under gradually varied flow. **Journal of Hydro-environment Research**, v. 12, p. 59–69, 2016. doi: 10.1016/j.jher.2016.02.003

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. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, v. 29, n.4, p. 597-607, 2005.

CAO, Z.; PENDER, G.; MEN, J. Explicit formulation of the Shields Diagram for incipient motion of sediment. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 132, n. 10, p. 1097-1099, 2006.

CARSTENS, M. R. An analytical and experimental study of bed ripples under water waves. **Atlanta: Georgia Institute of Technology**, 1964. Disponível em: https://smartech.gatech.edu/bitstream/handle/1853/42085/a-798_326947_v1.pdf.

CASAS, G. F.; ZAMUDIO HUERTAS, E.; GARCÍA UBAQUE, C. A. Demostración y análisis del golpe de ariete por el método de los promedios aritméticos. **Revista Tecnura**, v. 19, p. 143-151, 2015. doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.SE1.a12

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. **Pesq. agropec. bras.**, v. 39, n. 7, p. 685-690, 2004. Disponível em: <https://www.scielo.br/pdf/pab/v39n7/21311.pdf>

CERDÀ, A. Soil aggregate stability in three Mediterranean environments. **Soil Technol.**, v. 9, p. 133-141, 1996.

COOK, T. L.; YELLEN, B. C.; WOODRUFF, J. D.; MILLER, D. Contrasting human versus climatic impacts on erosion. **Geophys. Res. Lett.**, v. 42, p. 6680-6687, 2015. Disponível em: <https://10.1002/2015GL064436>.

COUTO, S. M.; SANTOS, A. E. O. dos; VIEIRA, S. M. J.; SILVA, D. J. P. da. Determinação da força de Determinação da força de arrasto e da velocidade terminal de frutos de café pela técnica de elementos finitos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 8, n. 2/3, p. 274-283, 2004.

CURRAN, J. C.; HESSION, W. C. Vegetative impacts on hydraulics and sediment processes across the fluvial system. **J. Hydrol.** v. 505, p. 364-376, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.10.013>.

DALPIAZ, Diego. **Simulação numérica de transporte e Depósito de sedimentos em Suspensão em Canal Inclinado**. Dissertação (mestrado em Engenharia e Tecnologia de Materiais). Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, Porto Alegre, 2014.

DARBY, S. E.; THORNE, C. R. Development and testing of a riverbank stability analysis. **J. Hydraul. Eng.**, v. 122, p. 433-454, 1997.

DEBNATH, K.; NIKORA, V.; ABERLE, J.; WESTRICH, B.; MUSTE, M. Erosion of cohesive sediments: Resuspension, bed load, and erosion patterns from field experiments. **J. Hydraul. Eng.**, v. 133, n. 5, p. 508-520, 2007. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2007\)133:5\(508\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2007)133:5(508)).

DEFERSHA, M. B.; MELESSE, A. M. Effect of rainfall intensity, slope and antecedent moisture content on sediment concentration and sediment enrichment ratio. **Catena**, v. 90, p. 47-52, 2012. doi: 10.1016/j.catena.2011.11.002

DÍAZ, Rafael P. Sacsa. **Análise Dimensional e Simulação da Transferência de Calor e Massa em Reservatórios de Gás Natural Adsorvido**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2012.

DUBUAT, L. G. **Principes d'hydraulique et de pyrodynamique**. Paris, Francia, 1779.

DUPUIS, V.; PROUST, S.; BERNI, C.; PAQUIER, A. Compound channel flow with a longitudinal transition in hydraulic roughness over the floodplains. **Environmental Fluid Mechanics**, v. 17, n. 5, p. 903-928, 2017. doi: 10.1007/s10652-017-9525-0

DYM, C. L.; LITTLE, P.; ORWIN, E. J.; SPJUT, R. E. **Introdução à Engenharia: Uma Abordagem Baseada em Projeto**. Bookman; Edição: 3, 2010.

EBTEHAJ, I.; BONAKDARI, H.; SHARIFI, A. Design criteria for sediment transport in sewers based on self-cleansing concept. **J. Zhejiang Univ. Sci. A.**, v. 15, n. 11, p. 914-924, 2014. Disponível em: <http://10.1631/jzus.A1300135>.

EBTEHAJ, I.; BONAKDARI, H. Evaluation of sediment transport in sewer using artificial neural network. **Eng. Appl. Comput. Fluid. Mech.**, v. 7, n. 3, p. 382-392, 2013. Doi: 10.1080/1942060.2013.11015479

ENRIQUEZ, A. G.; SILVA, D. P. da; PRUSKI, F. F.; GRIEBELER, N. P.; CECON, P. R. Erodibilidade e tensão crítica de cisalhamento no canal de drenagem em Estrada rural não pavimentada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 2, p. 160-165, 2015.

FERRO, V. New Flow-Resistance Law for Steep Mountain Streams Based on Velocity Profile. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 143, n. 8, p. 04017024 1-6, 2017. doi: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001208

FIORI, A. P.; CARMIGNANI, L. **Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas. aplicações na estabilidade de taludes**. 2.ed., Universidade Federal do Paraná, Curitiba, p. 602, 2009.

FLANAGAN, D. C.; NEARING, M. A. **Water Erosion Prediction Project**. Hillslope Profile and Watershed Model Documentation. West Lafayette, United States Department of Agriculture (USDA), 1995. Disponível em: <https://www.ars.usda.gov/ARUserFiles/50201000/WEPP/abstract.pdf>.

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, p. 241–253, 2002.

FORCHHEIMER, P. **Hydraulik**. Leipzig: B. G. Teubner, 1914.

FORTIER. S.; SCOBEEY. F. C. Permissible canal velocities. **Transactions of the American Society of Civil Engineers**, v. 89, n. 1, p. 940–956, 1926.

FOX, R.W.; MCDONALD, A.T. **Introdução à mecânica dos fluidos**. 4.ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1998.

FOX. R. W.; MCDONALD. A. T.; PRITCHARD. P. J.; LEYLEGIAN. J. C. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. 8.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

FREDLUNG, D. G.; RAHARDJO, H. **Soil Mechanics for Unsaturated Soils**. John Wiley & Sons, USA, 1993.

FREITAS, G. H. S.; MICHELS, F. S.; PASSOS, W. E. Análise dimensional e aplicação hidráulica do teorema pi de Buckingham. **Vetor**, v. 25, n. 2, p. 84-101, 2015. Disponível em: <https://periodicos.furg.br/vetor/article/view/6143>.

GARBRECHT, G. Erfahrungswerte über die zulässigen Strömungsgeschwindigkeiten in Flüssen und Kanälen. **Wasser und Boden**, v. 5, 1961.

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, p. 255-293, 2002.

GEMICI, Z.; KOCA, A.; KAYA, K. Predicting the Numerical and Experimental Open-Channel Flow Resistance of Corrugated Steep Circular Drainage Pipes. **Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice**, v. 8, n. 3, p. 04017004 1-9, 2017. doi: 10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000265

GEN, R.; ZHANG, G.; MA, Q.; Wang, L. Soil resistance to runoff on steep croplands in Eastern China. **Catena**, v. 152, p. 18–28, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.01.002>

GERBERSDORF, S. U.; JANCKE, T.; WESTRICH, B. Sediment properties for assessing the erosion risk of contaminated riverine sites. **J. Soils Sediments**, v. 7, n. 1, p. 25–35, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1065/jss2006.11.190>.

GIAROLA, N. F. B.; SILVA, A. P.; IMHOFF, S.; DEXTER, A. R. Contribution of natural soil compaction on hardsetting behavior. **Geoderma**, v. 113, p. 95-108, 2003.

GONÇALVES, F. A. **Validação do modelo WEPP na predição de erosão hídrica para condição edafoclimática da região de Viçosa-MG**. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, Minas Gerais, 2007.

GRABOWSKI, R. C.; DROPO, I. G.; WHARTON, G. Erodibility of cohesive sediment: The importance of sediment properties. **Earth-Science Reviews**, n. 105, p. 101–120, 2011. Disponível em: <https://doi:10.1016/j.earscirev.2011.01.008>

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

GRIEBELER, N. P.; PRUSKI, F. F.; SILVA, J. M. A.; RAMOS, M. M.; SILVA, D. D. da. Equipamento para a determinação da erodibilidade e tensão crítica de cisalhamento do solo em canais de estradas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 9, p. 166- 170, 2005b. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662005000200003>

GRIEBELER, N. P.; PRUSKI, F. F.; SILVA, J. M. A. da; RAMOS, M. M.; SILVA, D. D. da. Modelo para a determinação do espaçamento entre desaguadouros em estradas não pavimentadas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 3, p. 397-405, 2005a. Disponível em: <https://10.1590/S0100-06832005000300010>.

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.

GUALTIERI, P.; FELICE, S.; PASQUINO, V.; DORIA, G. P. Use of conventional flow resistance equations and a model for the Nikuradse roughness in vegetated flows at high submergence. **Journal of Hydrology and Hydromechanics**, v. 66, n. 1, p. 107-120, 2018. doi: 10.1515/johh-2017-0028.

HÁ, H. J.; KIM, H.; NOH, J. H. K.; KHIM, J. S. Rainfall effects on the erodibility of sediment and microphytobenthos in the intertidal flat. **Environmental Pollution**, n. 242, p. 2051-2058, 2018. DOI: 10.1016/j.envpol.2018.06.079

HAYTER, E. J. Fundamentals and Modeling of Cohesive Sediment Transport. **Sediment Transport: Monitoring, Modeling and Management**. Editors: Abdul A. Khan and Weiming Wu. Cap. 4, p. 111-143, 2013.

HOFFMANS, G. J. C. M.; VERHEIJ, H. J. **Scour Manual**. A. A. Balkema, Rotterdam, Netherlands; Brookfield, VT, n. 15, 1997.

HOUWING, E. J.; VAN RIJN, L. C. In situ erosion flume (ISEF): determination of bed-shear stress and erosion of a kaolinite bed. **Journal of Sea Research**, v. 39, p. 243-253, 1998. Disponível em:

<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.509.6185&rep=rep1&type=pdf>. A

INDERBITZEN, A. L. An erosion tests for soils. **Materials Research and Standards**, v. 1, p. 553-554, 1961.

INFANTE, Patricia S; SEGERER, Carlos D. **Guía de Estúdio: Obras Hidráulicas I**. Universidad Nacional de Cuyo – Facultad de Ingeniería, 2010.

JULIAN, J. P.; TORRES, R. Hydraulic erosion of cohesive riverbanks.

Geomorphology, v. 76, n. 1-2, p. 193–206, 2006. Disponível em:

<http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.11.003>.

KANDIAH, A. **Fundamental aspects of surface erosion of cohesive soils**. Thesis (Ph.D. In Civil Engineering). Univ. of California, 1974.

KAPOO, M.; GAUTAM, R. K.; RAMANI, V. K.; VERMA, A. Predicting operational capacity of redox flow battery using a generalized empirical correlation derived from dimensional analysis. **Chemical Engineering Journal**, v. 379, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.122300>.

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**, v. 142, 2016. doi: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001147

KIMPE, C. R.; LAVERDIERE, M. R.; DEJOU, J. Distribution of silica, sesquioxides, and clay in Quebec podzolic soils and their effects on subsoil cementation. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 47, p. 838-840, 1983.

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

KNAPEN, A.; POESEN, J. Soil erosion resistance effects on rill and gully initiation points and dimensions. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 35, p. 217-228, 2010.

LAFAYETTE, K. P. V.; CANTALICE, J. R. B.; COUTINHO, R. Q. Resistência à erosão em ravinas, em latossolo argiloarenoso. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, v. 35, n. 6, 2011.

LAFLEN, J. M.; ELLIOT, W. J.; SIMANTON, J. R.; HOLZHEY, C. S.; KOHL, K. D. WEPP: Soil erodibility experiments for rangeland and cropland soils. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 46, p. 39-44, 1991.

- 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.
- LAMB, M. P.; DIETRICH, W. E.; VENDITTI, J. G. Is the critical Shields stress for incipient sediment motion dependent on channel-bed slope?. **J. Geophys. Res.**, v. 113, p. 804–813, 2008.
- LAMBE, T. W. **Soil testing for engineers**. New York: John Wiley, 1951.
- LE BISSONNAIS, Y. **Soil characteristics and aggregate stability**. In: Agassi M (ed) Soil erosion, conservation and rehabilitation. CRC Press, p. 41–60, 1995.
- LI, J. D.; SUN, J.; LIN, B. L. Bed-load transport rate based on the entrainment probabilities of sediment grains by rolling and lifting. **Int. J. Sediment Res.**, v. 33, p. 126-136, 2018. Disponível em: <https://10.1016/j.ijsrc.2017.12.005>.
- LICK, W.; MCNEIL, J. Effects of sediment bulk properties on erosion rates. **Science of the Total Environment**, v. 266, n. 1–3, p. 41-48, 2001.
- LOMBARDI NETO, F.; DRUGOWICH, M.I. (coords.). **Manual técnico de manejo e conservação de solo e água**. V. III CATI. Campinas: CATI, p. 121-156. Manual Técnico, 40, 1994.
- LUNA, H. de A. **Manutenção Em Canais De Irrigação Revestidos Em Concreto**. Dissertação de Mestrado. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2013.
- MANNERS, R. B.; WILCOX, A. C.; KUI, L.; LIGHTBODY, A. F.; STELLA, J. C.; SKLAR, L. S. When do plants modify fluvial processes? Plant-hydraulic interactions under variable flow and sediment supply rates. **J. Geophys. Res.-Earth.**, v. 120, p. 325–345, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/2014JF003265>.
- MAVIS, F. T. **Transportation of detritus by flowing water**. Iowa: University of Iowa Studies in Engineering. Bulletin, 5, 1935. Disponível em: <https://ir.uiowa.edu/cgi/viewcontent.cgi?referer=https://www.google.com.br/&httpsredir=1&article=1005&context=uisie>.
- MEDEIROS, B.; ABREU, C. E.; SCHIAFFINO, M. S.; MARTINS, M. F. Análise Dimensional de um escoamento em Leito Poroso. In: Encontro Científico de Física Aplicada, IV, 2014, São Paulo. **Anais...** Editora Blucher Proceedings, 2014. <http://pdf.blucher.com.br/s3-sa-east-1.amazonaws.com/physicsproceedings/v-ecfa/032.pdf>
- MEHTA, A. J.; PARCHURE, T. M. Surface erosion of fine-grained sediment revisited. **Proceedings in Marine Science**, v. 2, p. 55-74, 2000. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S1568-2692\(00\)80006-6](https://doi.org/10.1016/S1568-2692(00)80006-6).
- MIEDEMA, S. A. Constructing the Shields curve, a new theoretical approach and its applications. In: WODCON XIX, 19 p., 2010, Beijing. **Anais...** WODA, 2010.

MIKHNEVICH, É. I. **Determination of the Permissible Velocities in Canals**. 1989. UDC 532.543:627.13.

MIKKELSEN, O. A. Examples of spatial and temporal variations of some fine-grained suspended particle characteristics in two Danish coastal water bodies. **Oceanologica Acta**, v. 25, p. 39-49, 2002.

MILLAR, R. G. Influence of bank vegetation on alluvial channel patterns. **Water Resour. Res.**, v. 36, n. 4, p. 1109–1118, 2000. Disponível em: <https://10.1029/1999WR900346>.

MIRTSKHOULAVA, T. E. Erosional Stability of Cohesive Soils. **Journal of Hydraulic Research**, v. 4, n. 1, p. 37–50, 1966b. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/00221686609500091>.

MIRTSKHOULAVA, T.E. **Modern Theory of Reliability and Control of the Environment**. N. B. Harmancioglu et al. (eds.). Integrated Approach to Environmental Data Management Systems, p. 245-252, 1997. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-011-5616-5_21.

MIRTSKHOULAVA, T. E. Scouring by flowing water of cohesive and noncohesive beds. **J. Hydraul. Res.**, v. 29, p. 341–354, 1991. Disponível em: <https://10.1080/00221689109498438>.

MIRTSKHOULAVA, T. E. **Studies on Permissible Velocities For Soil And Facings**. Poona: [S.N.], v. 11, 1966a.

MITCHELL, J. K.; SOGA, K. **Fundamentals of soil behavior**. 3rd ed, London. UK: Wiley, 2005.

MITCHELL, J.K. **Fundamentals of soil behavior**. New York, John Wiley, 1976.

MITCHENER, H.; TORFS, H. Erosion of mud/sand mixtures. **Coastal Engineering**, v. 29, n. 1-2, p. 1-25, 1996. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0378-3839\(96\)00002-6](https://doi.org/10.1016/S0378-3839(96)00002-6).

MOURA, A. do N.; DANTAS, E. W.; BITTENCOURT-OLIVEIRA, M. C. Structure of the phytoplankton in a water supply system in the state of Pernambuco Brazil. **Braz. Arch. Biol. Technol.**, v. 50, n. 4, p. 645-654, 2007.

MROKOWSKA, M. M.; PAWEŁ, P. M.; KSIĄŻEK, L.; STRUŻYŃSKI, A.; WYRĘBEK, M.; RADECKI-PAWLIK, A. Laboratory studies on bedload transport under unsteady flow conditions. **J. Hydrol. Hydromech.**, v. 66, n. 1, p. 23–31, 2018. DOI: 10.1515/johh-2017-0032

MORGAN, R. P. C. **Soil Erosion and Conservation**. 3 ed. Blackwell Publishing Ltd, 2005. Disponível em: https://books.google.com/books?hl=pt-BR&lr=&id=j8C8fFiPNOkC&oi=fnd&pg=PR7&ots=woOaLT0eIe&sig=v3XklRjDriXFd_w3byH-P5wZHws.

MUNSON, B. R.; YOUNG, D. F.; OKIISHI, T. H. Semelhança. análise dimensional e modelos. **Fundamentos da mecânica dos fluidos**. 4.Ed. São Paulo. Brasil. Edgard Blücher, p. 344-397, 2004. <https://engcivil20142.files.wordpress.com/2016/02/livro-fundamentos-da-mecanica-dos-fluidos-4c2aa-ed-bruce-r-munson-donald-f-young-e-theodore-h-okiishi.pdf>

NALLURI, C.; GHANI, A. A. Design options for self-cleansing storm sewers. **Water Science and Technology**, v. 9, n.3, p. 215-220, 1996. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0273-1223\(96\)00389-7](https://doi.org/10.1016/0273-1223(96)00389-7)

NANSON, G. C.; HICKIN, E. J. A statistical analysis of bank erosion and channel migration in western Canada. **Geol. Soc. Am. Bull.**, v. 97, p. 497-504, 1986. Disponível em: <https://pubs.geoscienceworld.org/gsa/gsabulletin/article-abstract/97/4/497/203189/a-statistical-analysis-of-bank-erosion-and-channel?redirectedFrom=fulltext>.

NEPF, H. M. Hydrodynamics of vegetated channels. **J. Hydraul. Res.**, v. 503, p. 262-279, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/00221686.2012.696559>.

OLIVEIRA, J. F.; GRIEBELER, N. P.; CORRECHEL, V.; SILVA, V. C. Erodibilidade e Tensão crítica de cisalhamento em solos de estrada não pavimentadas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, p. 955-960, 2009.

OSGOOD, N. Lightening the performance burden of individual-based models through dimensional analysis and scale modeling. **System Dynamics Review**, v. 25, n. 2, p. 101-134, 2009. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/sdr.417>.

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

ORTIZ-VERA, O. Similitud hidráulica de sistemas hidrológicos altoandinos y transferencia de información hidrometeorológica. **Tecnología y Ciencias del Agua**, v. 6, n. 4, p. 25-44, 2015.

OTA, J. J.; NALLURI, C. Urban storm sewer design in consideration of sediment. **J. Hydraul. Eng.-ASCE**, v. 129, n. 4, p. 291-297, 2003.

PAASWELL, R. E. Causes and mechanisms of cohesive soil erosion: The state of the art. Special Report, 135, Highway Research Board, Washington, DC, p. 52-74, 1973. <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/sr/sr135/sr135-006.pdf>

PARCHURE, T. M.; MEHTA, A. J. Erosion of soft cohesive sediment deposits. **Journal of Hydraulic Engineering-ASCE**, v. 111, n. 10, p. 1308-1326, 1985. Disponível em: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-0021823240&origin=inward&txGid=5143888c78ad5e862e29e06982ebb928>.

PARKER, C.; SIMON, A.; THORNE, C. R. The effects of variability in bank material properties on riverbank stability: Goodwin Creek, Mississippi. **Geomorphology**, v. 101, p. 533-543, 2008. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.02.007>.

PARKS, O. W. **Effect of water temperature on cohesive soil erosion**. Thesis (M.Sc. In Biological Systems Engineering). Virginia Polytechnic Institute and State Univ. 2012. Disponível em: https://vtechworks.lib.vt.edu/bitstream/handle/10919/49663/Parks_OW_T_2013.pdf;sequence=1.

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

PARTHENIADES, E. Erosion and deposition of cohesive soils. **Journal of Hydraulic Division**, ASCE, 91, 105-138, 1965.

PARTHENIADES, E. **Study of erosion and deposition of cohesive soils in salt water**. PhD Dissertation, University of California, Berkeley, CA, USA, 1962.

PINTO, C. de S. **Curso básico de mecânica dos solos**. São Paulo, Oficina de Textos, 2000.

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

POLYAKOV, V.O.; NEARING, M. A. Sediment transport in rill flow under deposition and detachment conditions. **Catena**, v. 51, p. 33-43, 2003.

POSTMA, H. **Sediment transport and sedimentation in the estuarine environment**. In: Estuaries, edited by G. H. Lauff, v. 83, p. 158–179, AAAS, Washington, D. C, 1967.

QASEM, S. N.; EBTEHAJ, I.; MADAVAR, H. R. Optimizing ANFIS for sediment transport in open channels using different evolutionary algorithms. **Journal of Applied Research in Water and Wastewater**, v. 7, p. 290-298, 2017.

RAO, A. R.; SREENIVASULU, G.; KUMAR, B. Geometry of sand bed channels with seepage. **Geomorphology**, v. 128, p. 171-177, 2011. doi:10.1016/j.geomorph.2011.01.003

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

RAUDKIVI, A. J. **Loose boundary hydraulics**. 4th ed. Rotterdam. Netherlands: Balkema. 1998.

RAUDKIVI, A. J.; TAN, S. K. Erosion of cohesive soils. **J. Hydraul. Res.**, v. 22, n. 4, p. 217–233, 1984.

- ROCHA, W. W.; DIAS JUNIOR, M. S.; LIMA, J. M.; MIRANDA, E. E. V.; SILVA, A. R. Resistência ao cisalhamento e grau de intemperismo de cinco solos na região de lavras (MG). **R. Bras. Ci. Solo**, v. 26, p. 297-303, 2002. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/rbcs/v26n2/02.pdf>.
- RODRIGUES, A. C. L.; SRINIVASAN, V. S.; SANTOS, C. A. G.; SUZUKI, K. Resistência ao Fluxo em Canais Íngremes com Leito de Cascalho. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 8 n. 3, p. 117-133, 2003.
- ROMINGER, J. T.; LIGHTBODY, A. F.; NEPF, H. Effects of added vegetation on sand bar stability and stream hydrodynamics. **J. Hydraul. Eng.**, v. 136, p. 994-1002, 2010. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000215](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000215).
- SAFARI, M. J. S.; AKSOY, H.; MOHAMMADI, M. Artificial neural network and regression models for flow velocity at sediment incipient deposition. **J. Hydrol.**, v. 541, p. 1420–1429, 2016.
- SAFARZADEH, A.; MOHAJERI, S. H. On the fine sediment deposition patterns in a gravel bed open-channel flow. **Journal of Applied Research in Water and Wastewater**, n. 5, p. 188-192, 2016.
- SAJJADI, S. A.; MAHMOODABADI, M. Sediment concentration and hydraulic characteristics of rain-induced overland flows in arid land soils. **J. Soils Sediments**, v. 15, p. 710–721, 2015. doi: 10.1007/s11368-015-1072-z
- SANTANA, M. B.; SOUZA, L. S.; SOUZA, L. D.; FONTES, L. E. F. Atributos físicos do solo e distribuição do sistema radicular de citros como indicadores de horizontes coesos em dois solos de Tabuleiros Costeiros do Estado da Bahia. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 30, p. 1-12, 2006.
- 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.
- SCHIOZER, D. **Mecânica dos Fluidos**. 2nd edn. LTC, Rio de Janeiro, 1996.
- SCHULTZ, K. M. Modeling road erosion in upper Torreon wash, New México. **Transportation Research Record**, v. 2203, p. 27-35, 2011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3141/2203-04>
- SHARMA, A.; HERRERA-GRANADOS, O.; KUMAR, B. Bedload transport and temporal variation of nonuniform sediment in a seepage-affected alluvial channel. **Hydrological Sciences Journal**, v. 64, n. 8, p. 1001 – 1012, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1615621>
- SHEN, T. H. Hydraulic Resistance of Flow in Channels with Cylindrical Roughness. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 128, n. 5, p. 500-506, 2002. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2002)128:5(500)

SHIELDS, A. **Application of similarity principles and turbulence research to bed-load movement**. In: Mitteilungen der Preussischen Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffsbau, Rep. 167, 26 pp., Calif. Inst. of Technol., Pasadena, Calif., 1936. Disponível em: <https://authors.library.caltech.edu/25992/1/Sheilds.pdf>

SHIH, H. M.; YANG, C. T. Estimating overland flow erosion capacity using unit stream power. **Int. J. Sediment Res.**, v. 24, p. 46–62, 2009.

SHUR, Y. L.; PETRUKHIN, N. P.; SLAVIN-BOROVSKIY, V. B. Razrushenie beregov v kriolitozone. Kriogennyye processy. **Nauka Publ. House.**, p. 57–73, 1978. Disponível em: [http://refhub.elsevier.com/S0169-555X\(15\)30206-3/rf0175](http://refhub.elsevier.com/S0169-555X(15)30206-3/rf0175).

SILVA, A. J. N.; CABEDA, M. S. V. Influência de diferentes sistemas de uso e manejo na coesão, resistência ao cisalhamento e óxidos de Fe, Si e Al em solo de tabuleiro costeiro de Alagoas. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 29, p. 447-457, 2005. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832005000300015>.

SILVA, D. P. Modelo de dimensionamento de bacias de acumulação em estradas. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2009. <http://livros01.livrosgratis.com.br/cp086251.pdf>

SILVA, R. C. V. da; WILSON-JR., G. **Hidráulica Fluvial**. Volume II, COPPE/UFRJ, 256 p. Rio de Janeiro, 2005.

SIMON, A.; COLLISON, A. J. C. Pore-water pressure effects on the detachment of cohesive streambeds: Seepage forces and matric suction. **Earth Surf. Processes Landforms**, v. 26, n. 13, p. 1421-1442, 2001. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/esp.287>.

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

SINGH, P.K.; BHUNYA, P.K.; MISHRA, S.K.; CHAUBE, U.C. A sediment graph model based on SCS-CN method. **Journal of Hydrology**, v. 349, p. 244– 255, 2008.

SINNAKAUDAN, S. K.; AB GHANI, A.; AHMAD, M. S. S.; ZAKARIA, N.A. Multiple linear regression model for total bed material load prediction. **Journal of Hydraulic Engineering-ASCE**, v. 132, n. 5, p. 521–528, 2006. DOI: 10.1061/(asce)0733-9429(2006)132:5(521).

SIRJANI, E.; MAHMOODABADI, M. Effects of sheet flow rate and slope gradient on sediment load. **Arab. J. Geosci.**, v. 7, p. 203–210, 2012.

SOBENKO, L.R.; FRIZZONE, J. A.; CAMARGO, A. P. de; SARETTA, E.; ROCHA, H. S. da. Characterization of venturi injector using dimensional analysis. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 23, n. 7, p. 484-491, 2019. SOUZA, W. L. da S. **Produção de Sedimentos da Bacia Hidrográfica do Rio Capibaribe para a Zona Costeira da Região Metropolitana do Recife**. Dissertação (Mestrado em Ciências do Solo). Universidade Federal Rural de Pernambuco, Departamento de Agronomia, Recife, 2011.

TANANAEV, N. I. Hydrological and sedimentary controls over fluvial thermal erosion. the Lena River. central Yakutia. **Geomorphology**. v. 253. p. 524–533. 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.11.009>.

TANNER. S.; KATRA. I.; ARGAMAN. E. BEM-HUR. M. Erodibility of waste (Loess) soils from construction sites under water and wind erosional forces. **Science of The Total Environment**. v. 616–617. p. 1524-1532. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.161>.

THOMSEN. L.; GUST. G. Sediment erosion thresholds and characteristics of resuspended aggregates on the western European continental margin. **Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers**, v. 47, n. 10, p. 1881-1897, 2000. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0967-0637\(00\)00003-0](https://doi.org/10.1016/S0967-0637(00)00003-0).

THORNE, C. R. **Effects of vegetation on river-bank erosion and stability**. Vegetation and Erosion. J. Wiley & Sons. Chichester. UK. p. 203–233, 1990.

TORABIZADEH, A.; TAHERSHAMSI, A.; TABATABAI, M. R. M. Measurement of dimensionless Chezy coefficient in step-pool reach (Case Study of Dizin River in Iran). **Flow Measurement and Instrumentation**, v. 61, p. 15-25, 2018. doi: 10.1016/j.flowmeasinst.2018.03.012

TRANCANELLI. Diego. Grandezas físicas e análise dimensional: da mecânica à gravidade quântica. **Rev. Bras. Ensino Fís.**, v. 38, n. 2, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2015-0003>.

TROUT, T. J.; NEIBLING, W. H. Erosion and sedimentation processes on irrigated fields. **J. Irrig. Drain Eng.**, v. 119, p. 947–963, 1993.

UTLEY, B. C.; WYNN, T. M. **Cohesive soil erosion: Theory and practice**. In: PROC. ASCE WORLD ENVIRONMENTAL AND WATER RESOURCES CONGRESS. Reston. ASCE, 2008. Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/40976%28316%29289>.

VAEZI, A. R.; ESLAMI, S. F.; KEESSTRA, S. Interrill erodibility in relation to aggregate size class in a semi-arid soil under simulated rainfalls. **Catena**, v. 167, p. 385-398, 2018.

VAN KLAVEREN. R.W.; MCCOOL. D. K. Erodibility and critical shear of a previously frozen soil. **Trans. ASAE**, v. 41, n. 5, p. 1315-1321, 1998. Disponível em: <https://doi.org/10.13031/2013.17304>.

VAN LEDDEN, M.; VAN KESTEREN, W. G. M.; WINTERWERP, J. C. A conceptual framework for the erosion behaviour of sand–mud mixtures. **Cont. Shelf Res.**, n. 24, v. 1, p. 1–11, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.csr.2003.09.002>.

VAN RIJN, L. C. Sediment transport, part i: Bed load transport. **J. Hydraul. Eng.**, v. 110, n. 10, p. 1431–1456, 1984.

- VARGAS, M. **Introdução à mecânica dos solos**. São Paulo, McGraw-Hill, 1989.
- VEKARIYA, P. B.; SUBBAIAH, R.; MASHRU, H. H. Hydraulics of microtube emitters: a dimensional analysis approach. **Irrig. Sci.**, v. 29, p. 341-350, 2011. Doi: 10.1007/s00271-010-0240-6
- VILAÇA, F. N.; CAMARGO, A. P. de; FRIZZONE, J. A.; MATEOS, L.; KOECH, R. Minor losses in start connectors of microirrigation laterals. **Irrig. Sci.**, v. 35, p. 227-240, 2017. Doi: 10.1007/s00271-017-0534-z
- VONGVISESSOMJAI, N.; TINGSANCHALI, T.; BABEL, M. S. Non-deposition design criteria for sewers with part-full flow. **Urban Water Journal**, 7, 61-77, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/15730620903242824>
- WALCZAK, N.; WALCZAK, Z.; KAŁUZA, T.; HÄMMERLING, M.; STACHOWSKI, P. 2018. The Impact of Shrubby Floodplain Vegetation Growth on the Discharge Capacity of River Valleys. **Water**, n. 10, v. 5, p. 556, 2018. DOI: 10.3390/w10050556
- WINTERWERP, J. C.; VAN KESTEREN; W. G. M. **Introduction to the Physics of Cohesive Sediment in the Marine Environment**. Elsevier, Amsterdam, 2004. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/bookseries/developments-in-sedimentology/vol/56>.
- XIAOXIE, L.; YEEMENG, C; YUCHUAN, B. Time-Dependent Sediment Transport Subjected to Downward Seepage. **Transactions of Tianjin University**, v. 20, n. 2, p. 133-138, 2014. Doi: 10.1007/s12209-014-2174-1
- XU, D.; BAI, Y.; JI, C.; WILLIAMS, J. Experimental study of the density influence on the incipient motion and erosion modes of mudsin unidirectional flows: The case of Huangmaohai estuary. **Ocean Dyn.**, v. 65, n. 2, p. 187-201, 2015.
- YAGER, E. M.; SCHMEECKLE, M. W. The influence of vegetation on turbulence and bed load transport. **J. Geophys. Res.-Earth**, n. 118, p. 1585–1601, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/jgrf.20085>.
- YANG, C. T. The movement of sediment in rivers. **Geophysical surveys**, v. 3, p. 39–68, 1977. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF01449182>.
- YANG, P. P.; ZHANG, H. L.; MA, C. Effects of simulated submerged and rigid vegetation and grain roughness on hydraulic resistance to simulated overland flow. **Journal of Mountain Science**, v. 14, n. 10, p. 2042-2052, 2017. doi: 10.1007/s11629-016-4280-0
- YU, G.; LIM., S. Modified manning formula for flow in alluvial channels with sandbeds. **J. Hydraul. Res.**, v. 41, n. 6, p. 597-608, 2003.
- ZHANG, M.; YU, G. Critical conditions of incipient motion of cohesive sediments. **Water Resources Research**, v. 53, p. 7798-7815, 2017.

ZHU, B. B.; LI, Z. B.; LI, P.; LIU, G. B.; XUE, S. Soil erodibility, microbial biomass, and physical-chemical property changes during long-term natural vegetation restoration: a case study in the Loess Plateau, China. **Ecol Res**, v. 25, p. 531-541, 2010. Doi: 10.1007/s11284-009-0683-5

ZITTERELL, D. B.; FRIZZONE, J. A.; RETTORE NETO, O. Dimensional analysis approach to estimate local head losses in microirrigation connectors. **Irrigation Science**, v. 32, p. 169-179, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00271-013-0424-y>