UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL – PPGEC

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

UMA ABORDAGEM EXPERIMENTAL PARA A OBTENÇÃO DA TAXA DE EROSÃO DE SOLOS ATRAVÉS DE UM APARATO DO TIPO PISTÃO

Gabriel Baldanza Mantovanelli

Patrício José Moreira Pires Professor Orientador

Aloysio Portugal Maia Saliba Professor Coorientador

> Vitória Setembro de 2016

Gabriel Baldanza Mantovanelli

UMA ABORDAGEM EXPERIMENTAL PARA A OBTENÇÃO DA TAXA DE EROSÃO DE SOLOS ATRAVÉS DE UM APARATO DO TIPO PISTÃO

Dissertação apresentada como requisito para obtenção do grau de Mestre em Estruturas pelo programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo

> Prof. DSc. Carlos Barreira Martinez Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos – UFMG

> Prof. DSc. Aloysio Portugal Maia Saliba Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos – UFMG

> > MSc. Fernando Portugal Maia Saliba TEC3 Geotecnia e Recursos Hídricos

Prof. DSc. Rômulo Castello Henriques Ribeiro Departamento de Engenharia Civil – UFES

Prof. DSc. Patrício José Moreira Pires Departamento de Engenharia Civil – UFES

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

UMA ABORDAGEM EXPERIMENTAL PARA OBTENÇÃO DA TAXA DE EROSÃO DE SOLOS ATRAVÉS DE UM APARATO DO TIPO PISTÃO Gabriel Baldanza Mantovanelli

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Civil do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito, como requisito parcial para obtenção do titulo de Mestre em Engenharia Civil, área de Estruturas.

Aprovada no dia 05 de setembro de 2016 por: Dr. Patrício José Moreira Pires tof. Doutor em Engenharia Civil Orientador - UFES Prof. Dr. Aloysio Portugal Maia Saliba Doutor em Sancamento, Meio ambiente e Recursos Hídricos Co-orientadora -- UFMG Por meio de video conferência Prof. Dr. Rômulo Castello Henriques Ribeiro Doutor em Engenharia Civil Membro Interno - UFES

Prof. Dr/Carlos Barreira Martinez Doutor em Planejamento de Sistemas Energéticos Membro Externo – UFMG Por mejo de video conferência

line

Prof. M.SC. Fernando Portugal Maia Saliba Mestre em Engenharia Civil Examinador Externo - UFMG Por meio de video conferência

ALK

ha

Vitória - ES, setembro de 2016

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP) (Biblioteca Setorial Tecnológica, Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

Mantovanelli, Gabriel Baldanza, 1987-M293a Uma abordagem experimental para a obtenção da taxa de erosão de solos através de um aparato do tipo pistão / Gabriel Baldanza Mantovanelli. – 2016. 112 f. : il.

> Orientador: Patrício José Moreira Pires. Coorientador: Aloysio Portugal Maia Saliba. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

> 1. Solos. 2. Solos - Erosão. 3. Erodibilidade. I. Pires, Patrício José Moreira. II. Saliba, Aloysio Portugal Maia. III. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. IV. Título.

CDU: 624

Dedico esta dissertação ao meu querido avô, Plínio Armando Baldanza.

AGRADECIMENTOS

Nada mais do que justo agradecer as pessoas que colaboraram de diferentes formas para que este trabalho fosse concluído:

- ao professor Patrício, amigo e mestre, por acreditar no meu potencial e ter me aceitado como seu orientado;
- à minha família, mãe, pai, e irmãs pelo apoio incondicional;
- à minha tão amada avó Anna Amélia;
- ao amor da minha vida, Marcella, obrigado por você existir;
- ao meu amigo de longa dada Leandro, que me ajudou muito durante estadia em Belo Horizonte, sempre paciente e bondoso;
- aos diversos colegas da pós-graduação, em especial, aos meus queridos amigos, Raphael, Neemias, Sid e Guilherme;
- aos queridos professores Aloysio e Martinez, por me ajudarem na realização dos ensaios de erosão e estarem sempre dispostos a me ensinar algo novo;
- ao professor Rômulo, amigo, mestre e grande flamenguista, que sempre esclareceu minhas dúvidas com muita paciência e propriedade;
- aos queridos Edmar e Paulo, companheiros e mestres, que conseguiram colocar o aparato para funcionar quando tudo parecia estar perdido.

Muito obrigado!

RESUMO

Podemos afirmar que a erosão é tão antiga quanto à própria Terra, sendo oriunda de fenômenos naturais que agem continuamente na crosta terrestre, decorrente do processo de modificação do planeta. Entretanto, a ação do homem quebra a harmonia natural, por meio da inserção de práticas que destroem o equilíbrio das condições desse processo, causando grandes prejuízos para a economia e o meio ambiente. No Brasil, a erosão hídrica é a mais importante. Podemos listar diferentes exemplos de problemas ocasionados pela erosão. As opções vão desde as perdas de produtividade agrícola devido à degradação de terras produtivas, o rompimento de barragens por galgamento com a formação de brechas e o colapso de pontes decorrentes da erosão do solo de fundação. A necessidade de conhecer o comportamento erosivo dos solos é evidente em diversas áreas de conhecimento da engenharia, especialmente a engenharia civil e geotécnica. A grande maioria das diretrizes traçadas para o estudo do transporte de sedimentos foi desenvolvida para solos grossos, especificamente areias e pedregulhos, aos quais não há presença de forças eletroquímicas, gerando assim modelos matemáticos simplificados ao peso próprio da partícula de solo. Na busca por um estudo abrangente a solos coesivos e não coesivos, é proposto um aparato de teste que busca complementar esta lacuna de conhecimento, através do conceito da erodibilidade. A erodibilidade de um material é definida como a taxa de erosão vertical a que o material está sujeito quando exposto a um escoamento. O presente trabalho avaliou de forma experimental, através do aparato desenvolvido, o comportamento erosivo de um solo e sua respectiva resistência ao cisalhamento para diversas velocidades de escoamento. Também, buscou identificar a velocidade crítica e sua respectiva tensão de cisalhamento crítica, responsáveis pelo início do processo erosivo. O solo estudado foi classificado pelo Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS) como uma areia argilosa (SC), proveniente do munício de Serra - ES, (solo sedimentar com formação Barreiras) com um percentual de finos igual a 44,9% ± 1,3 %. Através dos resultados obtidos do aparato de teste desenvolvido, realizou-se a classificação erosiva do solo através da metodologia apresentada pela circular HEC-18 (2012) da Federal Highway Administration (FHWA-USA), a qual relaciona a erodibilidade e a classificação SUCS em termos do diâmetro mediano dos grãos. Observou-se que o tempo médio de ensaio foi reduzido na metade para incrementos de 0,5 m/s na velocidade média de escoamento. Já a taxa de erosão calculada, aproximadamente, dobrou para os mesmos incrementos de velocidades. Ademais, foi também observado que o alto percentual de finos influencia no comportamento erosivo do solo, diminuindo a taxa de erosão do mesmo.

Palavras-chave:

Erodibilidade; galgamento de barragens; taxa de erosão; aparato do tipo pistão.

ABSTRACT

We can say that erosion is old as the Earth itself, which originated from natural phenomena that act continuously in the Earth's crust, resulting from the modification process of the planet. However, human action breaks the natural harmony by inserting practices that destroy the balance of the conditions of this process, causing major damages to the economy and to the environment. In Brazil, erosion by water is the most important erosion process. We can list different examples of problems caused by erosion. The options are the loss of agricultural productivity due to the degradation of productive land, dam failures by overtopping with the formation of erosion gaps and the collapse of bridges due the scour. The necessity to know the erosional soil behavior is evident in several engineering areas, especially to the civil engineering and geotechnical engineering. The great majority of the guidelines established for the study of soil erosion were developed for coarse grained soils, particularly to sands and gravel, in which the absence of electrochemical forces allow the use of simplified mathematical models based on the weight of each soil particle. To achieve a general study about cohesive and non-cohesive soils, it is proposed an apparatus to fill this knowledge gap through the concept of erodibility. The erodibility of a material is defined as the erosion rate to which the material is subject when exposed to a flow. This study aims to evaluate experimentally through the developed apparatus the erosive behavior of a soil and its respective shear strength for different flow velocities. Also, this work seeks to identify the critical velocity of the material and his respective critical shear stress responsible for the sediment motion. The studied soil was classified using the unified system of soil classification (SUCS) as clayey sand (SC) from the city of Serra - ES (sedimentary soil), with a percentage of clay and silts equal to $44.9\% \pm 1.3\%$. Through the result of the tests, this paperwork used the erosion classification of soil through the erosion rate and the flow velocity as proposed on the circular HEC-18 (2012) of the Federal Highway Administration (FHWA-USA) which relates the erodibility with the SUCS classification in terms of soil's mean diameter. It was noted that the average erosional time observed was reduced to its half for velocity increments of 0.5 m/s. Hence, the erosion rate approximately doubles for the same velocity increments. It was also noted that moreasing soil fines content can influence the soil behavior, decreasing the erosion rates.

Keywords:

Erodibility; overtopping of dams; erosion rate, piston-type device.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO		INTROD	UÇÃO	18
1.1 Con			EXTUALIZAÇÃO	18
1.2 OBJE			TIVOS	21
1.2.1		1.2.1	Objetivo geral	21
		1.2.2	Objetivos específicos	21
	1.3	B Estru	JTURAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	22
2		REVISÃ	D BIBLIOGRÁFICA	23
	2.1	1 Esco	AMENTO LAMINAR E TURBULENTO	23
	2.2	2 TRAN	SPORTE DE SEDIMENTOS E EROSÃO	24
		2.2.1	Tensão de cisalhamento e velocidade cisalhante	25
		2.2.2	Número de Reynolds, dutos não circulares, fator de atrito de Darcy e rugosidade relativa	28
		2.2.3	Forças que agem no grão do material	31
		2.2.4	Tensão de cisalhamento critica	32
		2.2.5	Equações de transporte de sedimentos	38
	2.3	B EROD	IBILIDADE	41
		2.3.1	Mecanismo de deslizamento	42
		2.3.2	Mecanismo de rolamento	44
		2.3.3	Mecanismo de arrancamento	46
	2.4	4 Erod	IBILIDADE EM SOLOS COESIVOS	48
	2.5	5 Apar	ATOS EXISTENTES PARA DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS DE EROSÃO	49
		2.5.1	Aparato tipo pistão	49
		2.5.2	Cilindros rotativos concêntricos	50
		2.5.3	Aparato em jato submerso	51
		2.5.4	Erosion Function Apparatus (EFA)	52
3		METOD	OLOGIA	54
	3.1	1 CARA	CTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DO MATERIAL UTILIZADO	54
		3.1.1	Ensaios de caracterização	55
		3.1.2	Ensaios de cisalhamento direto	57
	3.2	2 Apar	ATO DE TESTE DE ERODIBILIDADE	59
		3.2.1	Preparação das amostras para o ensaio de erosão	62
		3.2.2	Metodologia do ensaio de erosão	63
		3.2.3	Acoplamento e retificação da amostra	63
		3.2.4	Elevação da amostra e nivelamento com a caixa de inspeção	65

6	RE	EFERÊN	ICIAS BIBLIOGRÁFICAS	.110
	5.2	RECON	/ENDAÇÕES	109
	5.1	Concl	.USÕES	108
5	СС	DNCLU	SÕES E RECOMENDAÇÕES	.107
	4.	1.4	Velocidade crítica e tensão cisalhante crítica	103
	4.	1.3	Sucção da amostra para altas velocidades	101
	4.	1.2	Formação do platô resistente	98
	4.	1.1	Trincamento da amostra para pequenas velocidades	97
	4.1	Fenôn	/IENOS OBSERVADOS DURANTE A REALIZAÇÃO DO ENSAIO DE EROSÃO	97
4	RE	SULTA	ADOS E DISCUSSÕES	73
	3	2.8	Determinação da tensão de cisalhamento	71
	3	2.7	Planejamento Operacional Padrão (POP)	70
	3	2.6	Determinação da taxa de erosão	68
	3.	2.5	Determinação da vazão e velocidade média de escoamento	66

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Forças atuantes na partícula constituinte de um leito móvel	32
Figura 2.2 – Diagrama de Shields (material não coesivo)	
Figura 2.3 – Relação entre a tensão cisalhante crítica e o diâmetro mediano dos grãos	
Figura 2.4 – Principais tipos de superfície de leitos encontrados na natureza	39
Figura 2.5 – Mecanismo de deslizamento (solo não coesivo)	
Figura 2.6 – Mecanismo de rolamento (solo não coesivo)	45
Figura 2.7 – Mecanismo de arrancamento (solo não coesivo)	
Figura 2.8 – Aparato do tipo pistão	
Figura 2.9 – Aparato com cilindros rotativos concêntricos	50
Figura 2.10 – Aparato com jato d'água submerso	51
Figura 2.11 – Classificação erosiva do solo de acordo com a tensão cisalhante	53
Figura 3.1 – Curva granulométrica do material utilizado	
Figura 3.2 – Coleta do material para o ensaio de cisalhamento direto	57
Figura 3.3 – Gráfico da Tensão de Cisalhamento x Deslocamento	58
Figura 3.4 – Envoltória de Ruptura do Solo	59
Figura 3.5 – Vista lateral e em planta do aparato de teste definitivo	61
Figura 3.6 – Detalhe da seção de teste do aparato definitivo	61
Figura 3.7 – Coleta do material para ensaio de erosão	62
Figura 3.8 – Retificação da amostra de solo para ensaio de erosão	64
Figura 3.9 – Acoplamento da amostra com uso do tubo de espera em PVC	64
Figura 3.10 — Pistão (parafuso infinito) e nivelamento da amostra com o fundo da caixa de inspeção	65
Figura 3.11 – Gabarito da altura da amostra de solo para o ensaio de erosão	65
Figura 3.12 – Leitor e medidor de vazões Incontrol [°]	66
Figura 3.13 – Inversor de frequência e painéis de comandos digitais	66
Figura 3.14 – Calibração das bombas (vazão)	67
Figura 3.15 – Calibração das bombas (velocidade)	
Figura 3.16 – Platô resistente a montante da amostra de solo	69
Figura 4.1 – Tempos obtidos para as velocidades médias de escoamento adotadas	
Figura 4.2 – Tempos obtidos para a velocidade média de escoamento V = 0,7 m/s	
Figura 4.3 – Tempos obtidos para a velocidade média de escoamento V = 1,2 m/s	
Figura 4.4 – Tempos obtidos para a velocidade média de escoamento V = 1,7 m/s	
Figura 4.5 – Tempos obtidos para a velocidade média de escoamento V = 2,2 m/s	79
Figura 4.6 – Tempo médio observado para as velocidades médias adotadas	80
Figura 4.7 – Taxa de erosão e suas dispersões para cada velocidade de teste	

Figura 4.8 – Taxas de erosão obtidas para a velocidade média de escoamento V = 0,7 m/s	82
Figura 4.9 – Taxas de erosão obtidas para a velocidade média de escoamento V = 1,2 m/s	83
Figura 4.10 – Taxas de erosão obtidas para a velocidade média de escoamento V = 1,7 m/s	84
Figura 4.11 – Taxas de erosão obtidas para a velocidade média de escoamento V = 2,2 m/s	85
Figura 4.12 – Taxa de erosão média e desvio padrão para as velocidades adotadas	86
Figura 4.13 – Correlação entre a taxa de erosão do solo e a velocidade média de escoamento	88
Figura 4.14 – Comparação dos resultados utilizando as equações 3.1 e 4.1	
Figura 4.15 – Correlação entre a taxa de erosão do solo e a tensão cisalhante	91
Figura 4.16 – Comparação dos resultados das equações 3.1 e 4.2	93
Figura 4.17 – Classificação da erodibilidade do solo segundo Briaud (2008)	95
Figura 4.18 – Classificação da erodibilidade do solo segundo Briaud (2008)	96
Figura 4.19 – Trincamento para a velocidade V = 0,3 m/s	
Figura 4.20 – Atuação dos vórtices esteira e ferradura ao longo de um obstáculo resistente	99
Figura 4.21 – Surgimento do platô resistente nas amostras para as velocidades, V = 1,2 e 1,7 m/s	
Figura 4.22 – Fenômeno da sucção da amostra para velocidades V = 2,2 m/s, com L < 120mm	
Figura 4.23 – Esquema do efeito da sucção para velocidades V = 2,2 m/s, com L < 120mm	

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Diâmetro característico dos grãos, d _s	24
Tabela 2.2 – Correlações de Meyer-Peter (1949,1951) e Einstein (1942)	40
Tabela 3.1 – Sistema Unificado de Classificação de Solo (SUCS)	57
Tabela 3.2 – Vazões e velocidades utilizadas no ensaio de erosão	68
Tabela 3.3 – Características do escoamento para as velocidades adotadas	72
Tabela 4.1 – Resultados dos ensaios de erosão no aparato de teste	74
Tabela 4.2 – Resultados dos ensaios de erosão no aparato de teste (continuação)	74
Tabela 4.3 – Valores dos tempos médios obtidos e características do escoamento	80
Tabela 4.4 – Valores das taxas de erosão médias calculadas e características do ensaio	87
Tabela 4.5 – Resultados das taxas de erosão calculadas utilizando as equações 3.1 e 4.1	89
Tabela 4.6 – Resultados das taxas de erosão calculadas utilizando as equações 3.1 e 4.2	92
Tabela 4.7 – Resultados das taxas de erosão obtidas através das equações 3.1; 4.1 e 4.2	93
Tabela 4.8 – Classes de erodibilidade e seus materiais de referência segundo Briaud (2008)	94
Tabela 4.9 – Dados obtidos para a velocidade média de escoamento, V = 0,6 m/s	104
Tabela 4.10 – Cálculo de V _{crit} utilizando as equações apresentadas pela Figura 2.3	105
Tabela 4.11 – Resumo dos resultados ensaiados no aparato de teste do tipo pistão	106

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 – Fatores influentes na erodibilidade de solos coesivos	48
Quadro 4.1 – Amostras para o ensaio de erosão com sua respectiva velocidade de ensaio	73
Quadro 4.2 – Cálculo da média e do desfio padrão dos tempos para V = 0,7 m/s	76
Quadro 4.3 – Cálculo da média e do desvio padrão dos tempos para V = 1,2 m/s	77
Quadro 4.4 – Cálculo da média e do desvio padrão dos tempos para V = 1,7 m/s	78
Quadro 4.5 – Cálculo da média e do desvio padrão dos tempos para V = 2,2 m/s	79
Quadro 4.6 – Cálculo da média e desvio padrão das taxas de erosão para V = 0,7 m/s	83
Quadro 4.7 – Cálculo da média e desvio padrão das taxas de erosão para V = 1,2 m/s	84
Quadro 4.8 – Cálculo da média e desvio padrão das taxas de erosão para V = 1,7 m/s	85
Quadro 4.9 – Cálculo da média e desvio padrão das taxas de erosão para V = 2,2 m/s	86
Quadro 4.10 – Cálculo da média e do desvio padrão dos tempos para, V = 0,6 m/s	104
Quadro 4.11 – Cálculo da média e do desvio padrão das taxas de erosão para, V = 0,6 m/s	104

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

g	Aceleração da gravidade
а	Altura da seção transversal retangular
h	Altura de solo erodida
h'	Altura equivalente da amostra
φ,β	Ângulo de atrito e de repouso do solo, respectivamente
A	Área da seção transversal
A _s	Área da seção transversal (modelo de partícula esférica)
A _e	Área efetiva da superfície de atrito
A_w, P_w	Área molhada e Perímetro molhado, respectivamente
b	Base da seção transversal retangular
C _d ,η e f	Coeficiente de arrasto, Manning-Strickler e atrito, respectivamente
$\lambda_1,\lambda_2 \ e \ \lambda_3$	Coeficientes da função erodibilidade
S _f	Declividade da linha de energia
ρ_m, ρ_s	Densidade da água e do sólido, respectivamente
G _s	Densidade relativa do grão
d_{s}, d_{50}	Diâmetro característico e mediano dos grãos, respectivamente
D_H	Diâmetro Hidráulico
<i>y</i> ′	Distância da aplicação da tensão de cisalhamento ao ponto O
<i>x'</i>	Distância do centro da gravidade da partícula ao ponto O

δ_1 , δ_2 e δ_3	Expoentes da função erodibilidade
$\Delta \tau \ e \ \Delta \sigma$	Flutuação da tensão cisalhante e normal, respectivamente
F	Força resultante das tensões de cisalhamento
IP	Índice de plasticidade
L	Largura da partícula de solo (modelo cubo)
LL e LP	Limite de liquidez e Limite de plasticidade, respectivamente
'n	Massa de sedimento transportada
Re	Número de Reynolds
Re _*	Número de Reynolds cisalhante do grão
$ au_* e (au_*)_c$	Parâmetro de Shields e Parâmetro Crítico de Shields, respectivamente
W e W _{sub}	Peso e peso submerso, respectivamente
γ_m	Peso específico do fluído
$u_b \ e \ u_t$	Pressão de água na base e topo, respectivamente
Н	Profundidade do canal
n	Quantidade de amostras
ε/D	Rugosidade Relativa
Ż	Taxa de erosão do solo
t	Tempo necessário para erosão total da amostra de solo
$ au_0$	Tensão de cisalhamento
$(\tau_0)_c$	Tensão de cisalhamento crítica

x _i e x	Valor amostral e média amostral, respectivamente		
Q	Vazão		
q_s	Vazão volumétrica de descarga		
V'	Velocidade característica de fronteira		
<i>V</i> _*	Velocidade cisalhante		
V	Velocidade média		
V_L	Velocidade média local		
ν	Viscosidade cinemática		
μ	Viscosidade dinâmica		
v_a	Volume da amostra erodida		
v_s	Volume da partícula de solo		
V _{eq}	Volume equivalente		
UFES	Universidade Federal do Espírito Santo		
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais		
СРН	Centro de Pesquisas Hidráulicas		
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas		
ASTM	American Society for Testing Materials		
SUCS	Sistema Unificado de Classificação de Solos		
CNRH	Conselho Nacional de Recursos Hídricos		

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

Para as muitas obras de infraestrutura executadas pelo homem, especificamente, as obras de pontes e barragens, é importante o domínio pleno de diversas áreas de conhecimento, especialmente a engenharia estrutural e a geotécnica.

Ao longo dos últimos anos muitas barragens foram construídas no Brasil com diferentes funções, indo desde o abastecimento até a contenção de rejeitos. No estado de Minas Gerais existem mais de 700 barragens cadastradas, sendo em sua maioria barragens de rejeito de mineração.

Saliba (2009) afirma que nos últimos anos, acidentes e rupturas de barragens de usos diversos têm sido observadas em território nacional. Ora, os brasileiros ainda estão fragilizados diante da tragédia assistida em Mariana, donde houve 19 (dezenove) óbitos, 8 (oito) desaparecidos e mais de 600 (seiscentos) desabrigados ou desalojados devido a ruptura da barragem de rejeitos de Fundão.

Ainda, o rompimento de barragens é uma modalidade de desastres consideravelmente reincidente na história da humanidade. Dois são os principais fatores que podem ser apontados como causa primária desse evento: o advento de um fenômeno natural intenso responsável por abalar a estrutura da barragem ou o mau planejamento dessa estrutura que independentemente de fatores externos entra em colapso em razão de erro humano.

Ademais, Saliba (2009) define que a probabilidade de ruptura de um maciço por galgamento é composta pelo produto entre a probabilidade de galgamento e a probabilidade deste galgamento provocar o desenvolvimento de um processo erosivo no talude de jusante.

Diante destes fatores, estudos avançados de erosão devem ser realizados para avaliar o comportamento erosivo dos solos utilizados na construção de barragens com maciços homogêneos em solo, especialmente quanto ao seu comportamento em casos extremos, como ocorre durante o galgamento e consequentemente as altas velocidades alcançadas no talude de jusante.

Destaca-se que após a tragédia do furação Katrina em Nova Orleans (EUA), observou-se que algumas das barragens galgadas erodiram em sua totalidade, já outras resistiram muito bem a esse processo. Briaud (2007) estudou o comportamento erosivo de 11 (onze) barragens nos arredores de Nova Orleans através de um aparato desenvolvido em laboratório. Ele foi capaz de medir a taxa de erosão dos solos ao longo do tempo para diferentes velocidades de escoamento.

Através da Teoria do Transporte de Sedimentos e do conceito da erodibilidade temse uma excelente ferramenta para mensurar o comportamento erosivo dos solos sujeitos as altas velocidades de escoamento. Através de experimentos laboratoriais é possível concluir sobre os riscos existentes para as estruturas com maciços em solo acometidas a um cenário crítico, como é o caso do galgamento de barragem e/ou a formação de sulcos erosivos nos solos de fundação de pilares de pontes.

Shields (1936) realizou uma série de experimentos em um canal aberto com colchões de diferentes tipos de areias sujeitas a um escoamento livre. Ele propôs uma importantíssima proporcionalidade entre o diâmetro mediano dos grãos e a tensão cisalhante crítica empregada pelo fluxo.

Já Ting (2001) estudou o comportamento erosivo dos solos de fundação ao redor de pilares de pontes. Mais recentemente, Briaud (2011) desenvolveu um software chamado *Sricos-EFA Method* capaz de calcular a profundidade dos sulcos erosivos ao redor de pilares de pontes sujeitos a um histórico de escoamentos críticos.

Briaud (2001a) afirma que nos Estados Unidos, cerca de 1000 (mil) pontes colapsaram nos últimos 30 (trinta) anos. Dentre elas, 60% colapsaram devido à erosão do solo de fundação.

Saliba (2009) estudou o processo erosivo de um material decorrente da passagem de um escoamento sobre o talude de jusante num cenário de galgamento de barragem. Ainda, avaliou a influência do grau de compactação, através de um aparato de teste desenvolvido em laboratório capaz de medir o volume de solo erodido ao longo do tempo para diferentes velocidades de fluxo. É evidente que o domínio pleno do conhecimento sobre o comportamento erosivo dos solos é muito importante para a engenharia geotécnica, não apenas para minorar problemas econômicos, mas principalmente sociais e ambientais.

A resolução 143/2012 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) em atendimento a lei n.º12.334/2010 disserta sobre os critérios gerais quanto à classificação de barragens por categoria de risco, dano potencial associado e volume de reservatório.

Para a matriz de classificação quanto à categoria de risco para barragens de resíduos e rejeitos, diversos itens são avaliados, como a altura da barragem, o comprimento de crista, a vazão de projeto, a confiabilidade das estruturas extravasoras, a percolação, a deformação e recalques e a deterioração dos taludes devido a erosões superficiais ou depressões acentuadas com sulcos profundos de erosão, originando uma abertura no maciço chamada de brecha.

Destaca-se que na literatura internacional existem diversas pesquisas experimentais que se apoiam no conceito da erodibilidade para estudar o comportamento erosivo dos solos. Entretanto, uma lacuna de conhecimento pode ser identificada no cenário nacional. Desta sorte, este trabalho busca desenvolver um aparato capaz de medir a taxa de erosão de solos coesivos e não coesivos, para diferentes velocidades de escoamento baseado em trabalhos semelhantes da literatura.

Ainda, a metodologia deste trabalho servirá com um roteiro para obtenção de variáveis de interesse, como é o caso das altas velocidades de escoamento alcançadas durante o fenômeno do galgamento de barragens e sua atuação ao longo do talude de jusante, a partir das correlações obtidas em laboratório entre a velocidade média de escoamento e a taxa de erosão do solo.

Ou seja, as amostras poderão ser coletadas em campo na forma indeformada, levadas ao laboratório e a partir dos resultados ensaiados no aparato de teste, será possível concluir a respeito da classe erosiva do material e até mesmo propor correlações para o cálculo da taxa de erosão do material de forma algébrica.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é a proposição de uma abordagem experimental para a obtenção da taxa de erosão de solos, através de um aparato de mesa do tipo pistão, desenvolvido ao longo desta dissertação.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos correspondem à aplicação da metodologia proposta a um solo sedimentar formação de barreiras com alto percentual de finos e com moderada plasticidade, procurando:

- Avaliar o comportamento erosivo do solo adotado através do aparato de teste para diferentes velocidades de escoamento, obtendo-se suas taxas de erosão correspondentes a essas velocidades;
- Classificar o comportamento erosivo do solo de acordo com a metodologia proposta pela circular *Evaluating Scour at Bridges*, HEC-18 (FHWA, 2012) e Briaud (2001a), que classifica o solo em classes de erodibilidade de acordo com sua taxa de erosão, classificação SUCS e velocidade de escoamento;
- Propor correlações entre a velocidade média de escoamento com a taxa de erosão do solo e a tensão cisalhante imposta pelo escoamento com a taxa de erosão do solo.

1.3 Estruturação da dissertação

Esta dissertação de mestrado foi dividida em 6 (seis) capítulos, conforme descrito pelos itens a seguir:

- Capítulo 1: Contém a introdução, com a contextualização, o objetivo geral e específico e a organização da dissertação;
- Capítulo 2: Contém a revisão bibliográfica, abordando os temas de transporte de sedimentos, erodibilidade e aparatos encontrados na literatura para obtenção da taxa de erosão de solos;
- Capítulo 3: Contém a metodologia, com a caracterização granulométrica do material e seus resultados, ensaio de cisalhamento e seus resultados, o desenvolvimento e características físicas do aparato de teste e a metodologia do ensaio de erosão;
- Capítulo 4: Contém os resultados e suas discussões, apresentando os fenômenos observados durante a execução dos ensaios de erosão, como a expansão do material e trincamento, o surgimento do platô resistente, a sucção da amostra para altas velocidades e o cálculo da velocidade e tensão cisalhante crítica;
- Capítulo 5: Contém as conclusões e recomendações;
- Capítulo 6: Referências bibliográficas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Escoamento laminar e turbulento

Um escoamento laminar é aquele no qual as partículas fluidas movem-se em camadas lisas, ou lâminas. Um escoamento turbulento é aquele no qual as partículas fluidas rapidamente se misturam, enquanto se movimentam ao longo do escoamento devido a flutuações aleatórias no campo tridimensional de velocidades.

A velocidade do escoamento laminar será simplesmente u, ou seja, $\vec{V} = u \cdot \hat{\imath}$. Já a velocidade de escoamento turbulento é composta pela velocidade média \bar{u} mais as três componentes das flutuações aleatórias da velocidade, $\vec{V} = (\bar{u} + u')\hat{\imath} + v'\hat{\jmath} + w'\hat{k}$.

Embora muitos escoamentos turbulentos de interesse sejam permanentes (\bar{u} não é uma função do tempo), a presença de flutuações aleatórias de velocidade torna a análise do escoamento turbulento extremamente difícil.

Em um escoamento laminar, unidimensional, a tensão de cisalhamento está relacionada com o gradiente de velocidade pela relação simples, na qual μ é a viscosidade dinâmica do fluido (FOX, 2006):

$$\tau_{yx} = \mu \frac{\partial u}{\partial y} \tag{2.1}$$

Para um escoamento turbulento, no qual o campo de velocidade média é unidimensional, nenhuma relação simples como à equação 2.1 será válida. Flutuações tridimensionais e aleatórias de velocidade (u', v', e w') transportam quantidade de movimento através das linhas de corrente do escoamento médio, aumentando a tensão de cisalhamento efetiva (FOX, 2006).

Consequentemente, para escoamentos turbulentos, não existem relações universais entre o campo de tensões e o campo de velocidade média. Portanto, para a análise

de escoamentos turbulentos, tem-se que apoiar fortemente em teorias semiempíricas e em dados experimentais (FOX, 2006).

2.2 Transporte de sedimentos e erosão

O transporte de sedimentos é um termo genérico usado para o transporte de materiais – argilas, siltes, areias e pedregulhos – em um canal com leito móvel. Os materiais transportados são chamados de sedimentos de carga (CHANSON, 2004).

Os grãos com os maiores diâmetros serão transportados através do o leito do canal pelos mecanismos de rolamento, deslizamento e arrancamento. Já os grãos com menores diâmetros, se encontrarão em suspensão e serão transportados através da turbulência do escoamento.

Nas mais práticas situações de transporte de sedimentos em canais com leitos móveis, o escoamento distorcerá o leito em diferentes formas. Em geral, os sedimentos encontrados nos leitos dos rios e possuem um comportamento semelhante aos dos materiais não coesivos, como as areias e os pedregulhos.

Para pequenas velocidades de escoamento não haverá a movimentação do leito. Com o incremento das velocidades a iminência do movimento das partículas será alcançada e os sedimentos começarão a se deslocar na direção do escoamento.

A Tabela 2.1 apresenta os diâmetros característicos dos principais tipos de materiais encontrados nos rios e canais sujeitos ao transporte de sedimentos.

Material	$d_s (mm)$
Argilas	<i>d</i> _s < 0,002
Siltes	$0,002 < d_s < 0,075$
Areias	$0,075 < d_s < 2,0$

Tabela 2	2.1 –	Diâmetro	característico	dos	arãos.	d.
		Diamouo	ourablefiblioo	400	gruos,	us.

Fonte: Chanson (2004).

2.2.1 Tensão de cisalhamento e velocidade cisalhante

Segundo Chanson (2004) o transporte de sedimentos em um canal com leito móvel ocorre sempre que a tensão de cisalhamento imposta pelo escoamento nas paredes excede um valor limite (SALIBA, 2009). A tensão de cisalhamento imposta pelo escoamento ao leito em condições de regime permanente é igual a:

$$\tau_0 = \frac{1}{2} \cdot C_d \cdot \rho_m \cdot V^2 \tag{2.2}$$

na qual,

 au_0 é a tensão de cisalhamento (N/m²);

 C_d é o coeficiente de arrasto;

 ρ_m é a densidade do fluído (N/m³);

V é a velocidade média de escoamento (m/s).

A tensão de cisalhamento imposta pelo escoamento a um canal pode ser reescrita em termos da declividade de atrito, S_f . Segundo Henderson (1966 *apud* SALIBA, 2009, p.25) e FHWA (2012) a tensão de cisalhamento é igual a:

$$\tau_0 = \gamma_m \cdot R_H \cdot S_f \tag{2.3}$$

na qual,

 γ_m é o peso específico do fluído (N/m³);

 S_f é a declividade da linha de energia do escoamento (m/m);

 R_H é o raio hidráulico, igual à razão entre área molhada e perímetro molhado (m);

A declividade de atrito é calculada admitindo-se a validade da equação de Manning (CHANSON, 2004 *apud* SALIBA, 2009, p.23):

$$S_f = \left(\frac{Q \cdot \eta}{A \cdot R_H^{2/3}}\right)^2 \tag{2.4}$$

na qual,

Q é a vazão no trecho (m³/h);

A é a área da seção transversal no trecho (m);

 η é o coeficiente de Manning-Strickler.

Ainda, FHWA (2012) apresenta uma equação para o cálculo da tensão cisalhante local – nas redondezas de pilares ou ombreiras de pontes –, substituindo o raio hidráulico R_H da equação 2.3 pela profundidade do escoamento de interesse H.

Desenvolvendo-se, tem-se:

$$\tau_0 = (n \cdot V_L)^2 \cdot \frac{\gamma_m}{H^{1/3}}$$
(2.5)

na qual,

 V_L é a velocidade média de escoamento local (m/s); H é a profundidade do perfil de escoamento local (m).

Strickler (1923) propôs uma correlação empírica para o coeficiente de Manning sendo uma função do diâmetro mediano dos grãos (CHANSON, 2004):

$$\eta = 0.041 \cdot d_{50}^{-1/6} \tag{2.6}$$

na qual:

 d_{50} é o diâmetro mediano dos grãos, diâmetro equivalente a abertura da malha da peneira em que 50% do material peneirado fica retido (m).

Comumente para escoamentos livres utiliza-se a equação 2.2 em termos do coeficiente de atrito de Darcy, *f*. Sabe-se que (CHANSON, 2004):

$$f = 4 \cdot C_d \tag{2.7}$$

Logo, tem-se:

$$\tau_0 = \frac{1}{8} \cdot f \cdot \rho_m \cdot V^2 \tag{2.8}$$

A velocidade cisalhante é uma medida dependente da tensão cisalhante e do gradiente de velocidade nas regiões de fronteira. Ela funcionará como um indicativo para concluir sobre essas grandezas. Ora, uma grande velocidade cisalhante implica numa grande tensão de cisalhamento e um alto gradiente de velocidade. A velocidade cisalhante V_* é definida por (JULIEN, 1998):

$$V_* = \sqrt{\tau_0 / \rho_m} \tag{2.9}$$

Ainda, a velocidade cisalhante V_* pode ser reescrita em termos da velocidade média de escoamento e do fator de atrito de Darcy. Da equação 2.8 e 2.9, tem-se:

$$\frac{V}{V_*} = \sqrt{\frac{8}{f}} \therefore V_* = \frac{V}{\sqrt{8/f}}$$
 (2.10)

2.2.2 Número de Reynolds, dutos não circulares, fator de atrito de Darcy e rugosidade relativa.

A classificação do regime de escoamento – tanto para conduto livre ou forçado –, será comumente definido por laminar ou turbulento. Autores divergem quanto ao valor do número de Reynolds para a realização da classificação. Desta sorte, este trabalho utiliza a definição de que o escoamento será turbulento quando o número de Reynolds for igual ou superior a 2400 (CHANSON, 2004).

O número de Reynolds é definido por:

$$Re = \rho_m \cdot \frac{V \cdot D_H}{\mu} \tag{2.11}$$

na qual,

 D_H é o diâmetro hidráulico (m);

 μ é a viscosidade dinâmica do fluído (kg/m.s).

Ademais,

$$\nu = \frac{\mu}{\rho_m} \tag{2.12}$$

na qual,

 ν é a viscosidade cinemática do fluído [para água com 20°C; $\nu = 10^{-6} m^2/s$].

Dutos com seções transversais quadradas ou retangulares podem ser tratados como dutos circulares se a razão entre a altura e a largura for inferior a 4 (FOX, 2006).

O diâmetro hidráulico D_H é definido por:

$$D_H \equiv \frac{4A_w}{P_w} \tag{2.13a}$$

na qual,

 A_w é a área da seção transversal molhada (m²);

 P_w é o perímetro molhado (m).

O fator 4 é introduzido para que o diâmetro hidráulico seja igual ao diâmetro do duto para uma seção circular. Para um duto circular, conhecida sua área molhada e perímetro molhado [$A_w = \pi D^2/4$ e $P_w = \pi D$], têm-se:

$$D_H = \frac{4A_w}{P_w} \therefore \frac{4\left(\frac{\pi}{4}\right)D^2}{\pi D} = D$$
(2.13b)

Para um duto retangular com largura b e altura a, $[A_w = ab e P_w = 2(a + b)]$:

$$D_{H} = \frac{4A_{w}}{P_{w}} = \frac{4 \cdot ab}{2 \cdot (a+b)} = \frac{2ab}{a+b}$$
(2.13c)

na qual:

a é a altura da seção transversal retangular (m);

b é a base da seção transversal retangular (m).

A partir das equações 2.11, 2.12 e 2.13c, o número de Reynolds pode ser reescrito de acordo com a geometria do duto e da viscosidade cinética do fluído:

$$Re = \frac{V}{\nu} \cdot \left(\frac{2ab}{a+b}\right) \tag{2.14}$$

O fator de atrito de Darcy f pode ser calculado algebricamente através da fórmula de Colebrook-White com poucas interações, através (FOX, 2006):

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \log_{10} \left(\frac{d_s}{3,71 \cdot D_H} + \frac{2,51}{Re \cdot \sqrt{f}} \right)$$
(2.15)

Nota-se que a equação 2.15 é não linear, com o fator de atrito f estando presente em ambos os lados da equação. Através da solução gráfica, o fator de atrito f será uma função descrita por duas variáveis como demonstrada na equação 2.16, no qual o primeiro termo representa o número de Reynolds e o segundo termo representa a rugosidade relativa.

$$f = f\left(\rho_m \cdot \frac{V \cdot D_H}{\mu} = Re; \frac{d_s}{D_H} = \varepsilon/D\right)$$
(2.16)

A rugosidade relativa em termos do diâmetro hidráulico com seção retangular e do diâmetro representativo dos grãos (adotando $\varepsilon = 0,50 \cdot d_{50}$; considerando que apenas 50% do diâmetro dos grãos estarão em contato com o escoamento, e a outra metade dentro da massa de solo) será igual a (BRIAUD, 2005):

$$\frac{\varepsilon}{D} = \frac{0.5 \cdot d_{50}}{D_H} = \frac{d_{50} \cdot (a+b)}{4 \cdot a \cdot b}$$
(2.17)

na qual,

 ε/D é a rugosidade relativa (adimensional);

2.2.3 Forças que agem no grão do material

Em um canal com leito móvel, identificam-se as forças impostas ao grão do material:

- A força gravitacional $\therefore F_g = \rho_s g v_s$ (N);
- A força de empuxo $\therefore F_e = \rho_m g v_s$ (N);
- A força de arrasto \therefore $F_a = C_d \rho_m A_s V^2 / 2$ (N);
- A força de sustentação $\therefore F_s C_L \rho_m A_s V^2/2$ (N);
- As forças de contato entre grãos.

na qual,

 $\rho_S e \rho_m$ são a densidade do material e do fluído, respectivamente (kg/m³);

 $C_d \ e \ C_L$ são o coeficiente de arrasto e de sustentação (adimensionais);

 v_s é o volume da partícula (m³);

 A_s é a área da seção transversal da partícula (m²);

V é a velocidade característica limite, $[V = V_*]$ (m/s).

Sabe-se que a força gravitacional e o empuxo agem na direção vertical, enquanto a força de arrasto age na direção do escoamento. Já a força de sustentação age na direção perpendicular à direção do escoamento.

A Figura 2.1 destaca as forças atuantes numa partícula do material com leito móvel.



Figura 2.1 – Forças atuantes na partícula constituinte de um leito móvel.

Fonte: Adaptado de Chanson (2004).

2.2.4 Tensão de cisalhamento crítica

A iminência do movimento é o termo que irá descrever as condições do escoamento e do material de leito a qual se iniciará o transporte de sedimentos. Ainda, a iminência do movimento de um sedimento que compõe o leito móvel de um canal não poderá ser definida de forma absoluta. Entretanto, através de uma série de experimentos, bons resultados foram observados com alto grau de confiabilidade.

Ainda, observações experimentais encontradas na literatura indicam que o limite para o início do movimento é fundamentalmente função da turbulência do escoamento.

Os parâmetros relevantes para a análise da eminência do movimento e consequentemente do transporte dos sedimentos são: (1) a tensão cisalhante τ_0 , (2) a densidade do sedimento ρ_s , (3) a densidade do fluído ρ_m , (4) o diâmetro representativo d_s , (5) a viscosidade dinâmica do fluído μ . Portanto, define-se a função:

$$f_1(\tau_0, \rho_s, \rho_m, d_s, \mu) = 0$$
 (2.18a)

Através da análise adimensional tem-se (CHANSON, 2004):

$$f_2\left(\frac{\tau_0}{\rho_m g d_s}; \frac{\rho_s}{\rho_m}; \frac{d_s \sqrt{\rho_m \tau_0}}{\mu}\right) = 0$$
(2.18b)

Da equação 2.9, a equação 2.18b pode ser reescrita como:

$$f_3\left(\frac{V_*}{\sqrt{gd_s}}; \frac{\rho_s}{\rho_m}; \rho_m \frac{d_s V_*}{\mu}\right) = 0$$
(2.18c)

O primeiro termo da equação 2.18c é uma forma do número de Froude em termos da velocidade cisalhante V_* . O segundo termo é definido pela densidade relativa do grão G_s . E o terceiro termo é definido pelo número de Reynolds em termos do diâmetro representativo do grão d_s e da velocidade cisalhante V_* .

Ademais, o último termo da equação 2.18c é comumente chamado de número de Reynolds cisalhante do grão, definido por:

$$Re_* = \rho_m \frac{V_* \cdot d_s}{\mu} = \frac{V_* \cdot d_s}{\nu}$$
(2.19)

na qual:

Re_{*} é o número de Reynolds cisalhante do grão (adimensional);

 V_* é a velocidade cisalhante (m/s);

 d_s é o diâmetro representativo das partículas que constituem o leito [$d_s = d_{50}$] (m); ν é a viscosidade cinemática do fluído [para água com 20°C; $\nu = 10^{-6} m^2/s$]. Através de observações experimentais, percebe-se que o movimento das partículas se inicia quando os momentos atuantes impostos pelas forças desestabilizadoras são maiores do que os momentos atuantes pelas forças estabilizadoras (força de contato).

Negligenciando as forças de arraste e admitindo que o leito seja constituído de um material com partículas esféricas, o transporte (movimento) se inicia assim que as forças cisalhantes decorrentes do escoamento excedam um percentual do peso próprio da partícula do material (CHANSON, 2004 *apud* SALIBA, 2009, pg. 27).

Introduz-se o parâmetro de estabilidade τ_* , conhecido também como o parâmetro de Shields em termos da tensão cisalhante imposta pelo escoamento, τ_0 (CHANSON, 2004):

$$\tau_* = \frac{\tau_0}{\rho_m (G_s - 1)gd_s}$$
(2.20a)

na qual,

 τ_0 é a tensão cisalhante (N/m²);

 ρ_m é a densidade do fluído (kg/m³);

 G_s é a densidade relativa do grão, $[G_s = \rho_s / \rho_m]$ (adimensional);

g é a aceleração da gravidade (m/s²);

 d_s é o diâmetro representativo das partículas constituintes do leito (m).

Saliba (2009) afirma que o parâmetro de Shields pode ser entendido como um número adimensional para avaliar a condição da mobilidade de um leito. Nesta proposição não se consideram as forças de contato entre as partículas, como também não é válida para declividades acentuadas [lê-se, não é válida para declividades acentuadas [lê-se, não é válida para declividades de leito maior do que o ângulo de repouso das partículas do material].

Ainda, pode-se reescrever o parâmetro de Shields em termos da velocidade cisalhante, V_* [da equação 2.9]:

$$\tau_* = \frac{{V_*}^2}{(G_s - 1)gd_s}$$
(2.20b)

Chanson (2004) apresenta uma equação para o parâmetro de Shields em função do raio hidráulico e da declividade da linha de energia do escoamento (SALIBA, 2009):

$$\tau_* = \frac{F}{W_{sub}} = \frac{R_H \cdot S_f}{(G_s - 1)d_s}$$
(2.20c)

na qual,

F é a força resultante da tensão de cisalhamento resultante do atrito fluido-leito (N); W_{sub} é o peso da partícula submerso (N);

 d_s é o diâmetro representativo das partículas, usualmente adotado igual a d_{50} (m);

 R_H é o raio hidráulico (m);

 S_f é a declividade da linha de energia do escoamento (m/m);

 G_s é a densidade relativa do grão (adimensional);

 τ_* é o parâmetro de Shields (adimensional).

Um valor crítico do parâmetro de Shields $[\tau_* = (\tau_*)_c]$ indica o valor necessário para se alcançar o início do movimento da partícula do material que compõe o leito móvel. Chanson (2004) afirma que $(\tau_*)_c$ é essencialmente função do número de Reynolds cisalhante do grão Re_* . Para que ocorra o movimento do leito, tem-se:

$$\tau_* > (\tau_*)_c \tag{2.21}$$

na qual,

 $(\tau_*)_c$ é o parâmetro crítico de Shields (adimensional).

As partículas do material de leito móvel irão se movimentar quando a tensão de cisalhamento τ_0 for maior do que o valor crítico $(\tau_*)_c$. Da equação 2.20a, tem-se:

$$(\tau_0)_c = \rho_m (G_s - 1) g d_s(\tau_*)_c \tag{2.22}$$

na qual,

 $(\tau_0)_c$ é a tensão cisalhante crítica para o início do movimento da partícula (N/m²).

O gráfico da variação do parâmetro de Shields e do número de Reynolds cisalhante do grão é o que define o conhecido diagrama de Shields. A Figura 2.2 apresenta este diagrama, destacando as três regiões do gráfico que descreve o estado do grão, de acordo com as características do material e do escoamento.



Figura 2.2 – Diagrama de Shields (material não coesivo).

Fonte: Adaptado de Chanson (2004).
Conhecendo o número de Reynolds cisalhante do grão e o parâmetro de Shields e através da Figura 2.2, pode-se concluir sobre a condição de movimento da partícula.

Atentar que o diagrama de Shields apresentado na Figura 2.2 só será válido para materiais não coesivos. Van Rijin (1993) demonstrou que para leitos compostos por argilas e siltes, as forças coesivas entre as partículas serão muito importantes, pois colaborarão com o aumento do momento das forças resistentes à erosão.

Para escoamentos turbulentos e para areias e pedregulhos o parâmetro crítico de Shields $(\tau_*)_c$ será aproximadamente constante. Briaud (1999b *apud* BRIAUD, 2001a, p. 106) afirma que a tensão cisalhante de fronteira crítica $(\tau_0)_c$ será linearmente proporcional ao diâmetro mediano dos grãos d_{50} , como se percebe pela Eq. 2.22.

$$(\tau_0)_c \propto d_s = d_{50} \tag{2.23}$$

Esta correlação é muito importante, pois através de um simples resultado é possível mensurar o valor da tensão cisalhante crítica e, consequentemente, a partir da Eq. 2.8 a velocidade média de escoamento crítica.

Entretanto, a presença de material coesivo irá interferir diretamente nessa linearidade, pois as características relevantes para o processo erosivo de solos coesivos será uma composição entre o diâmetro mediano dos grãos e as forças eletromagnéticas existentes entre as partículas, destacando-se, também, a relevância da forma dos grãos do material.

Shields (1936 *apud* BRIAUD, 2001a, p. 106) realizou uma série de experimentos com diferentes tipos de areias. Briaud (2001a) e (2008) complementou este estudo, utilizando um aparato de teste chamado *Erosion Function Apparatus* (EFA). Através dos seus resultados, ele apresentou correlações entre o diâmetro mediano dos grãos e as tensões cisalhantes críticas para solos coesivos (Figura 2.3).





Fonte: HEC-18/FHWA (2012).

2.2.5 Equações de transporte de sedimentos

As equações de transporte de sedimentos são utilizadas para representar o transporte do material do leito ao longo do escoamento, ou seja, o transporte aluvionar (SALIBA, 2009).

O transporte de sedimentos ao longo do canal móvel consiste do deslocamento das partículas do material que compõem o leito, através dos mecanismos de deslizamento, rolamento ou arrancamento da partícula.

Ainda, os materiais com menores diâmetros poderão estar em suspensão, transportados pela turbulência do escoamento sem recorrer aos mecanismos supracitados. Importante destacar que a suspensão do material será função da velocidade de queda do sedimento e do tipo de escoamento no entorno da partícula.

Desta sorte, a taxa de transporte de um material será igual à somatória dos mecanismos de transporte observados, mais o material transportado por suspensão.

Como já explicado anteriormente, conforme as velocidades de escoamento aumentam, observam-se perfis de erosão do leito que variam com diferentes tipos de superfície, dependentes do sentido do deslocamento das partículas. A forma da superfície do leito irá interferir aumentando ou diminuindo as tensões cisalhantes empregadas pelo escoamento.

Na Figura 2.4 apresenta as principais superfícies encontradas dos leitos, destacando o sentido do escoamento e descolamento do sedimento. A geometria final do leito função do número de Froude.



Figura 2.4 – Principais tipos de superfície de leitos encontrados na natureza.

Fonte: Chanson (2004).

A taxa de transporte é medida através da massa de solo transportada:

$$\dot{m} = \rho_s \cdot q_s \tag{2.24}$$

na qual,

 \dot{m} é a massa de sedimento transportada por metro de largura do canal (kg/m);

 ρ_s é a densidade do material constituinte do leito (kg/m³);

 q_s é a vazão volumétrica de descarga de sedimentos (m³/s.m);

Diversos autores da literatura, como Du Boys (1879), Schoklitsch (1930), Shields (1936), Einstein (1942), Meyer-Peter (1949) e Nielsen (1992) propuseram correlações empíricas e semi-empíricas para o cálculo da vazão volumétrica de descarga de sedimentos transportados, q_s (CHANSON, 2004).

Graf (1971) e Rijin (1993) discutiram a aplicabilidade destas equações, e concluíram que as mais notórias correlações são as de Meyer-Peter e Einstein. A primeira equação é muito utilizada na Europa para o cálculo do transporte de sedimentos em largos canais com materiais não coesivos. Já a correlação de Einstein é derivada dos modelos físicos para o salto de partículas, sendo mais utilizada nos EUA.

A Tabela 2.2 apresenta as equações de Meyer-Peter (1949) e Einstein (1942), suas faixas de aplicação e comentários sobre o material utilizado em seus experimentos.

Autor	Correlação proposta	Aplicação	Comentários
Meyer Peter	$\frac{q_s}{\sqrt{(G_s - 1) - gd_s^3}} = \left(\frac{4\tau_0}{\rho_m(G_s - 1)gd_s} - 0,188\right)^{3/2}$	$1,25 < G_s < 4,2$	Experimentos laboratoriais com misturas de areias ($d_s = d_{50}$)
Einstein	$\frac{q_s}{\sqrt{(G_s-1)gd_s^3}} = 2,15 \cdot exp\left(-0,391 \cdot \frac{\rho(G_s-1)gd_s}{\tau_0}\right)$	$\frac{q_s}{\sqrt{(G_s - 1)g{d_s}^3}} < 10$ $1,25 < G_s < 4,2$	Experimentos laboratoriais para misturas de areias ($d_s \approx$ d_{35} até d_{45})

Fonte: Chanson (2004).

2.3 Erodibilidade

Erodibilidade é um termo moderno utilizado em estudos experimentais de erosão. A erodibilidade pode ser definida pela relação entre a taxa de erosão \dot{Z} e a velocidade de escoamento *V* imposta pelo fluído numa zona de fronteira.

Saliba (2009) descreve a erodibilidade sendo a taxa de erosão vertical a que o material está sujeito quando exposto a uma velocidade de fluxo. Já Pruski (2009) define que a erodibilidade consiste na taxa de desprendimento e arraste das partículas do solo, ocasionado pela ação da água.

Entretanto, as definições supracitadas não são satisfatórias, pois a velocidade varia de direção e intensidade ao longo do escoamento. De fato, ao longo do campo de velocidades, a velocidade será igual à zero nas regiões de fronteira (na interface entre a água e o solo).

Briaud (2008) propõe que a erodibilidade pode ser definida pela relação entre a taxa de erosão \dot{Z} e a tensão de cisalhamento τ_0 imposta pelo escoamento à partícula de solo presente nas regiões de fronteira:

$$\frac{\dot{Z}}{V} = \lambda_1 \cdot \left(\frac{\tau_0 - (\tau_0)_c}{\rho_m \cdot V^2}\right)^{\delta_1} + \lambda_2 \cdot \left(\frac{\Delta \tau}{\rho_m \cdot V^2}\right)^{\delta_2} + \lambda_3 \cdot \left(\frac{\Delta \sigma}{\rho_m \cdot V^2}\right)^{\delta_3}$$
(2.25)

na qual,

 \dot{Z} é a erodibilidade do material (m/h);

V é a velocidade média de escoamento (m/s);

 $\lambda_1, \lambda_2 e \lambda_3$ são coeficientes da função erodibilidade (adimensional);

 δ_1 , $\delta_2 e \delta_3$ são expoentes da função erodibilidade (adimensionais);

 ρ_m é a densidade do fluído (kg/m³);

 $\Delta \tau e \Delta \sigma$ são as flutuações das tensões cisalhante e normal impostas pelo fluído devido a flutuação (N/m²);

 $\tau_0 e(\tau_0)_c$ são a tensão cisalhante e cisalhante crítica, respectivamente (N/m²).

Ainda, Briaud (2008) destaca que a equação 2.25 pode ser reescrita desprezando os efeitos da turbulência, pois não é prático a obter os três coeficientes e os três expoentes da função erodibilidade durante uma modelagem experimental.

$$\frac{\dot{Z}}{V} = \lambda_1 \cdot \left(\frac{\tau_0 - (\tau_0)_c}{\rho_m \cdot V^2}\right)^{\delta_1}$$
(2.25a)

Saliba (2009) afirma que a equação 2.25a se assemelha a forma das equações de transporte de sedimentos [vide Tabela 2.2]. Ademais, a diferença de abordagem entre a teoria do transporte de sedimentos e a erodibilidade reside no fato de que o conceito da erodibilidade deixa livre para o usuário adaptar a forma e o tipo da função de acordo com os dados disponíveis.

2.3.1 Mecanismo de deslizamento

Areias e pedregulhos erodem grão a grão. Esta constatação foi observada através de vídeos em câmera lenta. O transporte das partículas ao longo do leito acontece através dos mecanismos físicos de deslizamento, rolamento e arrancamento. Para todos os três casos, desconsideram-se as forças eletromagnéticas e eletrostáticas entre as partículas, pois a análise é realizada para um material não coesivo (BRIAUD, 2001a).

O mecanismo de deslizamento assume que a partícula de solo é uma esfera e a força resultante imposta pelo escoamento será uma força cisalhante paralela à superfície de erosão. As partículas vizinhas não exercerão forças sobre a partícula analisada, pois estas irão se mover com uma mesma taxa de deslocamento horizontal, não existindo deslocamento diferencial.

Devido ao aumento da velocidade de escoamento, a tensão cisalhante imposta pelo fluxo torna-se suficientemente grande para vencer a resistência imposta pelo atrito

entre as partículas sobrepostas. A Figura 2.5 apresenta um diagrama com as resultantes das forças atuantes na partícula de solo.



Figura 2.5 - Mecanismo de deslizamento (solo não coesivo).

Fonte: Adaptado de Briaud (2001a).

Da Figura 2.5 e fazendo $\sum \vec{F_x} = 0$, tem-se (WHITE, 1940 *apud* BRIAUD, 2001a, p.105):

$$(\tau_0)_c.A_e = W_{sub}.\tan\varphi \tag{2.26a}$$

na qual,

 $(\tau_0)_c$ é a tensão cisalhante crítica (N/m²);

 A_e é a área efetiva da superfície de atrito água/solo [$A_e = \alpha \cdot A_s$] (m²);

 A_s é a área da seção transversal da partícula esférica (m²);

 W_{sub} é o peso submerso da partícula (N);

 φ é o ângulo de atrito entre as partículas (°);

 α é um parâmetro experimental (adimensional).

Considerando a partícula uma esfera [*Volume da esfera* = $\pi d_{50}^3/6$], tem-se:

$$(\tau_0)_c. \alpha. \frac{\pi. d_{50}^2}{4} = (\rho_s - \rho_m). g. \frac{\pi. d_{50}^3}{6} . \tan \varphi$$
 (2.26b)

Desenvolvendo para τ_c , tem-se:

$$(\tau_0)_c = 2 \cdot \frac{(\rho_s - \rho_m) \cdot g \cdot \tan \varphi}{3} \cdot d_{50}$$
(2.26c)

nas quais,

 $\rho_s e \rho_m$ são a densidade do material e do fluído (kg/m³), respectivamente;

 d_{50} é o diâmetro mediano dos grãos (m);

g é a aceleração da gravidade (m/s²).

2.3.2 Mecanismo de rolamento

O mecanismo de rolamento assume que a partícula do solo é uma esfera e a força resultante imposta pelo escoamento será uma força cisalhante paralela à superfície de erosão. As partículas nas redondezas não exercerão forças sobre a partícula analisada, pois irão se mover com uma mesma taxa de deslocamento, não existindo deslocamento diferencial.

Devido ao aumento da velocidade de escoamento, a tensão cisalhante de fronteira torna-se suficientemente grande para vencer a resistência imposta pelo peso da partícula. Quando o momento atuante for suficiente para elevar o centro de gravidade da partícula de solo acima do ponto de contato O, o rolamento da partícula irá ocorrer em torno deste ponto.

A Figura 2.6 apresenta a resultante dos momentos atuantes na partícula de um solo de acordo com o mecanismo de rolamento.



Figura 2.6 - Mecanismo de rolamento (solo não coesivo).

Fonte: Adaptado de Briaud (2001a).

Da Figura 2.6 e fazendo $\sum \vec{M}_0 = 0$, tem-se (WHITE, 1940 *apud* BRIAUD, 2001a, p.105):

$$(\tau_0)_c. A_e \cdot y' = W_{sub}. x' \tag{2.27a}$$

na qual,

x' é a distância do centro de gravidade da partícula em relação ao ponto O (m);

y' é a distância da aplicação de τ_c em relação ao ponto O (m);

 β é o ângulo de repouso da partícula (°).

Considerando a partícula uma esfera [*Volume da esfera* = $\pi d_{50}^3/6$], tem-se:

$$(\tau_0)_c \cdot \frac{\alpha \cdot \pi \cdot d_{50}}{4} \cdot \left(\frac{d_{50}}{2} + \frac{d_{50} + \cos\beta}{2}\right) = (\rho_s - \rho_m) \cdot g \cdot \frac{\pi \cdot d_{50}^3}{6} \cdot \frac{d_{50}}{2} \cdot \sin\beta$$
(2.27b)

Desenvolvendo para $(\tau_0)_c$, tem-se:

$$(\tau_0)_c = \frac{2(\rho_s - \rho_m). g. \sin\beta}{3\alpha. (1 + \cos\beta)} d_{50}$$
(2.27c)

Observa-se que para ambos os mecanismos a tensão cisalhante crítica (na iminência do movimento) é linearmente proporcional ao diâmetro mediano dos grãos, como foi proposto por Briaud para areias (1999b, *apud* BRIAUD, 2001a, p. 106) [vide equação 2.23 e Figura 2.3].

2.3.3 Mecanismo de arrancamento

O mecanismo de arrancamento assume que a partícula de solo é um cubo com lados iguais e comprimento igual a *L*. A pressão de água no topo do cubo é u_t e a pressão de água na base do cubo é u_b . A Figura 2.7 representa o mecanismo de arrancamento e as forças atuantes na partícula de um solo não coesivo.



Figura 2.7 - Mecanismo de arrancamento (solo não coesivo).

Fonte: Adaptado de Briaud (2005).

Assumindo que todas as partículas do solo são arrancadas ao mesmo tempo, a pressão diferencial necessária entre o topo e a base para que se inicie o processo de arrancamento da partícula ou de um bloco de partículas, será (BRIAUD, 2007):

$$W = (u_b - u_t) L^2 \therefore \rho_s \cdot g \cdot L = u_b - u_t$$
(2.28a)

na qual,

W é o peso da partícula (N);

 $u_b e u_t$ são a pressão de água na base e no topo, respectivamente (N/m²); L é o largura do cubo (m).

Sabe-se que a diferença de pressão de água entre o topo e a base da partícula pode ser reescrita da forma:

$$u_b - u_t = (u_b - u_t)_0 + \Delta u$$
 (2.28b)

na qual,

 $(u_b - u_t)_0$ é a diferença de pressão hidrostática entre a base e o topo (N/m²); Δu é a variação de pressão devido ao escoamento turbulento (flutuações) (N/m²).

Briaud (2005) demonstra que a variação de pressão Δu necessária para que ocorra o arrancamento de uma partícula com $d_s = 1mm$ poderá ser facilmente alcançada, sendo, aproximadamente igual a 15 N/m² (correspondente a 1,5 x 10⁻³ m.c.a).

Portanto, o transporte das partículas ao longo do leito será a combinação dos mecanismos de arrancamento, deslizamento e rolamento; acontecendo simultaneamente ou não. Entretanto, todas as análises até aqui foram feitas desconsiderando a coesão entre as partículas.

2.4 Erodibilidade em solos coesivos

Para os solos coesivos a erosão será de grãos, mas podendo ser também de blocos de grãos (diferentemente do que ocorre para solos não coesivos). Os blocos de grãos são formados naturalmente na matriz do solo, devido às microfissuras resultantes de diferentes fenômenos, como a compressão ou expansão.

Já a resistência à erosão de solos coesivos é influenciada pela combinação do peso próprio da partícula e, principalmente, pelas forças eletrostáticas e eletromagnéticas que existem entre as partículas do solo. O Quadro 2.1 apresenta alguns fatores responsáveis pela influência da erodibilidade em solos coesivos.

Quando esse parâmetro aumenta	O valor da erodibilidade
Peso específico	Diminuí
Resistência não drenada	Aumenta
Índice de plasticidade	Diminuí
Índice de vazios	Aumenta
Percentual que passa #200	Diminuí
Temperatura do solo	Aumenta
Temperatura da água	Aumenta

Quadro 2.1 – Fatores influentes na erodibilidade de solos coesivos.

Fonte: Adaptado de HEC-18/FHWA (2012).

A diferença experimental entre os solos coesivos e não coesivos, em termos de erodibilidade, será perceptível para as taxas de erosão acima da tensão de cisalhamento crítica. Nos solos coesivos, a taxa de erosão aumenta lentamente, medindo poucos milímetros por hora, diferentemente do que ocorre para os solos não coesivos na qual a taxa de erosão chega à ordem de 10⁶ vezes maiores para areias finas. Portanto, devido à complexidade da análise do processo erosivo para solos coesivos, o estudo experimental para esses solos é necessário.

2.5 Aparatos existentes para determinação de parâmetros de erosão

2.5.1 Aparato tipo pistão

São aparatos laboratoriais que medem a erosão de uma amostra de solo ou rocha exposta a um escoamento de água em pequenos condutores com condições controladas. Um amostrador cheio de solo ou rocha é colocado através do fundo do canal hidráulico em que a água escoa a uma velocidade constante (controlada).

O solo ou rocha é gradualmente cisalhado pelo escoamento de água e para cada velocidade de teste adotada será obtida uma taxa de erosão associada, juntamente de uma tensão cisalhante. Após uma série de velocidades crescentes, os dados são compilados a desenvolver uma relação entre a taxa de erosão e a velocidade de escoamento (e/ou tensão de cisalhamento).

A Figura 2.8 representa um aparato do tipo pistão.



Figura 2.8 – Aparato do tipo pistão.

Fonte: Adaptado de HEC-18/FHWA (2012).

2.5.2 Cilindros rotativos concêntricos

Os aparatos rotativos medem a taxa a qual os materiais geotécnicos erodem em função da tensão cisalhante aplicada pelo escoamento de água. Apenas os materiais autoportantes poderão ser ensaiados nesse tipo de aparato, como: argilas duras, arenitos, calcários e outros. Os materiais não coesivos, como areias e pedregulhos, não são adequados para esse experimento.

Uma amostra cilíndrica é retirada do campo e enviada ao laboratório onde é preparada para o ensaio. Um orifício com pequeno diâmetro é perfurado através do eixo da amostra e uma haste de suporte é inserida e ligada a uma célula que mede o torque aplicado. O anel entre a amostra de solo e o cilindro externo será preenchido com água e o cilindro externo gira a fim de criar uma tensão cisalhante. A tensão cisalhante aumenta de acordo que a velocidade de rotação do cilindro externo aumenta. A taxa de erosão é obtida através de uma relação entre as tensões cisalhantes aplicadas e a variação do peso da amostra ao longo do ensaio.

A Figura 2.9 representa o aparato com cilindros rotativos concêntricos.





Fonte: Adaptado de HEC-18/FHWA (2012).

2.5.3 Aparato em jato submerso

O aparato de jato submerso pode ser usado tanto em laboratório como em campo para avaliar a erodibilidade do solo ou rocha. O ensaio consiste na aplicação de um jato de água na superfície da amostra submersa, medindo a profundidade erodida ao longo do tempo de acordo com a vazão aplicada.

O equipamento é composto de três partes, um reservatório mantido com nível constante, um recipiente para envolver a amostra e mantê-la submersa com nível também constante e um dispositivo digital na ponta do aparato de propulsão para medir a profundidade da erosão ao longo do ensaio.

A taxa de erosão será obtida através da relação entre a velocidade de água imposta pelo jato e a profundidade erodida na amostra ao longo do ensaio. A tensão cisalhante aplicada na superfície da amostra é obtida indiretamente, utilizando a equação de Chèzy (HEC, 2012), relacionando a velocidade do jato e a profundidade erodida ao longo do tempo de ensaio.

A Figura 2.10 representa o aparato de jato d'água submerso.



Figura 2.10 – Aparato com jato d'água submerso.

Fonte: Adaptado de HEC-18/FHWA (2012).

2.5.4 Erosion Function Apparatus (EFA)

O Erosion Function Apparatus é um aparato do tipo pistão, desenvolvido e apresentado por Briaud (2001a) capaz de medir a taxa de erosão de solos coesivos e não coesivos sujeitos a diferentes velocidades de escoamento.

Sua principal finalidade é a obtenção da taxa de erosão de solos que compõem a fundação de pilares de pontes. Juntamente das modelagens computacionais (por exemplo, o método Sricos-EFA – CHEN, 2011) é possível calcular a profundidade dos sulcos de erosão ao redor dos pilares de pontes, permitindo concluir sobre a estabilidade da estrutura e possíveis intervenções necessárias.

Este equipamento também fora utilizado para estudar diversas barragens ao redor da cidade de Nova Orleans (EUA) após a tragédia do furação Katrina, em 2005. Devido a sua facilidade operacional, este equipamento permite que amostras coletadas em campo, através de amostradores ambientais e/ou *Shelby*, sejam levadas ao laboratório e ensaiadas para diferentes velocidades de fluxo. Os resultados geralmente são apresentados em forma gráfica, plotando-se a taxa de erosão calculada – de acordo com os tempos observados durante a execução do ensaio para se erodir na totalidade uma amostra com altura pré-determinada, h = 1,0mm – pela velocidade de escoamento e/ou tensão cisalhante empregada pelo fluxo.

De acordo com a teoria da erodibilidade e devido à forma da equação 2.25a, as correlações obtidas dos resultados experimentais são apresentadas na forma de equações do tipo potência, aspirando-se a obtenção dos parâmetros $\lambda_1 e \delta_1$.

Briaud (2001a, 2005, 2007 e 2008) constatou que as correlações entre as grandezas geotécnicas do material e a taxa de erosão de solos são baixas, resultando em pequenos coeficientes de determinação, R^2 (com três algarismos significativos).

Não obstante, sabe-se que diversas grandezas geotécnicas e hidráulicas interferem no processo erosivo (vide Quadro 2.1), como o índice de plasticidade do solo e a temperatura do fluído. Entretanto, devido à complexidade do processo erosivo dos solos, especialmente para os solos coesivos, as correlações obtidas estão à contramão do conhecimento vivenciado ao longo dos anos, instigando novos pesquisadores e pesquisas.

Briaud (2008) juntamente da circular HEC-18 (FHWA, 2012) sugerem uma classificação de solos e rochas quanto à erodibilidade tanto em função da velocidade média de escoamento, mas também entre a tensão de cisalhamento, com escalas diferentes em relação à erodibilidade.

Através desta classificação é possível verificar qual a classe que o solo pertence, sendo elas: erodibilidade muito alta (Classe I), alta (Classe II), média (Classe III), baixa (Classe IV), muito baixa (Classe V) e não erodível (Classe VI).

A Figura 2.11 apresenta um exemplo da classificação de solos utilizando a metodologia apresentada por Briaud (2008) e HEC-18 (FHWA, 2012).



Figura 2.11 – Classificação erosiva do solo de acordo com a tensão cisalhante.

Fonte: Briaud (2008).

No próximo capítulo será apresentada a metodologia utilizada para a obtenção da taxa de erosão do solo adotado, através do aparato de teste do tipo pistão desenvolvido por esta dissertação (inspirado pela EFA), juntamente com os ensaios geotécnicos realizados, seus resultados e discussões.

3 METODOLOGIA

Conforme descrito nos itens anteriores, diversas pesquisas apoiam-se no conceito da erodibilidade para a obtenção da taxa de erosão de um solo através de aparatos laboratoriais. Já outras, usam as equações tradicionais do transporte de sedimentos para descrever o deslocamento das partículas de solo.

Através da teoria da erodibilidade, este trabalho busca obter a taxa de erosão de um solo associada a uma velocidade média de escoamento, utilizando um aparato de teste, desenvolvido por esta pesquisa, capaz de medir a taxa de erosão do solo em função do tempo necessário para se erodir um volume de solo controlado.

Neste sentido, investigou-se o comportamento erosivo do solo para diferentes velocidades de fluxo – através de um aparato semelhante ao *Erosion Function Apparatus*, apresentado por Briaud (2001a) –, obtendo-se suas respectivas taxas de erosão, velocidade crítica e tensão cisalhante crítica.

Nos próximos itens deste capítulo, apresenta-se a caracterização geotécnica do solo utilizado e o aparato de teste de erosão desenvolvido ao longo da pesquisa.

3.1 Caracterização geotécnica do material utilizado

O material utilizado foi escolhido considerando as características argilo-arenosas por meio da análise táctil visual. Foram coletadas amostras na forma indeformada e amolgada, de acordo com as necessidades e exigências dos ensaios. O solo foi coletado no bairro de Laranjeiras, Serra, ES.

O solo na condição amolgada foi coletado por meio de pá e transportado para a Universidade Federal do Espírito Santo – UFES, onde foi armazenado em sacolas plásticas no interior do Laboratório de Geotecnia, para realização dos ensaios de caracterização.

O solo para o ensaio de erosão foi coletado por meio do sistema de extração *Slide Hammer System*, produzido pela empresa americana *Geoprobe[®]*, utilizando

amostradores ambientais do tipo *Liner* com diâmetro de 44 milímetros, produzidos pela empresa HS Hidrosuprimentos[®].

Para a avaliação geotécnica do comportamento do solo foi realizado ensaio de caracterização – granulometria completa (peneiramento e sedimentação), limites de Atterberg e massa específica real dos grãos – e o ensaio de cisalhamento direto. Os ensaios geotécnicos seguiram as recomendações das seguintes normas:

- NBR 6459 Determinação do Limite de Liquidez (ABNT, 1984a);
- NBR 6508 Grãos que passam na peneira de 4,8 mm; determinação da massa específica (ABNT, 1984b);
- NBR 7180 Determinação do Limite de Plasticidade (ABNT, 1984c);
- NBR 7181 Análise Granulométrica (ABNT, 1984d);
- ASTM D3080M Standard Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions (ASTM, 2012).

No item 3.1.1 apresentam-se os resultados da caracterização geotécnica do solo. No item 3.1.2 apresentam-se os resultados do ensaio de cisalhamento direto.

3.1.1 Ensaios de caracterização

A etapa de caracterização compreendeu os ensaios de massa específica real dos grãos, limites de Atterberg e granulometria completa. Todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Geotecnia – UFES, com equipamentos devidamente calibrados.

A amostra amolgada foi quarteada obtendo-se duas partes. Para cada uma das partes, repetiu-se o processo, obtendo-se quatro amostras. Estas por sua vez foram divididas em três subgrupos, totalizando 12 amostras com cerca de 6 kg cada. Foram nomeadas, como: 1-A, 1-B, 1-C; 2-A, 2-B, 2-C; 3-A, 3-B, 3-C e 4-A, 4-B e 4-C. No ensaio de massa específica dos grãos o valor da massa específica foi determinado 4 vezes, uma vez para cada grupo (1; 2; 3 e 4). O valor final foi determinado pela média dos valores medidos, resultando em massa específica de 2,697 g/cm³ ± 0,002 g/cm³.

Para os limites de Atterberg, os ensaios foram realizados com seis pontos para uma amostra dos subgrupos A, B e C e ensaios rápidos (com 2 pontos) para todas as outras amostras restantes. Foram realizadas 12 determinações. Os valores do limite de liquidez médios (LL) encontrados foram iguais a $43,7\% \pm 2,4\%$. Os valores de limite de plasticidade médios (LP) encontrados foram iguais a $20,9\% \pm 0,9\%$.

Através dos valores de LL e LP foi determinado o valor do Índice de Plasticidade (IP), sendo igual a 22,9% \pm 2,8% [IP = LL - LP].

A análise granulométrica foi realizada para uma amostra de cada um dos subgrupos A, B e C; escolhidos aleatoriamente. A Figura 3.1 apresenta as curvas granulométricas obtidas.





Utilizando o sistema unificado de classificação de solo (SUCS), o material foi classificado como uma areia argilosa SC, solo sedimentar com formação barreiras – sendo a fração argilosa superior a 34% em todos os casos. Foi calculado o índice de atividade das argilas, obtendo-se um valor médio igual a 0,7 \pm 0,1. O valor médio do diâmetro mediano dos grãos, d₅₀, é igual a 0,12mm.

A Tabela 3.1 apresenta os valores percentuais das faixas granulométricas de acordo com o Sistema Unificado de Classificação de Solo (SUCS) e a norma ASTM D-2487.

Pedregulho	Areia Grossa	Areia Média	Areia Fina	Finos
(60 – 4,75)mm	(4,75 – 2,0)mm	(2,0 – 0,425)mm	(0,425 – 0,075)mm	(0,075 <)mm
$0,0\% \pm 0,0\%$	0,7% ± 0,6%	21,6% ± 5,6%	32,7% ± 0,9%	44,9% ± 1,3%

Tabela 3.1 – Sistema Unificado de Classificação de Solo (SUCS).

3.1.2 Ensaios de cisalhamento direto

As amostras para o ensaio de cisalhamento direto foram diretamente moldadas nos anéis de cisalhamento em campo, seguindo as recomendações da norma ASTM D-3080M. A Figura 3.2 apresenta a coleta da amostra de solo em campo na condição indeformada, seguindo os procedimentos normativos.



Figura 3.2 - Coleta do material para o ensaio de cisalhamento direto.

Durante a realização do ensaio de cisalhamento direto, foram registrados os valores do deslocamento horizontal, tensão normal e tensão cisalhante. Foram utilizados quatro corpos de prova, submetidos ao ensaio de cisalhamento direto no laboratório de geotecnia, as tensões normais no início de cada ensaio foram de 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa e 300 kPa. Os resultados são apresentados na Figura 3.3.



Figura 3.3 - Gráfico da Tensão de Cisalhamento x Deslocamento.

Devido às curvas de tensão cisalhante não apresentarem picos de resistência bem definidos, a ruptura efetiva do material por cisalhamento deve ser analisada com maior atenção. Portanto, na tentativa de determinar a tensão de cisalhamento de ruptura, foram assumidas duas hipóteses:

- Na existência de um ponto de inflexão, seja por diminuição do ângulo da curva de cisalhamento ou por presença de um patamar de tensão quase constante, a tensão de ruptura será equivalente à tensão apresentada no ponto de inflexão;
- Não existindo ponto de inflexão: "Na ausência de pico de tensão bem definido, a ruptura ocorrerá quando a curva tensão-deslocamento atingir uma inclinação razoavelmente constante" (CAMPOS; CARRILLO, 1985).

A hipótese assumida por Campos e Carrillo (1985) busca estimar um ponto de inflexão na curva tensão-deslocamento da amostra cisalhada, e determina a tensão de ruptura como sendo o primeiro ponto da curva sobre o qual o ângulo de inclinação apresenta constância de valor.

Os resultados indicaram tensões cisalhantes de ruptura correspondentes a 43 kPa, 74 kPa, 143 kPa e 219 kPa. A esses resultados, ajustou-se a envoltória de ruptura de Mohr-Coulomb, como apresentado na Figura 3.4.



A partir desta envoltória, foram obtidos os parâmetros de resistência do solo com valores de coesão e ângulo de atrito, iguais a 0,6 kPa e 33,9°; respectivamente.

3.2 Aparato de teste de erodibilidade

Numa parceria entre a UFES, UFMG e o escritório TEC3 Geotecnia e Recursos Hídricos, foi desenvolvido no Centro de Pesquisas Hidráulicas (CPH/UFMG), um aparato para determinar a erodibilidade de um solo; com a coordenação dos professores Carlos Barreira Martinez, Aloysio Portugal Maia Saliba, Fernando Portugal Maia Saliba e Patrício José Moreira Pires.

Um primeiro aparato de teste foi desenvolvido com seção transversal retangular, constituído em aço e acrílico. Este aparato já se encontrava no CPH/UFMG. Entretanto, devido às pequenas velocidades de fluxo apresentadas, optou-se por desenvolver um segundo aparato, com maior seção transversal e maiores velocidades de fluxo.

O segundo e definitivo aparato de teste foi confeccionado em aço, com caixa de inspeção em acrílico. Consiste de um conjunto moto-bomba, com capacidade

máxima de até 78 m³/h, conectado por meio de mangote a um reservatório de fibra de vidro com capacidade de 500 litros; como apresentado na Figura 3.5.

A saída do mangote é conectada a um tubo com 101,6mm de diâmetro que foi ajustado de forma a efetuar a transição entre a seção tubular a uma seção retangular com 96mm de largura por 74mm de altura. A tubulação de transição tem 960mm de extensão, onde foram instaladas placas paralelas para provocar o alinhamento do fluxo previamente à zona de teste. A Figura 3.6 apresenta o detalhe.

Ao longo da tubulação retangular, foi confeccionada uma caixa de inspeção com paredes em acrílico para facilitar a inspeção visual. As suas dimensões são iguais a da tubulação retangular. A caixa de inspeção tem uma tampa superior removível, para facilitar a limpeza da área de ensaio. No centro desta caixa, foi aberta uma passagem com 45mm de diâmetro e instalada uma tubulação de PVC como guia para a amostra de solo. O ajuste entre o *liner* (amostra) e a tubulação guia se faz através do atrito lateral ao longo das suas áreas superficiais.

A estanqueidade do contato entre o tubo guia e o *liner* foi garantida por dois *o-rings* instalados ao longo do comprimento da tubulação guia. Para evitar a perda de água através da amostra de solo, dois *o-rings* foram instalados no pistão.

O sistema de ascensão da amostra foi realizado através de um pistão com parafuso com rosca sem fim, controlado através de uma manivela manual. Este sistema é fixado a um pórtico soldado às vigas metálicas da mesa de ensaio.

Inicialmente, o sistema contava com apenas uma bomba de alimentação, $Q_{0 máx} = 35,7 m^3/h$ e $V_{0 máx} = 1,24 m/s$. A vazão máxima alcançada não fora suficiente para atender as velocidades de fluxo exigidas. Portanto, foi necessária a instalação de mais duas bombas no sistema. Com três bombas trabalhando em série, obteve-se a vazão máxima igual $Q_{máx} = 78,0 m^3/h$ e a velocidade média de escoamento máxima igual $V_{máx} = 3,0 m/s$. As Figuras 3.5 e 3.6 apresentam o aparato desenvolvido.



Figura 3.5 – Vista lateral e em planta do aparato de teste definitivo.

Figura 3.6 – Detalhe da seção de teste do aparato definitivo.



3.2.1 Preparação das amostras para o ensaio de erosão

As amostras para o ensaio de erosão foram extraídas através do sistema *Slide Hammer System*, como mencionado no item 3.1, para cotas superficiais, após uma limpeza da superfície, como apresentado na Figura 3.7. Foram coletados 10 *lineres* com aproximadamente 60 cm de comprimento, nomeados de A até J.

A Figura 3.7 apresenta a extração das amostras de solo para o ensaio de erosão.



Figura 3.7 - Coleta do material para ensaio de erosão

Em laboratório, os amostradores foram cortados com serra flexível, totalizando 40 amostras com 15 cm de comprimento. Ademais, identificadas com índices de I a IV, representando o sentido da cravação dos amostradores no solo sendo que I para o topo, IV para o fundo e II e III para as profundidades intermediárias.

Para cada velocidade de fluxo adotada V = 0,3; 0,7; 1,2; 1,7 *e* 2,2 *m/s*, foram separadas aleatoriamente oito amostras com 15 cm de comprimento para a realização do ensaio de erosão no aparato de teste.

Foi observado que para as velocidades V = 0,3; 0,7 *e* 1,2 *m/s*, era possível utilizar amostras com comprimento inferiores aos 15 cm. Desta sorte, as amostras foram cortadas novamente com serra flexível, aumentando a amostragem.

Assim, foi possível racionar as amostras usadas nos ensaios para as velocidades supracitadas. Ainda, obteve-se um excedente que pode ser utilizado para as

velocidades superiores, donde houvera uma preocupação prévia quanto à perda de material, pois foi verificado que para a velocidade máxima alcançada pelo sistema, V = 3,0 m/s as amostras eram sugadas. Ademais, as amostras com 15 cm de comprimento também foram sugadas para velocidades V > 2,2 m/s, impossibilitando a execução do ensaio de erosão para estas velocidades [vide item 4.1.3].

Portanto, a velocidade V = 2,2 m/s foi a velocidade média de escoamento máxima adotada para a realização dos ensaios de erosão no aparato de teste.

3.2.2 Metodologia do ensaio de erosão

Os testes foram realizados conforme os passos a seguir:

- Retifica-se e acopla-se a amostra de solo no aparato de teste;
- Eleva-se a amostra com auxilio do pistão à referência de 1,0mm de altura préestabelecida com trena, manualmente;
- Ajusta-se a vazão necessária à obtenção da velocidade média de escoamento desejada, ajustando-se também as rotações das bombas por meio dos inversores de frequência;
- Através da inspeção visual, anota-se o tempo necessário para erodir a amostra em sua totalidade, para t < 60 min. Com t = 60 min, paralisa-se o ensaio de erosão para a velocidade de teste adotada.

3.2.3 Acoplamento e retificação da amostra

As amostras foram retificadas previamente com serra flexível e acopladas no aparato de teste. A retificação foi realizada para alcançar uma maior precisão quanto à altura da amostra a ser ensaiada (h = 1,0mm), facilitando sua inspeção visual durante o ensaio e garantindo a planicidade da superfície da amostra com o fundo da caixa de inspeção. A Figura 3.8 apresenta a retificação da amostra.



Figura 3.8 - Retificação da amostra de solo para ensaio de erosão.

Desta maneira, evitou-se o surgimento de obstáculos por desnível, ao qual implicaria a presença de outras variáveis responsáveis pelo processo de erosão da amostra que não apenas a tensão cisalhante empregada pelo escoamento.

O acoplamento da amostra no aparato foi realizado através do encaixe da amostra com uma tubulação de espera em PVC. A Figura 3.9 apresenta o detalhe do acoplamento da amostra com uso do tubo de espera.



Figura 3.9 – Acoplamento da amostra com uso do tubo de espera em PVC.

3.2.4 Elevação da amostra e nivelamento com a caixa de inspeção

A elevação da amostra se faz com uso do sistema pistão/parafuso com rosca sem fim. Com uso de uma trena, é gabaritada a altura de 1,0mm da amostra que ficará exposta ao fluxo. A figura 3.10 apresenta o detalhe da elevação da amostra e seu nivelamento. A Figura 3.11 apresenta a marcação da altura h = 1,0mm de ensaio.



Figura 3.10 – Ascensão e nivelamento da amostra com o fundo da caixa de inspeção.

Figura 3.11 - Gabarito da altura da amostra de solo para o ensaio de erosão.



3.2.5 Determinação da vazão e velocidade média de escoamento

Para a determinação da velocidade média de escoamento foram necessários alguns procedimentos preliminares. Primeiramente, foi instalado um medidor de vazão da empresa Incontrol[®], calibrado para medir vazões em m³/h. A Figura 3.12 apresenta o medidor de vazão utilizado um leitor digital.



Figura 3.12 – Leitor e medidor de vazões Incontrol[®].

O acionamento das bombas no sistema foi feito por meio de um inversor de frequência, apresentado na Figura 3.13. Este equipamento permitiu controlar a rotação dos motores das bombas e assim regular suas vazões de ensaio.



Figura 3.13 – Inversor de frequência e painéis de comandos digitais.

A Figura 3.14 apresenta a calibração das rotações das bombas e suas vazões observadas.





Conhecidas as dimensões da seção transversal e os valores das vazões observadas, foram calculadas as velocidades médias de escoamento.

A Figura 3.15 apresenta a calibração para as velocidades calculadas.



Figura 3.15 – Calibração das bombas (velocidade).

A Tabela 3.2 apresenta as velocidades adotadas para os ensaios de erosão e suas respectivas vazões observadas através do equipamento *Incontrol*[®].

$Q(m^{3}/h)$	V (m/s)	
8,91	0,3	
17,28	0,7	
30,10	1,2	
43,20	1,7	
57,60	2,2	

Tabela 3.2 - Vazões e velocidades utilizadas no ensaio de erosão.

3.2.6 Determinação da taxa de erosão

Anota-se o tempo necessário para erodir a altura da amostra de solo submetida a um fluxo com velocidade conhecida – uma inspeção visual é necessária para se garantir que a amostra de solo esteja erodida em sua totalidade –, a taxa de erosão será calculada através da razão entre a altura da amostra pelo tempo t em horas.

$$\dot{Z} = \frac{\partial z}{\partial t} = \frac{h}{t}$$
(3.1)

na qual,

 \dot{Z} é a taxa de erosão do solo para uma velocidade de teste (mm/h);

h é a altura da amostra de solo erodida [h = 1,0mm] (mm);

t é o tempo necessário para que ocorra a erosão total da amostra de solo (h).

Para as velocidades intermediárias, foi observado que devido à aleatoriedade das condições das amostras algumas apresentaram uma maior resistência ao

cisalhamento empregado pelo escoamento. Nestes casos, ocorreu o surgimento de um platô resistente a montante, como apresentado na Figura 3.16.





O obstáculo ao fluxo gerou vórtices que consequentemente aceleraram a erosão a jusante da amostra (vide item 4.1.2). Os platôs resistentes se mantiveram intactos, não erodíveis, para o tempo de ensaio, t = 60 min.

Entretanto, a jusante do platô resistente, para um intervalo t < 60 min, a erodibilidade do material foi muito grande, dificultando a execução do ensaio. A diretriz adotada no item 3.2.2 não pode ser atendida, inclusive, impossibilitando o uso da equação 3.1, pois a altura da amostra erodida a jusante do platô foi muito alta [$h \gg 1,0mm$], com o platô erodindo para um tempo $t \gg 60 \text{ min}$.

Desta forma, um critério auxiliar a metodologia do item 3.2.2 deste trabalho foi introduzido para os casos em que houve a formação dos platôs resistentes.

Importante destacar que para a maior velocidade adotada v = 2,2 m/s, não foi observada formação do platô resistente, pois acredita-se que ocorreu a prevalência da erosão de blocos de grãos, com as partículas de areia erodindo instantaneamente para essa velocidade de escoamento e com a fração fina, erodindo em blocos de grãos com uma alta taxa erosiva para esse material.

Portanto, para o caso da formação do platô resistente a montante, o ensaio de erosão irá se findar quando a condição complementar for atendida:

O tempo adotado será o tempo t necessário para se erodir a altura equivalente de h' = 1,5 mm em pelo menos 75% da seção transversal da amostra, respeitando o limite de t = 60 min (verificação visual).

Através das inspeções visuais, foi observado que o a área da seção transversal do platô resistente é igual, aproximadamente, a 25% da área da seção transversal da amostra. A altura equivalente adotada foi tal que o volume equivalente erodido (a jusante) é aproximadamente igual ao volume de solo erodido nos casos em que não houve o surgimento do fenômeno (erosão total da amostra). Ou seja:

$$v_{eq} = \frac{3}{4} (A \cdot h') = v_a = (A \cdot h) \Longrightarrow \boxed{h' \approx 1.5 \cdot h}$$
(3.2)

na qual,

 $v_{eq}e v_a$ é o volume equivalente e o volume da amostra erodida (m³);

A é a área da seção transversal da amostra (m²);

h e h' é a altura da amostra e a altura equivalente (m).

3.2.7 Planejamento Operacional Padrão (POP)

Para facilitar a replicação do ensaio de erosão utilizando o aparato desenvolvido pelo CPH – UFMG é apresentado um planejamento operacional padrão.

A seguir, notam-se as diretrizes para a execução do ensaio de erosão no aparato de teste do tipo pistão desenvolvidas por essa pesquisa.

Procedimentos preliminares:

- Instalação e calibração do medidor de vazão;
- Iluminação da caixa de inspeção;
- Retificação da superfície das amostras;
- Definição das velocidades adotadas para ensaio;

- Lubrificar a tubulação guia;
- Encher o reservatório com água (procedimento diário).

Procedimentos de ensaio:

- Acoplar amostra devidamente retificada e gabaritada (h = 1,0mm);
- Elevar a amostra de solo através do pistão até a cota adequada;
- Ligar inversores de frequência e leitor de vazão;
- Abrir os registros de alimentação (tanque e bombas);
- Através dos painéis dos inversores de frequência, digitar a rotação necessária para a primeira velocidade de ensaio;
- Disparar o cronômetro;
- Anotar o tempo t necessário para a ocorrência da erosão, respeitando os critérios de ensaio;
- Através dos painéis dos inversores de frequência, diminuir gradativamente as rotações impostas ($RPM \ge 1000$) simultaneamente, desligar os inversores;
- Cessado o fluxo nas tubulações, abaixar o pistão e retirar a amostra de solo.

Obs.: A água utilizada no ensaio deve estar límpida. Verificando-se o aumento da turbidez da água ao longo dos ensaios o reservatório deverá ser esvaziado, limpo e reabastecido. Este procedimento deve ser feito diariamente.

3.2.8 Determinação da tensão de cisalhamento

A determinação da tensão de cisalhamento será feita através da equação 2.8.

$$\tau_0 = \frac{1}{8} \cdot f \cdot \rho_m \cdot V^2 \tag{2.8}$$

na qual,

 τ_0 é a tensão de cisalhamento;

f é o coeficiente de atrito de Darcy;

 ρ_m é a densidade do fluído;

V é a velocidade média de escoamento.

A Tabela 3.3 apresenta os valores das velocidades médias de escoamento adotadas, suas tensões cisalhantes calculadas, utilizando a equação 2.8; o número de Reynolds calculado, utilizando a equação 2.14 com seção transversal de altura a = 74mm e largura b = 96mm. O fator de atrito de Darcy *f* foi obtido de forma gráfica, através do ábaco de Moody, com rugosidade relativa calculada, utilizando a equação 2.17 com o diâmetro dos grãos igual a $d_{50} = 0,125mm$.

 Tabela 3.3 – Características do escoamento para as velocidades adotadas.

V (m/s)	R _e	f	$\tau (N/m^2)$
0,3	2,51 x 10⁴	0,0265	0,30
0,7	5,85 x 10 ⁴	0,0225	1,38
1,2	1,00 x 10 ⁵	0,0210	3,78
1,7	1,42 x 10 ⁵	0,0205	7,41
2,2	1,84 x 10 ⁵	0,0200	12,10

Nota: ${}^{\mathcal{E}}/{}_{D} = 7,4782 \cdot 10^{-4}$; $\rho_m = 1.000 \ kg/m^3 \ e \ v = 10^{-6} \ m^2/s$ (para 20°C).

No próximo capítulo, serão apresentados os resultados dos ensaios de erosão e suas discussões. O cálculo da velocidade crítica e da tensão cisalhante crítica e suas discussões. E também os fenômenos inesperados observados durante a execução dos ensaios de erosão no aparato de teste.
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Utilizando o aparato desenvolvido pelo CPH – UFMG e parceiros, foram realizados testes de erosão no solo adotado, este caracterizado como uma areia-argilosa com grande quantidade de finos e moderada plasticidade; com o objetivo de obter a taxa de erosão do solo em função do tempo necessário para se findar o ensaio, $t \leq 60 min$.

Como comentado no item 3.2.1 os ensaios foram ordenados para que pelo menos duas amostras de topo (I) e duas amostras de fundo (IV) fossem ensaiadas para cada uma das cinco velocidades médias de escoamento adotadas, pois num primeiro momento, o escopo deste trabalho contemplava avaliar o comportamento erosivo do solo em função da profundidade de extração.

O Quadro 4.1 apresentada a lógica amostral dos ensaios de erosão.

A	Bı	Cı	Di	Eı	Fı	Gı	Hı	I _I	Jı
A _{II}	B _{II}	C _{II}	D _{II}	E	F _{II}	G _{II}	H _{II}	Ι _{II}	J _{II}
A _{III}	B _{III}	C _{III}	D _{III}	E	F _{III}	G _{III}	H	I	J _{III}
A _{IV}	B _{IV}	C _{IV}	D _{IV}	E _{IV}	F _{IV}	G _{IV}	H _{IV}	I _{IV}	J _{IV}
0,3	m/s	0,7 r	n/s	1,2 m	n/s	1,7 m	/s	2,2 1	m/s

Quadro 4.1 – Amostras para o ensaio de erosão com sua respectiva velocidade de ensaio.

Entretanto, durante a primeira fase de execução dos ensaios (4 ensaios realizados para cada uma das cinco velocidades adotadas) verificou-se uma aleatoriedade nos procedimentos e assim, algumas adaptações foram tomadas de acordo com as necessidades laboratoriais identificadas.

Ora, para as velocidades médias de escoamento V = 0,3; 0,7 e 1,2 m/s, foi possível recorrer ao artificio da divisão das amostras de 15 cm de comprimento para menores comprimentos, pois as pequenas amostras não foram suscetíveis ao efeito da sucção, como ocorreu para as maiores velocidades (V > 2,2 m/s). Desta sorte, as amostras A_{IV}, F_I, G_I, G_{II}, H_I, H_{II}, H_{II}, I_{II}, I_{IV}, J_{III} e J_{IV} foram utilizadas para outras

velocidades de escoamento, diferentemente do que é destacada no ordenamento apresentado no Quadro 4.1.

As Tabelas 4.1 e 4.2 apresentam os resultados obtidos dos ensaios de erosão, agrupados segundo as velocidades de teste, identificando os tempos necessários para o término do ensaio, respeitando as diretrizes expostas no item 3.2.2 e 3.2.6.

A taxa de erosão \dot{Z} é calculada utilizando a equação 3.1.

Velocidade (m/s)	0,3				0,7		1,2			
Teste	t (min)	t (h)	Ż (mm/h)	t (min)	t (h)	Ż (mm/h)	t (min)	t (h)	Ż (mm/h)	
1	>60	>1	-	49	0,82	1,22	39	0,65	1,54	
2	>60	>1	-	54	0,90	1,11	24	0,40	2,50	
3	>60	>1	-	47	0,78	1,28	35	0,58	1,71	
4	>60	>1	-	55	0,92	1,09	29	0,48	2,07	
5	>60	>1	-	53	0,88	1,13	34	0,57	1,76	
6	>60	>1	-	52	0,87	1,15	33	0,55	1,82	
7	>60	>1	-	53	0,88	1,13	30	0,50	2,00	
8	>60	>1	-	58	0,97	1,03	27	0,45	2,22	

Tabela 4.1 – Resultados dos ensaios de erosão no aparato de teste.

Tabela 4.2 – Resultados dos ensaios de erosão no aparato de teste (continuação).

Velocidade (m/s)		1,7			2,2	
Teste	t (min)	t (h)	Ż (mm/h)	t (min)	t (h)	Ż (mm/h)
1	15	0,25	4,00	6	0,10	10,00
2	17	0,28	3,53	4	0,07	15,00
3	12	0,20	5,00	7	0,12	8,57
4	11	0,18	5,45	11	0,18	5,45
5	14	0,23	4,29	7	0,12	8,57
6	15	0,25	4,00	6	0,10	10,00
7	12	0,20	5,00	4	0,07	15,00
8	13	0,22	4,62	9	0,15	6,67

A seguir, apresentam-se os gráficos com os tempos necessários para se findar os ensaios de erosão, identificando suas respectivas dispersões e realizando seu

estudo estatístico. Ademais, também serão apresentados os gráficos que relacionam a taxa de erosão \dot{Z} com as velocidades médias de escoamento adotadas, identificando suas respectivas dispersões e realizando seu estudo estatístico.

A Figura 4.1 apresenta os valores dos tempos de ensaio obtidos para cada uma das velocidades médias de escoamento adotadas, identificando suas dispersões observadas para uma mesma velocidade de teste.



Figura 4.1 – Tempos obtidos para as velocidades médias de escoamento adotadas.

As maiores dispersões ocorreram para as menores velocidades de escoamento, $V = 0.7 \ e \ 1.2 \ m/s$ – fato que se confirmou após o estudo estatístico. Notar que não serão apresentados os gráficos para a velocidade $V = 0.3 \ m/s$, pois em todos os oito testes realizados as amostras não erodiram em sua totalidade para $t \le 60 \ min$, entretanto observou-se o surgimento de trincas, ocasionando a erosão de blocos de grãos para algumas amostras ensaiadas.

As dispersões para cada velocidade média de escoamento adotada são apresentadas individualmente pelas Figuras 4.2; 4.3; 4.4 e 4.5.

A Figura 4.2 apresenta os tempos t obtidos para a velocidade V = 0.7 m/s.



Figura 4.2 – Tempos obtidos para a velocidade média de escoamento V = 0,7 m/s.

Da Figura 4.2 constam os valores dos tempos observados para a velocidade média de escoamento, V = 0.7 m/s. Destaca-se o $t_{máx} = 58 min$ e o $t_{min} = 47 min$. Obteve-se o valor médio dos tempos e seu desvio padrão, sendo igual a $t_{méd} = 53 min \pm 3 min$, respectivamente, como detalhado no Quadro 4.2.

	E	statística do	o tempo	t(min) par	a V = (),7 m/s		
Ensaio	$x_i = t_{amostral}$	$x = t_{m\acute{e}d}$	$x_i - x$	$(x_i - x)^2$	n-1	$\sum (x_i - x)^2$	$\sum (x_i - x)^2/n - 1$	S
	49		-3,63	13,14		81,88		
	54		1,38	1,89	7,0			
	47	53 -	-5,63	31,64				
V = 0.7 m/c	55		2,38	5,64			11 70	2
v = 0,7 m/s	53		0,38	0,14			11,70	3
	52		-0,63	0,39				
	53		0,38	0,14				
	58		5,38	28,89				

Quadro 4.2 – Cálculo da média e do desvio padrão dos tempos para V = 0,7 m/s.

A Figura 4.3 apresenta os tempos t obtidos para a velocidade V = 1,2 m/s.



Figura 4.3 – Tempos obtidos para a velocidade média de escoamento V = 1,2 m/s.

Da Figura 4.3 constam os valores dos tempos observados para a velocidade média de escoamento, V = 1,2 m/s. Destaca-se o $t_{max} = 39 min$ e o $t_{min} = 24 min$. Obteve-se o valor médio dos tempos e seu desvio padrão, sendo igual a $t_{méd} = 31 min \pm 5 min$, respectivamente, como apresentado no Quadro 4.3.

		Estatística	do tempo	o t(min) pa	ra V =	1,2 m/s		
Ensaio	$x_i = t_{amostral}$	$x = t_{m\acute{e}d}$	$x_i - x$	$(x_i - x)^2$	n-1	$\sum (x_i - x)^2$	$\sum (x_i - x)^2/n - 1$	S
	39		7,63	58,14				
	24		-7,38	54,39		161,88		
	35		3,63	13,14			23,13	
V = 1.2 m/c	29		-2,38	5,64	7			5
v = 1,2 m/s	34		2,63	6,89				5
	33		1,63	2,64				
-	30		-1,38	1,89				
	27		-4,38	19,14				

Quadro 4.3 – Cálculo da média e do desvio padrão dos tempos para V = 1,2 m/s.

A Figura 4.4 apresenta os tempos t obtidos para a velocidade V = 1,7 m/s.



Figura 4.4 – Tempos obtidos para a velocidade média de escoamento V = 1,7 m/s.

Da Figura 4.4 constam os valores dos tempos observados para a velocidade média de escoamento, V = 1,7 m/s. Destaca-se o $t_{max} = 17 min$ e o $t_{min} = 11 min$. Obteve-se o valor médio dos tempos e seu desvio padrão, sendo igual a $t_{méd} = 14 min \pm 2 min$, respectivamente, como apresentado no Quadro 4.4.

	E	statística de	o tempo	t(min) par	a V = 1	,7 m/s		
Ensaio	$x_i = t_{amostral}$	$x = t_{m\acute{e}d}$	$x_i - x$	$(x_i - x)^2$	n-1	$\sum (x_i - x)^2$	$\sum (x_i - x)^2/n - 1$	S
	15		1,38	1,89				
	17	14 -	3,38	11,39	7	27,88		
	12		-1,63	2,64				
M = 1.7 m/c	11		-2,63	6,89			2.09	2
v = 1,7 m/s	14		0,38	0,14			3,90	2
	15		1,38	1,89				
-	12		-1,63	2,64				
	13	1	-0,63	0,39				

Quadro 4.4 – Cálculo da média e do desvio padrão dos tempos para V = 1,7 m/s.

A Figura 4.5 apresenta os tempos t obtidos para a velocidade V = 2,2 m/s.



Figura 4.5 – Tempos obtidos para a velocidade média de escoamento V = 2,2 m/s.

Da Figura 4.5 constam os valores dos tempos observados para a velocidade média de escoamento, V = 2,2 m/s. Destaca-se o $t_{máx} = 11 min$ e o $t_{min} = 4 min$. Obteve-se o valor médio dos tempos e seu desvio padrão, sendo igual a $t_{méd} = 7,0 min \pm 2 min$, respectivamente, como apresentado no Quadro 4.5.

	E	statística de	o tempo	t(min) par	a V = 2	2,2 m/s		
Ensaio	$x_i = t_{amostral}$	$x = t_{m\acute{e}d}$	$x_i - x$	$(x_i - x)^2$	n-1	$\sum (x_i - x)^2$	$\sum (x_i - x)^2/n - 1$	S
	6,00		-0,75	0,56		39,50		
	4,00		-2,75	7,56	7			
	7,00	-	0,25	0,06				
$\mathcal{M} = 2.2 \mathrm{m/s}$	11,00		4,25	18,06			5.64	2
v = 2,2 m/s	7,00		0,25	0,06			5,04	2
	6,00		-0,75	0,56				
	4,00		-2,75	7,56				
	9,00	1	2,25	5,06	1			

Quadro 4.5 – Cálculo da média e do desvio padrão dos tempos para V = 2,2 m/s.

A Figura 4.6 apresenta os tempos médios obtidos e seus respectivos desvios padrão para as velocidades médias de escoamento adotadas (destacar que para V = 0,3 m/s as amostras não erodiram em sua totalidade com $t \le 60 min$). Nota-se que o tempo de ensaio *t* diminuiu em sua metade, aproximadamente, de acordo com incrementos $\Delta V = 0.5 m/s$ na velocidade média de escoamento.



Figura 4.6 – Tempo médio observado para as velocidades médias adotadas.

A Tabela 4.3 apresenta os valores dos tempos médios obtidos para o ensaio de erosão, seus desvios padrão, identificando as vazões de ensaio, as velocidades médias de escoamento e suas respectivas tensões cisalhantes calculadas.

$Q(m^3/h)$	V (m/s)	$\tau (N/m^2)$	t (min)
8,91	0,3	0,30	>60
17,28	0,7	1,38	53 ± 3
30,10	1,2	3,78	31 ± 5
43,20	1,7	7,41	14 ± 2
57,60	2,2	12,10	7 ± 2

Tabela 4.3 - Valores dos tempos médios obtidos e características do escoamento.

Obtidos os tempos t do ensaio, a taxa de erosão \dot{Z} será calculada através da equação 3.1 com o tempo em horas. A Figura 4.7 apresenta os valores das taxas de

erosão calculadas para os tempos obtidos durante os ensaios, identificando suas respectivas dispersões observadas para uma mesma velocidade de teste.



Figura 4.7 – Taxa de erosão e suas dispersões para cada velocidade de teste.

Diferentemente do que ocorreram para a análise das dispersões dos tempos t de ensaio (valores absolutos), as maiores dispersões dos valores da taxa de erosão \dot{Z} calculada, ocorreram para as maiores velocidades médias de escoamento.

Nota-se que pequenos incrementos no tempo *t* de ensaio, correspondem a grandes variações da taxa de erosão, \dot{Z} . Por exemplo, para uma velocidade V = 2,2 m/s e um tempo de ensaio t = 4 min = 0,067 h (suficiente para se erodir a amostra na totalidade), sua taxa de erosão correspondente será igual a $\dot{Z} = 15,0 mm/h$. Já para um tempo de ensaio t = 6 min = 0,1 h, sua taxa de erosão correspondente será igual a $\dot{Z} = 10 mm/h$.

Ou seja, para uma variação do tempo $\Delta t = 50\%$ houve uma variação da taxa de erosão $\Delta \dot{Z} = 50\%$ calculada, respeitando a relação inversamente proporcional das grandezas como apresentado pela equação 3.1.

Portanto, mais importante do que analisar a dispersão dos tempos em termos absolutos, é interessante analisar a dispersão dos tempos de forma percentual.

Assim, para a velocidade média de escoamento V = 2,2 m/s observou-se a maior variação percentual dos tempos *t* obtidos, sendo $\Delta t_{v=2,2} \approx 175\%$, correspondendo a $\Delta \dot{Z}_{v=2,2} \approx 175\%$, diferentemente do que ocorreu para a velocidade média de escoamento $V = 0,7 m/s \operatorname{com} \Delta t_{v=0,7} \approx 25\%$ e $\Delta \dot{Z}_{v=0,7} \approx 25\%$.

Ora, a variabilidade da taxa de erosão devido ao incremento das velocidades de escoamento se explica através do comportamento erosivo diverso da composição dos materiais existentes no solo. Para altas velocidades, o material grosso erode em sua totalidade, instantaneamente, e o material fino erode de forma de blocos de grãos, acelerando o processo erosivo. A forma convexa do gráfico apresentado pela Figura 4.7, explicita a erosão de blocos de grãos, como relatado por Briaud (2001a).

Ademais, foram analisadas as dispersões dos valores das taxas de erosão separadamente para cada uma das velocidades de ensaio. Não serão apresentados os gráficos para a V = 0.3 m/s, pois em todos os ensaios realizados não foi possível alcançar a erosão total da amostra para $t \le 60 min$.

A Figura 4.8 apresenta o gráfico da erodibilidade Z calculada, de acordo com os tempos *t* de ensaio para a velocidade média de escoamento V = 0.7 m/s.



Figura 4.8 – Taxas de erosão obtidas para a velocidade média de escoamento V = 0,7 m/s.

Da Figura 4.8 constam os valores das taxas de erosão calculadas para a velocidade média de escoamento, V = 0.7 m/s. Destaca-se o $\dot{Z}_{max} = 1.28 mm/h$ e o $\dot{Z}_{min} = 1.03 mm/h$. Obteve-se o valor médio das taxas de erosão calculas e seu respectivo desvio padrão, sendo igual a $\dot{Z}_{méd} = 1.1 mm/h \pm 0.1 mm/h$, respectivamente, como apresentado no Quadro 4.6.

	Estatística da taxa de erosão $Z(mm/h)$ para $V = 0,7 m/s$											
Ensaio	$x_i = \dot{Z}_{amostral}$	$x = \dot{Z}_{m\acute{e}d}$	$x_i - x$	$(x_i - x)^2$	n-1	$\sum (x_i - x)^2$	$\sum (x_i - x)^2/n - 1$	S				
	1,22		0,08	0,01		0,04						
	1,11	1,1	-0,03	0,00	-							
	1,28		0,13	0,02			0,01	0,1				
$\lambda = 0.7 m/s$	1,09		-0,05	0,00								
v = 0,7 m/s	1,13		-0,01	0,00	/							
	1,15		0,01	0,00								
	1,13		-0,01	0,00								
-	1,03		-0,11	0,01								

Quadro 4.6 – Cálculo da média e desvio padrão das taxas de erosão para V = 0,7 m/s.

A Figura 4.9 apresenta o gráfico da erodibilidade \dot{Z} calculada, de acordo com os tempos *t* de ensaio para a velocidade média de escoamento V = 1,2 m/s.

Figura 4.9 – Taxas de erosão obtidas para a velocidade média de escoamento V = 1,2 m/s.



Da Figura 4.9 constam os valores das taxas de erosão calculadas para a velocidade média de escoamento, V = 1,2 m/s. Destaca-se o $\dot{Z}_{máx} = 2,50 mm/h$ e o $\dot{Z}_{min} = 1,54 mm/h$. Obteve-se o valor médio das taxas de erosão calculadas e seu respectivo desvio padrão, sendo igual a $\dot{Z}_{méd} = 2,0 mm/h \pm 0,3 mm/h$, respectivamente, como apresentado no Quadro 4.7.

	Estatística da taxa de erosão \dot{Z} (mm/h) para $V = 1,2$ m/s												
Ensaio	$x_i = \dot{Z}_{amostral}$	$x = \dot{Z}_{m\acute{e}d}$	$x_i - x$	$(x_i - x)^2$	n-1	$\sum (x_i - x)^2$	$\sum (x_i - x)^2/n - 1$	S					
	1,54		-0,41	0,17	-	0,67							
	2,50	2,0	0,55	0,30									
	1,71		-0,24	0,06			0,10	0,3					
1/10 m/s	2,07		0,12	0,01									
v = 1,2 m/s	1,76		-0,19	0,04									
-	1,82		-0,14	0,02									
	2,00		0,05	0,00									
	2,22		0,27	0,07									

Quadro 4.7 – Cálculo da média e desvio padrão das taxas de erosão para V = 1,2 m/s.

A Figura 4.10 apresenta o gráfico da erodibilidade \dot{Z} calculada, de acordo com os tempos t de ensaio para a velocidade média de escoamento V = 1,7 m/s.

Figura 4.10 – Taxas de erosão obtidas para a velocidade média de escoamento V = 1,7 m/s.



Da Figura 4.10 constam os valores das taxas de erosão calculadas para a velocidade média de escoamento, V = 1,7 m/s. Destaca-se o $\dot{Z}_{máx} = 5,45 mm/h$ e o $\dot{Z}_{mín} = 3,53 mm/h$. Obteve-se o valor médio das taxas de erosão calculadas e seu respectivo desvio padrão, sendo igual a $\dot{Z}_{méd} = 4,5 mm/h \pm 0,6 mm/h$, respectivamente, como apresentado no Quadro 4.8.

	Estatística da taxa de erosão $Z(mm/h)$ para $V = 1,7 m/s$											
Ensaio	$x_i = \dot{Z}_{amostral}$	$x = \dot{Z}_{m\acute{e}d}$	$x_i - x$	$(x_i - x)^2$	n-1	$\sum (x_i - x)^2$	$\sum (x_i - x)^2/n - 1$	S				
	4,00		-0,49	0,24	-	2,91						
	3,53	4,5	-0,96	0,91								
	5,00		0,51	0,26			0,42	0,6				
	5,45		0,97	0,94								
v = 1,7 11/5	4,29		-0,20	0,04	/							
	4,00		-0,49	0,24								
-	5,00		0,51	0,26								
	4,62		0,13	0,02								

Quadro 4.8 – Cálculo da média e desvio padrão das taxas de erosão para V = 1,7 m/s.

A Figura 4.11 apresenta o gráfico da erodibilidade \dot{Z} calculada, de acordo com os tempos *t* de ensaio para a velocidade média de escoamento V = 2,2 m/s.

Figura 4.11 – Taxas de erosão obtidas para a velocidade média de escoamento V = 2,2 m/s.



Da Figura 4.11 constam os valores das taxas de erosão calculadas para a velocidade média de escoamento, V = 2,2 m/s. Destaca-se o $\dot{Z}_{máx} = 15,0 mm/h$ e o $\dot{Z}_{mín} = 5,45 mm/h$. Obteve-se o valor médio das taxas de erosão calculadas e seu respectivo desvio padrão, sendo igual a $\dot{Z}_{méd} = 9,9 mm/h \pm 3,5 mm/h$, respectivamente, como apresentado no Quadro 4.9.

	Estatística da taxa de erosão \dot{Z} (mm/h) para V = 2,2 m/s												
Ensaio	$x_i = \dot{Z}_{amostral}$	$x = \dot{Z}_{m\acute{e}d}$	$x_i - x$	$(x_i - x)^2$	n-1	$\sum (x_i - x)^2$	$\sum (x_i - x)^2/n - 1$	S					
	10,00	9,9	0,09	0,01		85,79							
	15,00		5,09	25,93									
	8,57		-1,34	1,79			12,26	3,5					
	5,45		-4,45	19,83									
v = 2,2 m/s	8,57		-1,34	1,79									
	10,00		0,09	0,01									
	15,00		5,09	25,93									
	6,67		-3,24	10,51									

Quadro 4.9 – Cálculo da média e desvio padrão das taxas de erosão para V = 2,2 m/s.

Na Figura 4.12 constam as taxas de erosão médias calculadas e seus respectivos desvios padrão para cada uma das velocidades médias de escoamento adotadas.

Figura 4.12 – Taxa de erosão média e desvio padrão para as velocidades adotadas.



Como comentado anteriormente, a maior dispersão da taxa de erosão ocorreu para a maior velocidade média de escoamento adotada. O desvio padrão calculado para a velocidade V = 2,2 m/s (vide Quadro 4.9) é igual a 3,5 mm/h, correspondendo a 35% do valor da média. Ora, um valor bastante elevado.

Ademais, a variabilidade dos resultados pode estar associada às características geotécnicas do solo, a aleatoriedade do próprio processo erosivo, do equipamento utilizado, das características do fluído como sua temperatura, até devido a algum erro operacional durante a realização do ensaio, pois os tempos foram obtidos através de inspeções visuais, procedimento subjetivo e passível a erros.

A Tabela 4.4 apresenta os valores das taxas de erosão médias calculadas, seus desvios padrão, destacando-se os tempos médios de ensaio, as vazões do sistema, as velocidades médias de escoamento e suas respectivas tensões cisalhantes.

$Q(m^3/h)$	V(m/s)	$\tau (N/m^2)$	t (min)	Ż(mm/h)
8,91	0,3	0,30	>60	$0,0 \pm 0,0$
17,28	0,7	1,38	53 ± 3	1,1 ± 0,1
30,10	1,2	3,78	31 ± 5	$2,0 \pm 0,3$
43,20	1,7	7,41	14 ± 2	$4,5 \pm 0,6$
57,60	2,2	12,10	7 ± 2	$9,9 \pm 3,5$

Tabela 4.4 – Valores das taxas de erosão médias calculadas e características do ensaio.

A Figura 4.13 apresenta um gráfico com as taxas de erosão calculadas (em função dos tempos *t* observados) para cada velocidade média de escoamento adotada, *V*. A estes resultados ajustou-se uma equação do tipo potência, motivada pela forma da função erodibilidade apresentada na equação 2.25a.

Atentar que os resultados para a velocidade média de escoamento V = 0.3 m/s não são apresentados, pois a amostra não foi erodida em sua totalidade para o tempo limite de ensaio $t \le 60 min$. Ademais, o eixo das ordenadas começa em 1,0 (um) devido às condições de contorno do ensaio, ou seja, pelo menos $\dot{Z} = 1.0 mm/h$.



Figura 4.13 – Correlação entre a taxa de erosão do solo e a velocidade média de escoamento.

A equação 4.1 será válida apenas para $V \ge V_{crit}$. Experimentalmente, tem-se:

$$\dot{Z} = 1,8432.\,V^{1,814} \tag{4.1}$$

na qual,

 \dot{Z} é a taxa de erosão do solo (mm/h);

V é a velocidade média de escoamento (m/s).

Analisando os valores calculados através da equação 4.1 e os valores obtidos do ensaio de erosão (equação 3.1), pode-se mensurar o erro da modelagem apresentada. Atentar que a equação 3.1 descreve a taxa de erosão do solo em função do tempo de ensaio observado, $\dot{Z} = f(t)$, obtida de forma experimental com dispersão numérica identificada. Desta sorte, utilizar-se-á o valor médio da taxa de erosão calculada pela equação 3.1 para cada uma das velocidades médias de escoamento adotadas, comparando os resultados entre ambas as equações.

A Tabela 4.5 apresenta os valores calculados da taxa de erosão utilizando ambas as equações 3.1 e 4.1. O erro associado ao cálculo também é apresentado.

V	$\dot{Z} = h/t$	$\dot{Z} = 1,8432.V^{1,814}$	е	е
(<i>m</i> / <i>s</i>)	(mm/h)	(mm/h)	(mm/h)	(%)
0,7	1,1	0,97	0,13	12,3
1,2	2,0	2,57	0,57	28,3
1,7	4,5	4,83	0,33	7,2
2,2	9,9	7,70	2,20	22,2

Tabela 4.5 – Resultados das taxas de erosão calculadas utilizando as equações 3.1 e 4.1.

Os valores obtidos através da equação 4.1 foram satisfatórios para as maiores velocidade de escoamento. O erro médio é igual, aproximadamente, a 17%. O maior erro constatado, igual a 28%, ocorreu para a velocidade média de escoamento V = 1,2 m/s, na qual o valor calculado pela equação 4.1 é igual a $\dot{Z}_{Eq.(4.1)} = 2,57 mm/h$ e o valor calculado pela equação 3.1 é igual a $\dot{Z}_{Eq.(3.1)} = 2,0 mm/h$.

Notem que o desvio padrão obtido para a taxa de erosão com velocidade média de escoamento V = 1,2 m/s é igual a $\sigma = 0,3 (mm/h)$ (vide Tabela 4.4). Portanto, para esta velocidade de escoamento, o valor obtido através da equação 4.1 está ligeiramente fora do intervalo imposto pelo desvio padrão supracitado.

Não obstante, para as velocidades médias de escoamento V = 0,7; 1,7 *e* 2,2 *m/s*, os valores obtidos das taxas de erosão \dot{Z} , através da equação 4.1, estão dentro dos intervalos impostos por seus desvios padrão, sendo iguais a $\sigma = 0,1$; 0,6 *e* 3,5 (*mm/h*), respectivamente.

Briaud (2001a) através de estudo similar obteve valores com erros médios aproximados de 10%. Desta sorte, devido ao atual estágio de desenvolvimento do aparato de teste, os resultados obtidos através da modelagem proposta estão muito próximos dos resultados obtidos experimentalmente em termos absolutos e, razoavelmente próximos, em termos percentuais, para as maiores velocidades.

Ademais, a equação 4.1 pode ser utilizada como uma importante ferramenta para realizar a previsão do comportamento erosivo do solo estudado sujeito a grandes velocidades de fluxo – difíceis de replicar em laboratório –, como é o caso do processo de galgamento das barragens de solo na presença de um grande fluxo

sobre o talude de jusante, donde poderá se iniciar o processo de erosão e consequentemente a formação da brecha.

A Figura 4.14 apresenta a comparação em forma gráfica, dos resultados da erodibilidade do solo calculados pelas equações 3.1 e 4.1, em termos absolutos.





Briaud (2008) afirma que além de analisar a erodibilidade através dos valores das velocidades médias de escoamento, a análise da erodibilidade através da tensão cisalhante empregada pelo fluxo também é muito importante, pois a classificação erosiva do solo feita apenas utilizando as velocidades médias de escoamento poderá apresentar erros.

Assim, a Figura 4.15 apresenta o gráfico da erodibilidade versus a tensão cisalhante empregada pelo fluxo para as diferentes velocidades médias de escoamento. Os valores da taxa de erosão foram calculados utilizando a equação 3.1 e os valores das tensões cisalhantes foram calculados utilizando a equação 2.8.

Através dos resultados obtidos, uma equação potência é proposta para obtenção da taxa de erosão do solo em função da tensão cisalhante empregada pelo fluxo, motivada pela forma da função 2.25a.



Figura 4.15 – Correlação entre a taxa de erosão do solo e a tensão cisalhante.

A equação 4.2 será válida somente para $\tau \ge \tau_{crit}$. Experimentalmente, tem-se:

$$\dot{Z} = 0.711, \tau^{0.9575} \tag{4.2}$$

na qual,

 \dot{Z} é a taxa de erosão do solo (mm/h);

 τ é a tensão cisalhante empregada pelo fluxo (N/m²)

Comparando os resultados obtidos através da equação 4.2 com os resultados calculados utilizando a equação 2.8, pode-se mensurar o erro da modelagem apresentada. Atentar que a equação 2.8 é dependente das características da tubulação utilizada (como o fator de atrito de Darcy) e do escoamento (ρ_m).

A Tabela 4.6 apresenta os valores calculados da taxa de erosão utilizando as equações 3.1 e 4.2. O erro associado ao cálculo também é apresentado.

V	τ	$\dot{Z} = h/t$	$\dot{Z} = 0,711. \tau^{0,9575}$	е	е	
(<i>m</i> / <i>s</i>)	(N/m^2)	(mm/h)	(mm/h)	(mm/h)	(%)	
0,7	1,38	1,1	0,97	0,13	12,0	
1,2	3,78	2,0	2,54	0,54	27,0	
1,7	7,41	4,5	4,84	0,34	7,5	
2,2	12,10	9,9	7,74	2,16	21,8	

Tabela 4.6 – Resultados das taxas de erosão calculadas utilizando as equações 3.1 e 4.2.

Os valores obtidos pela equação 4.2 foram satisfatórios. O erro médio é igual a aproximadamente 17%. Briaud (2001a) obteve erros aproximados de 10% para as tensões cisalhantes críticas em areais e pedregulhos comparados com os resultados apresentados por Shields (1936) para diversos tipos de areia.

Nota-se que a obtenção do valor da tensão cisalhante para uma cota qualquer do perfil de velocidade, não é trivial. O cálculo da tensão cisalhante neste trabalho se baseou na equação 2.8, que é função da velocidade média de escoamento a qual, vale destacar, não é a "real" velocidade do fluxo para cota z = 1mm.

Os valores calculados pela equação 4.2 estão muito próximos aos valores obtidos pela equação 3.1, em termos absolutos (vide Tabela 4.6). Como ocorreu para a modelagem da taxa de erosão em função da velocidade média de escoamento (equação 4.1), para a velocidade V = 1,2 m/s o valor calculado através da equação proposta 4.2 está ligeiramente fora do intervalo imposto pelo desvio padrão daquela velocidade adotada, sendo igual a $\sigma = 0,3 (mm/h)$.

Não obstante, para as velocidades médias de escoamento V = 0,7; 1,7 *e* 2,2 *m/s*, os valores obtidos através da equação 4.2 estão dentro do intervalo imposto pelos seus desvios padrão, sendo iguais a $\sigma = 0,1$; 0,6 *e* 3,5 (*mm/h*), respectivamente.

A Figura 4.16 apresenta os resultados das taxas de erosão do solo calculadas com as equações 3.1 [com $\dot{Z} = f(t)$] e 4.2 [com $\dot{Z} = f(\tau)$]. Atentar que a equação 4.2 só será válida para as tensões cisalhantes maiores do que a tensão cisalhante crítica.



A modelagem do cálculo da erodibilidade do material através da tensão de cisalhamento empregada pelo fluxo também se mostrou eficiente, apesar de pouco usual, pois a obtenção da tensão de cisalhamento não é trivial como a obtenção da velocidade média de escoamento para ensaios em laboratório.

A Tabela 4.15 apresenta os valores calculados da taxa de erosão utilizando as equações 4.1 e 4.2, juntamente com os valores obtidos da equação 3.1. Nota-se que os valores calculados com as equações 4.1 e 4.2 estão muito próximos, como esperado, pois o eixo das ordenadas, em ambas as modelagens, se manteve constante, variando apenas a escala do eixo das abscissas.

V	τ	$\dot{Z} = h/t$	$\dot{Z} = 1,8432.V^{1,814}$	$\dot{Z} = 0,711. \tau^{0,9575}$
(m/s)	(N/m^2)	(mm/h)	(mm/h)	(mm/h)
0,7	1,38	1,1	0,97	0,97
1,2	3,78	2,0	2,57	2,54
1,7	7,41	4,5	4,83	4,84
2,2	12,10	9,9	7,70	7,74

Tabela 4.7 – Resultados das taxas de erosão obtidas através das equações 3.1; 4.1 e 4.2.

A classificação erosiva do solo será realizada utilizando a metodologia proposta por Briaud (2008), apresentada pela circular HEC-18 da *Federal Highway Administration* (FHWA/USA, 2012), a qual correlaciona a taxa de erosão do solo com a velocidade média do escoamento e o sistema unificado de classificação de solo (SUCS).

A Tabela 4.8 apresenta as classes de erosão, destacando a intensidade erosiva do material e identificando materiais de referência.

Classe	Erodibilidade	Materiais de referência			
		Areia fina,			
I	Muito alta	Silte não plástico,			
		Areia média.			
	Alto	Silte com baixa plasticidade,			
	Alla	Rocha fissurada (<30 mm), Enrocamento fino.			
		Siltes muito plásticos,			
III	Média	Argilas pouco plásticas,			
		Rocha fissurada (30-50 mm).			
		Pedregulho,			
IV	Baixa	Pedra de mão,			
		Argila muito plástica.			
V	Muito boixo	Rip-Rap,			
v		Rocha fraturada (150-1500 mm)			
VI	Não erodível	Rocha Sã.			

Tabela 4.8 – Classes de erodibilidade e seus materiais de referência segundo Briaud (2008).

Nota-se que de acordo com a classificação supracitada, espera-se que o material estudado pertença a Classe I – muito alta erodibilidade –, destinada as areias médias e finas. Ainda, a Tabela 3.1 apresenta os valores percentuais representativos de cada faixa granulométrica do material, sendo 54% para as areias médias e finas, aproximadamente, e 46% para o material fino.

A Figura 4.17 apresenta a classificação da erodibilidade de forma gráfica, em função da velocidade média de escoamento e seguindo a metodologia de Briaud (2008).



Figura 4.17 – Classificação da erodibilidade do solo segundo Briaud (2008).

Da Figura 4.17 observa-se que para nenhum resultado obtido do ensaio de erosão utilizando o aparato teste desenvolvido, pertenceu à Classe I – muito alta erodibilidade. Além disso, os resultados obtidos para a velocidade média de escoamento V = 0.7 m/s encontram-se pertencentes à Classe II – alta erodibilidade –, com o restante dos resultados pertencentes à Classe III – média erodibilidade.

Num primeiro momento, acreditou-se que os resultados apresentaram-se não satisfatórios ou equivocados, afinal o solo foi classificado para uma classe erosiva não esperada – de acordo com os materiais de referência propostos por Briaud (2008) – vide Tabela 4.8. Entretanto, após a análise bibliográfica, os resultados se mostraram satisfatórios, como explicados mais adiante.

A Figura 4.18 apresenta a classificação da erodibilidade de forma gráfica, em função da tensão de cisalhamento empregada pelo fluxo – calculada em função da velocidade média de escoamento, utilizando a equação 2.8. Apresenta também os resultados obtidos do ensaio de erosão utilizando o aparato teste desenvolvido.



Figura 4.18 – Classificação da erodibilidade do solo segundo Briaud (2008).

Da Figura 4.18 observa-se que para as tensões de cisalhamento correspondentes as velocidades V = 0,7 m/s e V = 1,2 m/s, os resultados encontram-se pertencentes à Classe II – alta erodibilidade. Já os resultados obtidos para as tensões de cisalhamento correspondentes as velocidades V = 1,7 m/s e V = 2,2 m/s encontram-se pertencentes à classe III – média erodibilidade.

Portanto, com ambas as classificações em mãos, pode-se concluir que o material estudado possuiu um comportamento erosivo entre as Classes II e III.

Sabe-se da granulometria do material, que os percentuais correspondentes às frações granulométricas são: $21,6\% \pm 5,6\%$ para as areias médias, $32,7\% \pm 0,9\%$ para as areias finas e $44,9\% \pm 1,3\%$ para os finos.

Castello e Polido (1994) estudaram a influência de frações arenosas em diversos parâmetros geotécnicos de solos argilo-arenosos. Concluíram que para uma concentração de finos superior a 20%, este poderia se comportar como um solo coesivo, para os parâmetros geotécnicos estudados, mesmo que seu percentual de material grosso seja maior do que 50%.

Portanto, conhecidas as concentrações dos materiais que compõem o solo estudado e sabendo que a concentração de finos é superior a 20% (argila maior do que 34% em todos os ensaios de granulometria), conclui-se que, para critérios de erosão o solo utilizado se comportou como uma argila pouco plástica (com IP = $22,9\% \pm 2,8\%$; Classe II e III), apesar da sua classificação SUCS.

Um maior número de ensaios, com diferentes concentrações de finos deve permitir conclusões mais amplas.

4.1 Fenômenos observados durante a realização do ensaio de erosão

Durante a realização do ensaio de erosão no aparato desenvolvido por esta pesquisa, ocorreram fenômenos peculiares que chamaram a atenção dos autores deste trabalho. Podem-se destacar três principais fenômenos observados durante a realização do ensaio de erosão:

- Trincamento da amostra devido à saturação do material;
- Formação do platô resistente a jusante com surgimento de vórtices;
- Perda da amostra devido à sucção em altas velocidades de escoamento.

4.1.1 Trincamento da amostra para pequenas velocidades

O fenômeno do trincamento da amostra foi observado durante o ensaio de erosão para a velocidade média de escoamento, V = 0.3 m/s. Como relatado anteriormente, o solo estudado não erodiu em sua totalidade ao longo dos 60 minutos de ensaio.

Todavia, a pequena taxa de erosão presente não fora suficiente para alterar a superfície da amostra, não sendo observada erosão a olho nu.

Após o surgimento das trincas, identificou-se uma aceleração no processo erosivo – ocorrendo erosão por blocos de grãos em regiões próximas as trincas –, não sendo suficientes para erodir a amostra em sua totalidade durante o tempo $t \le 60 min$.

A Figura 4.19 ilustra o fenômeno do trincamento observado.



Figura 4.19 – Trincamento para a velocidade V = 0.3 m/s.

4.1.2 Formação do platô resistente

O fenômeno da formação do platô resistente ocorreu para as velocidades intermediárias, especificamente, para as velocidades médias de escoamento V = 0.7; $1.2 \ e \ 1.7 \ m/s$.

Ademais, para as velocidades supracitadas foi observado que a erosão ocorreu de grão a grão, não sendo constatada a erosão por bloco de grãos (sem a presença de trincas) como ocorreu para a velocidade média de escoamento V = 2,2 m/s.

O documento *Evaluating Scour at Bridges* publicado pela FHWA/USA (2012) contempla importantes informações para o cálculo da taxa de erosão local nos casos em que há o surgimento dos vórtices ferradura (montante) e esteira (jusante) no entorno de pilares de pontes (obstáculos resistentes).

A Figura 4.20 apresenta os vórtices ao longo de um obstáculo resistente.



Figura 4.20 – Atuação dos vórtices esteira e ferradura ao longo de um obstáculo resistente.

Fonte: Adaptado do Evaluating Scour at Bridges (FHWA, 2012).

O documento também apresenta fatores que influenciam na profundidade da erosão local causada pelos vórtices, por exemplo: (1) a velocidade de aproximação do fluxo ao obstáculo, (2) a altura do obstáculo sujeito ao impacto das linhas de fluxo, (3) a profundidade do perfil de velocidade, (4) e a forma do obstáculo (FHWA, 2012).

Entretanto, não faz parte do escopo deste trabalho analisar detalhadamente o fenômeno da erosão local causada pelos vórtices, porém é importante citá-los porque explica de forma clara o comportamento do material, ou seja, a causa do aumento da taxa de erosão a jusante do platô resistente.

Em alguns ensaios com velocidades intermediárias, o platô resistente foi formado e consequentemente os vórtices esteira – que surgem a partir do contato do fluído com o obstáculo resistente – agiram a jusante do platô, acelerando o processo erosivo do material a taxas muito elevadas.

A Figura 4.21 apresenta a formação do platô resistente e a atuação dos vórtices esteira em duas amostras, aumentando a taxa de erosão à jusante do obstáculo resistente. Nota-se que a erosão local nessas regiões fora maior do que o limite permitido, delimitado pela altura da amostra, h = 1,0mm.



Figura 4.21 – Surgimento do platô resistente nas amostras para as velocidades, V = 1,2 e 1,7 m/s.

O surgimento desse fenômeno afetou as diretrizes ora utilizadas para a execução e obtenção dos resultados do ensaio (tempo de erosão). Na presença do vórtice esteira, o critério adotado para o ensaio claramente mostrou-se ineficiente, pois à jusante do platô resistente a profundidade de erosão alcançada foi maior do que o limite permitido, inclusive, ocorrendo à erosão do material para "dentro" da amostra.

Devido à discrepância do comportamento da amostra quanto à erosão, foi proposto um o critério complementar:

O tempo adotado será o tempo t necessário para se erodir a altura equivalente h' = 1,5 mm em pelo menos 75% da seção transversal da amostra, respeitando o limite de t = 60 min (inspeção visual).

Juntamente das diretrizes do ensaio e o critério auxiliar proposto acima, foi possível obter 'tempos de ensaio' mesmo para os casos em que se observou o obstáculo resistente.

Já o vórtice ferradura – aquele que age à montante do obstáculo resistente, especificamente, na base frontal do mesmo – não foi observado, pois a superfície não é erodível (fundo da caixa de inspeção) e, portanto a analogia ao modelo para pilares de pontes não é satisfatória.

As causas da formação do platô resistente na amostra do solo podem ser diversas, desde a aleatoriedade das características geotécnicas da amostra de solo até erros durante a montagem do aparato de teste. Acredita-se que a principal causa da formação dos obstáculos resistentes seja devido à aleatoriedade das características geotécnicas do material, pois esse fenômeno foi observado em apenas poucos casos e aleatoriamente. Ainda, caso fosse algum problema de montagem do aparato, por exemplo, o desnível do tubo guia em PVC e o fundo da caixa de inspeção, interferiria de forma constante em todos os ensaios realizados, o que não ocorreu.

4.1.3 Sucção da amostra para altas velocidades

O fenômeno da sucção da amostra de solo ocorreu para altas velocidades, especificamente, para a velocidade, V > 2,2 m/s.

No escopo inicial deste trabalho foi previsto testes com a vazão máxima $Q_{máx} = 78 m^3/h$, ou em termos de velocidade média de escoamento, $V_{máx} = 3,0 m/s$ – que é a velocidade de escoamento máxima alcançada na composição em série com as três bombas do aparato de teste –, entretanto, devido ao fenômeno da sucção, deveu-se ajustar a pesquisa adotando-se cinco velocidades de ensaio limitadas pela velocidade média de escoamento V = 2,2 m/s.

Para a velocidade média de escoamento V = 2,2 m/s foi possível executar o ensaio normalmente. Entretanto, para algumas amostras, o problema da sucção ainda persistiu. Coincidentemente, as amostras que apresentaram problemas possuíam um menor comprimento devido às trincas naturais decorrentes da extração em campo, ou seja, L < 120mm.

A Figura 4.22 apresenta o fenômeno da sucção da amostra num momento imediatamente anterior a sucção e perda total da amostra.



Figura 4.22 – Fenômeno da sucção da amostra para velocidades V = 2,2 m/s, com L < 120mm.

A ascendência da amostra é causada por uma força de arrasto aplicada de baixo para cima, devido à pressão negativa daquela região, ocasionada pela alta velocidade de escoamento. Nota-se que a amostra de solo não possui nenhum atrito lateral com a camisa de plástico (*liner* ambiental), facilitando a ascensão da mesma.

A Figura 4.23 apresenta de forma esquemática a atuação das forças presentes e consequente ascensão da amostra de solo.



Figura 4.23 – Esquema do efeito da sucção para velocidades V = 2,2 m/s, com L < 120mm.

Durante a campanha de execução dos ensaios de erosão, não foi possível a instalação a tempo de um piezômetro posicionado a montante da caixa de inspeção para obter o valor da pressão negativa na caixa de acrílico. Desta feita, até o fechamento deste trabalho, não é do conhecimento do autor o valor da sucção atuante na amostra para a velocidade média de escoamento V = 2,2 m/s.

Ademais, durante a execução do ensaio, tentou-se solucionar o problema da sucção aumentando à pressão do sistema através de uma válvula a jusante da área de teste, mas não fora suficiente. Portanto, apesar da maior capacidade do sistema, os ensaios só foram executados até a velocidade máxima de teste, $V_{máx} = 2,2 m/s$.

4.1.4 Velocidade crítica e tensão cisalhante crítica

Findados os ensaios de erosão para as velocidades de testes adotadas, é importante identificar o valor da velocidade de escoamento a qual se iniciará o processo erosivo, chamada de velocidade crítica.

Sabe-se que o material estudado erodiu para a velocidade média de escoamento V = 0.7 m/s, entretanto, não foi observada a erosão para a velocidade média de escoamento, V = 0.3 m/s (sem a ocorrência de trincas, inspeção a olho nu).

Foram realizados quatro ensaios para a velocidade média de escoamento V = 0.6 m/s – velocidade adotada imediatamente inferior à velocidade de teste em que se observou a erosão total da amostra ao longo dos 60 minutos de ensaio – utilizando as amostras excedentes.

As amostras foram subdividas em quatro sub-amostras, pois para pequenas velocidades de escoamento fora possível reaproveitar as amostras de teste.

A Tabela 4.9 apresenta os resultados obtidos para a velocidade média de escoamento, V = 0.6 m/s. São apresentados os tempos observados, as taxas de erosão calculadas, o número de Reynolds, o fator de atrito do ábaco de Moody e a tensão cisalhante calculada para essa velocidade.

Ensaio de erosão para $V = 0.6 \text{ m/s}$								
Amostras	t (min)	Ż (mm/h)	R _e	f	$\tau (N/m^2)$			
H _{III-1}	56	1,07						
H _{III-2}	56	1,07	$= 01 \times 10^4$	0.0005	1.06			
I _{IV-1}	57	1,05	5,01 X 10	0,0235	1,00			
I _{IV-2}	59	1,02						

Tabela 4.9 – Dados obtidos para a velocidade média de escoamento, V = 0.6 m/s.

Os Quadros 4.10 e 4.11 apresenta a estatística dos tempos e das taxas de erosão obtidas para a velocidade média de escoamento, V = 0.6 m/s, respectivamente.

Quadro 4.10 – Cálculo da média e do desvio padrão dos tempos para, V = 0,6 m/s.

Estatística do tempo t (min)								
Ensaio	$x_i = t_{amostral}$	$x = t_{m\acute{e}d}$	$x_i - x$	$(x_i - x)^2$	n-1	$\sum (x_i - x)^2$	$\sum (x_i - x)^2/n - 1$	S
v = 0,6 m/s	56	57	-1,00	1,00	3	6,00	2,00	
	56		-1,00	1,00				1
	57		0,00	0,00				
	59		2,00	4,00				

Quadro 4.11 – Cálculo da média e do desvio padrão das taxas de erosão para, V = 0,6 m/s.

Estatística da taxa de erosão $Z(mm/h)$									
Ensaio	$x_i = \dot{Z}_{amostral}$	$x = \dot{Z}_{m\acute{e}d}$	$x_i - x$	$(x_i - x)^2$	n-1	$\sum (x_i - x)^2$	$\sum (x_i - x)^2/n - 1$	S	
v = 0,6 m/s	1,07	1,1	0,02	0,00		0,0020	0,0007		
	1,07		0,02	0,00	2			0,03	
	1,05		0,00	0,00	3				
	1,02		-0,04	0,00					

Nota-se que para a velocidade média de escoamento V = 0.6 m/s, o tempo médio observado e seu desvio padrão são iguais a $t = 57 \min \pm 1 \min$. A taxa de erosão média calculada e seu desvio padrão são iguais a $\dot{Z} = 1.1 N/m^2 \pm 0.03 N/m^2$.

Os valores estão condizentes com os outros resultados, pois para a velocidade média de escoamento V = 0.7 m/s, o tempo médio observado e seu desvio padrão

são iguais a $t_{m\acute{e}d} = 53 \ min \pm 3 \ min$. A taxa de erosão média calculada e seu desvio padrão são iguais a $\dot{Z}_{m\acute{e}d} = 1,1 \ N/m^2 \pm 0,01 \ N/m^2$.

A velocidade média de escoamento V = 0.6 m/s, não pode ser considerada a velocidade crítica do material. Num primeiro momento, acreditou-se que a velocidade crítica estaria entre $0.3 m/s < V_{crit} \le 0.6 m/s$, uma vez que não foi observada a erosão para a velocidade V = 0.3 m/s, sem a presença de trincas.

Não obstante, Briaud (2008) apresenta equações para o cálculo da velocidade crítica em função do diâmetro mediano dos grãos, d_{50} . As equações apresentadas são baseadas em resultados próprios, obtidos utilizando o EFA e de outros autores, como o estudo de Shields (1936) para areias médias e finas.

Utilizando as equações apresentadas na Figura 2.3, constata-se que a velocidade crítica calculada não se encontra dentro do intervalo 0,3 $m/s < V_{crit} \le 0,6 m/s$.

A Tabela 4.10 apresenta os resultados calculados, com $d_{50} = 0,125mm$.

Equação	$V_{crit} (m/s)$
$V_{crit} = 0.1(d_{50})^{-0.2}$	0,15
$V_{crit} = 0,03(d_{50})^{-1}$	0,24
$V_{crit} = 0.35 (d_{50})^{0.45}$	0,14

Tabela 4.10 – Cálculo de V_{crit} utilizando as equações apresentadas por Briaud, 2008.

Para a velocidade média de escoamento V = 0.3 m/s, não foi possível calcular a taxa de erosão \dot{Z} , pois no limite dos 60 minutos ensaiados, não foi identificado erosão total da amostra, não atendendo as diretrizes do ensaio (vide item 3.2.2)

Entretanto, através das equações apresentadas pela Tabela 4.11, a $V_{crit} \rightarrow 0,20 \text{ m/s}$ para $d_{50} = 0,12 \text{ mm}$. Desta sorte, é possível concluir que para V = 0,3 m/s, ocorreu erosão do material, porém numa taxa muito pequena, imperceptível ao olho nu durante do operador. Utilizando a equação proposta 4.1, para $V_{crit} = 0,20 \text{ m/s}$, temse uma taxa de erosão igual a $\dot{Z} = 1,8432 \cdot (0,20)^{1,814} = 9,94 \cdot 10^{-2} \text{ mm/h}$.

Ainda, conhecida a velocidade crítica, a tensão cisalhante crítica será calculada utilizando a equação 3.8. Tem-se, $\tau_{crit} \simeq 0.14 N/m^2$, para $R_e = 1.67 \times 10^4$ e

f = 0,285. A Tabela 4.13 resume os resultados obtidos dos ensaios de erosão realizados no aparato de teste desenvolvido por esta pesquisa.

N° de ensaios	V (m/s)	$t_{m\acute{e}d}(min)$	$\dot{Z}_{m\acute{e}d}(mm/h)$	$\tau (N/m^2)$
8	0,3	>60	>60 -	
4	0,6	57 ± 1	1,1 ± 0,03	1,06
8	0,7	53 ± 3	$1,1 \pm 0,1$	1,38
8	1,2	31 ± 5	$2,0 \pm 0,3$	3,78
8	1,7	14 ± 2	$4,5 \pm 0,6$	7,41
8	2,2	7 ± 2	$9,9 \pm 3,5$	12,10
V _{crit} (m/s)		0,20	
$ au_{crit}$ (N/m	2)		0,14	

Tabela 4.11 - Resumo dos resultados ensaiados no aparato de teste do tipo pistão.

No próximo capítulo, serão apresentadas as conclusões finais deste trabalho, juntamente com sugestões e recomendações para trabalhos futuros nesta linha de pesquisa experimental.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O presente trabalho sugere uma metodologia para o estudo do comportamento erosivo de um solo através de um aparato de mesa do tipo pistão, capaz de medir a taxa de erosão do solo para diferentes velocidades de escoamento.

Os ensaios realizados em laboratório permitiram visualizar e quantificar um conjunto de parâmetros hidráulicos e geotécnicos que forneceram dados necessários para a análise da erodibilidade do material utilizado.

A análise da erodibilidade do material foi realizada utilizando-se um solo classificado como areia argilosa segundo o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), sendo que a fração argilosa é superior a 34%.

O resultado da classificação erosiva do solo estudado foi diferente do que o esperado. De acordo com a literatura, para solos arenosos, era previsto um resultado de Classe I – muito alta erodibilidade. Não obstante, o solo foi classificado entre as Classes II e III.

Acredita-se que a alta concentração de finos (maior do que 20%), aumentou a resistência ao cisalhamento empregado pelo fluxo, justificando o comportamento não usual apresentado.

As velocidades de fluxo adotadas seguiram trabalhos similares encontrados na literatura. Foi previsto um maior número de velocidades de teste, inclusive com velocidades superiores a V = 2,2 m/s. Entretanto, devido ao problema da sucção apresentado, teve-se que limitar o escopo do trabalho a essa velocidade.

Finalmente, buscou-se ajustar uma equação para o cálculo da taxa de erosão do solo utilizado – em função da velocidade média de escoamento – através dos resultados obtidos do aparato de teste desenvolvido por essa pesquisa. Ademais, fora também proposto uma equação para o cálculo da taxa de erosão do solo utilizado – em função da tensão de cisalhamento imposta pelo escoamento, calculada através da equação 2.8.

5.1 Conclusões

Existem muitas variáveis que envolvem o processo erosivo do solo. Pouco ainda se conhece sobre a representatividade das grandezas hidráulicas ou geotécnicas no processo erosivo do mesmo. Ademais, as correlações entre estas grandezas e a taxa de erosão do solo ainda são incipientes.

A utilização do aparato de teste desenvolvido por esta pesquisa se mostrou eficiente para a obtenção do comportamento erosivo do solo adotado. A metodologia apresentada para o cálculo da erodibilidade a partir dos dados obtidos dos ensaios de erosão usou o tempo necessário para se erodir um volume pré-determinado de solo em sua totalidade, sendo simples e de fácil replicação.

Especificamente, para o solo estudado, a obtenção da velocidade crítica através da inspeção visual não se mostrou eficiente. Num primeiro momento, acreditou-se que a velocidade critica fosse superior que a menor velocidade média de escoamento adotada, V = 0.3 m/s, pois não foi observada erosão do material – o que não se comprovou após a utilização das equações disponíveis na literatura para o cálculo da velocidade critica e da tensão de cisalhamento crítica.

Pesquisadores enfrentam uma árdua tarefa para replicar em laboratório as grandes velocidades observadas na natureza. Porém, através da metodologia apresentada por esse trabalho e, utilizando o aparato desenvolvido, ou similar, é possível obter uma grande quantidade de resultados para diferentes velocidades de fluxo, possibilitando conclusões a respeito do comportamento erosivo daquele material.

Por fim, através dos resultados alcançados, é possível propor uma modelagem que possa ser aplicada utilizando as altas velocidades observadas na natureza e calculando a taxa de erosão de um solo nestes casos.

Os resultados obtidos por essa pesquisa permitem concluir que:

- A taxa de erosão do solo aumenta de acordo com o aumento da velocidade de escoamento, com uma relação descrita como uma função potência;
- Os resultados apresentaram uma grande dispersão, demonstrando a aleatoriedade do comportamento erosivo do solo;
- O equipamento desenvolvido se mostrou eficiente para a obtenção das taxas de erosão do solo com diferentes velocidades de escoamento. Através desse equipamento, foi possível alcançar uma grande quantidade de resultados coerentes com a literatura;
- A obtenção da velocidade critica através da inspeção visual não se mostrou eficiente, passível a distorções interpretativas.

Ao final deste trabalho, ficaram evidentes a importância e a relevância do conhecimento geotécnico do solo e do seu comportamento erosivo perante as diferentes velocidades de escoamento. A taxa de erosão de um solo será a composição das características geotécnicas do material e as condições em que naturais em que estará sendo solicitado pelo meio.

5.2 Recomendações

Ao final deste trabalho sugerem-se as seguintes ações para a continuidade dessa linha de pesquisa utilizando o aparato de teste desenvolvido:

- Aperfeiçoar o aparato de teste: automatizar o sistema de ascensão da amostra de solo, pistão/parafuso infinito, realizar a medição da altura da amostra erodida através de lasers instalados na caixa de inspeção e aumentar a capacidade do conjunto moto-bomba;
- Estudar o efeito da compactação do material. Pesquisar a influência do grau de compactação do solo no comportamento erosivo do material;
- Realizar ensaios de erosão para solos coesivos, argilas muito plásticas e pouco plásticas;
- Estudar a erodibilidade do solo de fundação de pilares de pontes;
- Estudar a erodibilidade do solo de taludes de jusante de barragens de solo;
- Estudar a influência de aditivos no comportamento erosivo dos materiais com alta taxa de erosão (areia média e fina).

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN STANDARDS FOR TESTING MATERIALS. **ASTM 3080**. Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils under Consolidated Drained Conditions. West Conshohocken, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6459. Determinação do limite de liquidez. São Paulo, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6508. Grãos que passam na peneira 4,8 mm: determinação da massa específica. São Paulo, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7180. Determinação do limite de plasticidade. São Paulo, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7181. Análise granulométrica. São Paulo, 1984.

BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO SOCIAL. Relatório de Investimento, n. 3. Brasília: BNDES, 2012.

BRIAUD, J.-L., TING, F. C. K., CHEN, H. C., GUDAVALLI, R., PERUGU, S., and WEI, G. Sricos: prediction of scour rate in cohesive soils at bridge piers. **Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering**, ASCE, 125(4), p. 237–246, 2011.

BRIAUD, J-L, CHEN, H. C; GOVINDASAMY, A. V.; STORESUND, R. Levee erosion by overtopping in New Orleans during the Katrina Hurricane. Journal of Geotechnical and Geoenviromental Engineering, Reston, v. 134, n. 5, p. 618-632, 2008a.

BRIAUD, J-L. Case Histories in Soil and Rock Erosion: Woodrow Wilson Bridge, Brazos River Meander, Normandy Cliffs, and New Orleans Levees. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, Reston, v. 134, n. 10, p.1425-1447, 2008b. BRIAUD, J-L., CHEN, H. C., GOVINDASAMY, A. V., STORESUND, R. Erosion tests on samples from the New Orleans levees. **In: Geo-Denver 2007: New Peaks in Geotechnics**, 2007, Denver. *Proceedings…* Denver: ASCE, p. 1-16, 2007.

BRIAUD, J-L; TING, F.C.K.; CHEN, H.C.; CAO, Y.; HAN, S.W.; KWAK, K.W. Erosion function apparatus for scour rate predictions. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, Reston, v. 127, n.2, p.105 -113, 2001a.

CAMPOS, T.M.P.de; CARRILLO, C.W. Direct shear testing on an unsaturated soil from Rio de Janeiro. In: 1st **International Conference on Unsaturated Soils Unsat** 95, 1, Paris. Anais... Balkema, Rotterdam, 1995, v. 1, p. 31-38.

CHANSON, Hubert et al. **The Hidraulics of Open Channel Flow: An introduction**. 2 ed. Oxford: Elsevier, Butterworth e Heinemann, 2004. 585 p.

CORONA, F. Internal erosion in earth dams; HET and JET testing. **Supervised research project: University of London**, Londres, 2014.

DAS, Braja M. et al. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica**. 7 ed. São Paulo: Cengage Learning, 2011. 610 p.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. **HEC-18: Evaluating scour at bridges**. 5 ED. USA: FHWA, 2012. 340 P.

FOX, R.W, MCDONALD, A.T., PRITCHARD, P.J. et al. **Mecânica dos Fluidos**. 6 ed. São Paulo: LTC, 2006. 798 p.

JULIEN, P. Y. Erosion and Sedimentation. 2. ed. New York: Cambridge University Press, 1998. 280 p.

LAL, R. **Soil Erosion: research methods**. Delray Beach-Florida-USA: Soil and water conservation Society and St. Lucie Press, 1994. 340 p.

MOORE, W. L.; MASCH, F. D. Experiments on the scour resistance of cohesive sediments. **Journal Geophys**, v. 67, n. 4, p. 1437- 1449, 1962.

NETTO, Azevedo; FERNANDEZ, Miguel F.; ARAUJO, Roberto de; ITO, Acácio E. et al. **Manual de Hidráulica**. 8 ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1998. 669 p.

PORTO, Rodrigo de M. et al. Hidráulica Básica. 4 ed. São Paulo: EESC/USP, 2006. 519 p.

PRUSKI, Fernando F. et al. Conservação de solo e água: práticas mecânicas para o controle da erosão hídrica. 2 ed. Viçosa: Editora UFV, 2009. 279 p.

RIBEIRO, J. L. D.; CATEN, C. T., Projetos de Experimentos. Porto Alegre: UFRGS, 2010.

ROHAN, K.; LEFEBVRE, G.; DOUVILLE, S.; MILETTE, J. P. A new technique to evaluate erosivity of cohesive material. **Geotechnical Testing Journal**, v. 9, n. 2, p. 87-92, 1986.

SALIBA, Aloysio P. M. **Uma nova abordagem para análise de ruptura por galgamento de barragens homogêneas de solo compactado**. 2009. 193 f. Tese de Doutorado – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

SAUER, Aline S. Estudo da Viabilidade técnica de uso do resíduo de vidro de para-brisas moído em argamassa de recuperação estrutural. Qualificação de Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2012.

SHIELDS, A. Anwendung der Aenlichkeitsmechanik und der turbulenzforschung auf die geschiebebewegung. Mittleilungen der preussischen versuchsanstalt fur wasserbau und schiffbau. OTT, W. P.; UCHELEN J. C. Van, [tradutores], **California Institute of Technology**, Pasadena, 1936.

TING, F.C.K., BRIAUD, J-L., CHEN, H.C., PEREGU, S., WEI, G. Flume tests for scour in clay at circular piers. **Jounal of Hydraulic Engineering.** 2001.

WAN, C. F., FELL, R. Investigation of rate of erosion of soils in embankment dams.Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Reston, v. 130, n.4, p. 373-380, 2004.

WHITE, C. M. The Equilibrium of grains on the bed of a stream. **Proc. Royal Society** of London, v. 174, p. 322- 338, 1940.