

Felipe Azevedo Paulo

**AVALIAÇÃO DO FUNCIONAMENTO HIDRÁULICO DE
DESCARGA DE FUNDO DO TIPO TUBO RANHURADO EM
BARRAGENS DE PEQUENA ALTURA**

Porto Alegre
Julho de 2019

FELIPE AZEVEDO PAULO

**AVALIAÇÃO DO FUNCIONAMENTO HIDRÁULICO DE
DESCARGA DE FUNDO DO TIPO TUBO RANHURADO EM
BARRAGENS DE PEQUENA ALTURA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO APRESENTA-
DO AO INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁU-
LICAS DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO
RIO GRANDE DO SUL COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTU-
LO DE ENGENHEIRO HÍDRICO.

Orientador: Eder Daniel Teixeira
Co-orientadora: Aline Saupe Abreu

Porto Alegre
Julho de 2019

CIP - Catalogação na Publicação

Azevedo Paulo, Felipe
Avaliação do Funcionamento Hidráulico de Descarga
de Fundo do Tipo Tubo Ranhurado em Barragens de
Pequena Altura / Felipe Azevedo Paulo. -- 2019.
97 f.
Orientador: Eder Daniel Teixeira.

Coorientadora: Aline Saupe Abreu.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto
de Pesquisas Hidráulicas, Curso de Engenharia Hídrica,
Porto Alegre, BR-RS, 2019.

1. Assoreamento de reservatórios. 2. Descarregador
de fundo. 3. Pressure flushing. 4. Sedimento. 5.
Modelagem física. I. Daniel Teixeira, Eder, orient.
II. Saupe Abreu, Aline, coorient. III. Título.

Felipe Azevedo Paulo

Avaliação do Funcionamento Hidráulico de Descarga de Fundo do Tipo Tubo Ranhurado
em Barragens de Pequena Altura

Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Hídrica da Universidade Federal do Rio
Grande do Sul defendido e aprovado em 09/07/2019 pela Comissão Avaliadora constituída
pelos professores:

Banca Examinadora:

.....
Prof. Dr. Aloysio Portugal Maia Saliba – DEHRH/UFGM

.....
Prof. Dr. Eder Daniel Teixeira – IPH/UFRGS

.....
Prof. Dr. Luiz Augusto Magalhães Endres – IPH/UFRGS

Conceito:.....

À minha mãe Lia e à minha avó Lory, sem as quais eu
nunca chegaria até aqui.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, professor Eder Daniel Teixeira, por me oferecer a oportunidade de realizar este trabalho e por propiciar todo o apoio necessário para sua realização, além de incentivo e valiosa orientação.

À minha co-orientadora, Aline Saupe Abreu, pelo auxílio na elaboração do texto e pela disposição em esclarecer minhas muitas dúvidas.

Ao Laboratório de Obras Hidráulicas e ao Instituto de Pesquisas Hidráulicas pela disposição da infraestrutura e apoio técnico imprescindíveis para a realização deste trabalho.

Aos bolsistas Pedro Guido, Daniel Rossoni, Leandro de Sousa e Eduardo Saath pelo auxílio na execução dos ensaios.

À professora Ana Luiza de Oliveira Borges, por toda a orientação e ensinamentos que me passou durante o curso de engenharia hídrica: desde as primeiras aulas de Introdução à Engenharia Hídrica, passando pelo período em que foi minha orientadora na bolsa de iniciação científica, até as disciplinas de TCC I e TCC II, nas quais realiza um trabalho minucioso de correção e orientação da elaboração dos textos dos TCC's que tem que ser muito valorizado pelos alunos do curso.

Aos melhores amigos Rodrigo Melleu Ulian e Gabriel Boger Netto pelo companhia e apoio inestimáveis durante o curso. À amiga Débora Barros por todas as ferrenhas e produtivas discussões sobre os mais variados assuntos.

À minha família, que sempre me ofereceu condições e incentivo para buscar conhecimento.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul e à *Universidad Nacional del Litoral*, duas universidades de excelência nas quais eu somente tive a oportunidade de estudar devido ao seu caráter público e gratuito (que deve ser defendido nestes tempos incertos que vivemos), por me propiciarem viver uma das melhores épocas de minha vida estudando *Ingeniería en Recursos Hídricos* na minha amada *Santa Fe*.

Aos professores do *Departamento de Hidráulica* da *Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas* da *UNL* por despertarem meu interesse por hidráulica fluvial, em especial ao professor Mario Amsler, que me apresentou à sedimentação em reservatórios e aos descarregadores de fundo.

A todos os amigos e professores desde o ensino fundamental que, de uma forma ou de outra, me ensinaram algo e contribuíram para que eu seja a pessoa que sou hoje.

É melhor fazer as coisas sistematicamente,
uma vez que nós somos somente humanos,
e a desordem é a nossa pior inimiga.

Hesíodo

Se tens que lidar com água,
consulta primeiro a experiência,
depois a razão.

Leonardo da Vinci

Aprendí a volver mientras fui yendo
Aprendí para ser quien estoy siendo
Y de gritar, de sufrir, de sangrar, de asumir
De perder, de fallar, de todo eso aprendo

Roberto Musso

RESUMO

O sedimento trazido pelos rios se deposita em reservatórios de barragens em função da diminuição da velocidade do escoamento. A sedimentação ocupa volume útil do reservatório e pode ameaçar o funcionamento de tomadas de água durante a vida útil dos aproveitamentos hídricos. Descarregadores de fundo são estruturas presentes em barragens cuja função, entre outras, é a remoção de sedimentos que se depositam junto ao barramento. A remoção de sedimentos se dá através da capacidade de transporte do escoamento, que se acelera ao fluir em direção ao descarregador de fundo. Diversos autores propuseram equações para representar o fenômeno, sendo que este se limita a uma região próxima ao descarregador quando a operação se dá na condição de *pressure flushing*. Dada a restrita remoção gerada pelos descarregadores tradicionais, este trabalho propõe uma nova configuração de descarregador de fundo, denominado tipo tubo ranhurado, que visa aumentar o alcance de remoção de sedimentos para barragens de pequena altura (inferior a 15 m). Foi empregado um modelo físico experimental, com 4 diâmetros de descarga de fundo, para avaliar a remoção de dois tipos de sedimento: areia e borracha processada. Através da análise da batimetria gerada após o acionamento da estrutura, desenvolveu-se uma relação adimensional que estima o alcance de remoção de sedimento na condição de *pressure flushing* em função de parâmetros do escoamento, do sedimento e da descarga de fundo. A equação obtida apresenta bom ajuste aos dados experimentais, tendo-se em conta a dispersão usualmente observada em pesquisas relacionadas a sedimentos.

Palavras-chave: Assoreamento de reservatórios. Descarregador de fundo. *Pressure flushing*. Sedimento. Modelagem física. Barragens de pequena altura.

RESUMEN

El sedimento transportado por los ríos se deposita en embalses de presas en función de la disminución de la velocidad del flujo. La sedimentación ocupa volumen útil del embalse y puede amenazar el funcionamiento de tomas de agua durante la vida útil de los aprovechamientos hídricos. Descargadores de fondo son estructuras presentes en presas cuya función, entre otras, es la remoción de sedimentos que se depositan junto al cierre. La remoción de sedimentos se da a través de la capacidad de transporte del escurrimiento, que se acelera al fluir en dirección al descargador de fondo. Diversos autores han propuesto ecuaciones que representan el fenómeno, siendo este limitado a una región cercana al descargador cuando su operación se da en la condición de *pressure flushing*. Dada la limitada remoción generada por los descargadores tradicionales, este trabajo propone una nueva configuración de descarga de fondo, denominada tipo tubo ranurado, que visa aumentar el alcance de remoción de sedimentos para presas de baja altura (inferior a 15 m). Se empleó un modelo físico experimental, con 4 diámetros de descarga de fondo, para evaluar la remoción de dos tipos de sedimento: arena y caucho procesado. A través del análisis de la batimetría generada tras el accionamiento de la estructura, se desarrolló una relación adimensional que estima el alcance de remoción de sedimentos en la condición de *pressure flushing* en función de parámetros del flujo, del sedimento y del descargador de fondo. La ecuación obtenida presenta buen ajuste a los datos experimentales, teniéndose en cuenta la dispersión usualmente observada en investigaciones relacionadas a sedimentos.

Palabras clave: Colmatación de embalses. Descargador de fondo. *Pressure flushing*. Sedimento. Modelaje físico. Presas de baja altura.

ABSTRACT

Sediment deposition in dam's reservoirs occurs due to the decrease of flow velocity. Sedimentation occupies reservoir's volume and may threaten water intakes during the life span of dams. Bottom outlets are structures present in dams whose function, among others, is removing sediment deposited near to the dam. Desilting occurs through the flow's carrying capacity, which accelerates when flowing towards the bottom outlet. Several authors have proposed equation that represent the phenomenon, which is limited to a region close to the outlet when it operates under pressure flushing condition. Due to the restricted removal generated by traditional bottom outlets, this work proposes a new type of bottom outlet, named slotted pipe, which aims to increase the sediment removal reach for small dams (lower than 15 m). A physical experimental model was used, with four diameter of bottom outlet, to evaluate the removal of two types of sediment: sand and crumb rubber. Through the analysis of the bathymetry generated after the activation of the structure, a dimensionless relation that estimates the removal reach under the pressure flushing condition was derived based on flow, sediment and bottom outlet parameters. The equation obtained shows good adjustment to experimental data, considering the usual dispersion observed in researches related to sediment.

Keywords: Silting of reservoirs. Bottom outlet. Pressure Flushing. Sediment. Physical modeling. Small dams.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO.....	18
1.1 Justificativa e Delimitação do Tema.....	18
1.2 Organização do trabalho.....	20
CAPÍTULO 2: DIRETRIZES DA PESQUISA.....	22
2.1 Questão de Estudo	22
2.2 Objetivos	22
2.2.1 Objetivo Principal.....	22
2.2.2 Objetivo Secundário	22
2.3 Delimitações	23
CAPÍTULO 3: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
3.1 Aspectos Gerais da Sedimentação em Reservatórios	24
3.2 Descarregadores de Fundo.....	28
3.2.1 Generalidades	28
3.2.2 <i>Drawdown Flushing</i>	31
3.2.3 <i>Pressure Flushing</i>	34
CAPÍTULO 4: MATERIAIS E MÉTODOS.....	48
4.1 Aparato Experimental.....	49
4.1.1 Canal de Ensaio.....	49
4.1.2 Descarregador de Fundo.....	51
4.1.3 Sedimento.....	52
4.1.4 Escaneamento 3D	53
4.1.5 Outros Equipamentos	54
4.2 Plano de Ensaio.....	54
4.3 Procedimento de Ensaio	56
4.3.1 Batimetria com Trena a Laser.....	57
4.3.2 Batimetria com Escaneamento 3D.....	58
4.4 Tratamento de Dados.....	59
4.4.1 Batimetria com Trena a Laser.....	59
4.4.2 Batimetria com Escaneamento 3D.....	60
4.4.3 Análise dos Perfis	62
CAPÍTULO 5: RESULTADOS E DISCUSSÕES	65
5.1 Forma da Cava.....	65
5.2 Processo de Remoção de Sedimentos.....	69
5.3 Análise do funcionamento da estrutura	71
5.3.1 Escoamento através do descarregador	71
5.3.2 Análise dos Perfis	76

5.3.3 Proposta de Adimensional	85
5.3.4 Limites de Aplicação	92
CAPÍTULO 6: CONCLUSÕES	94
CAPÍTULO 7: RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	97
REFERÊNCIAS	100

Lista de Figuras

Figura 1: Represa totalmente assoreada e sem sua função original de amortecimento de cheias em Iowa, Estados Unidos (Fonte: adaptado de Healy et al. (1989)).	24
Figura 2: Perfil longitudinal esquemático da localização dos depósitos de sedimento em um reservatório (Fonte: adaptado de Carvalho et al. (2000)).	26
Figura 3: Sequência fotográfica da represa Barlin: (a) antes de sua colmatação (10/2002), (b) assoreada (07/2007) e (c) depois de seu rompimento (09/2007) (Fonte: adaptado de Kondolf et al. (2014)).	27
Figura 4: 1: reservatório, 2: depósito de sedimentos, 3: erosão causada pelo descarregador, 4: descarregador de fundo (Fonte: adaptado de Peteuil et al. (2013)).	28
Figura 5: Descargas de fundo da represa argentina Agua del Toro. À esquerda nota-se a existência de uma fossa de erosão apesar da presença de uma válvula dissipadora (Fonte: adaptado de López, Rodríguez e Dölling (2011)).	30
Figura 6: Descarregadores de fundo da represa Dez (Irã) em funcionamento (Fonte: adaptado de Emamgholizadeh et al. (2006)).	30
Figura 7: Descarregadores de fundo com seção transversal retangular da represa Cerro del Águila. Sua função é de evacuar cheias durante a construção do barramento e eliminar sedimento quando da operação do reservatório (Fonte: adaptado de Sayah et al. (2016)).	31
Figura 8: Esquema do perfil longitudinal de erosão causado pelo <i>drawdown flushing</i> : à medida que a superfície da água descende, a erosão regressiva remove o sedimento depositado (Fonte: adaptado e traduzido de Lai e Shen (1996)).	32
Figura 10: Representação esquemática do cone de erosão gerado pelo descarregador de fundo (Fonte: adaptado e traduzido de Meshkati et al. (2010)).	35
Figura 11: Comparação entre os resultados obtidos com as duas técnicas de <i>flushing</i> (Fonte: adaptado e traduzido de Shen (1999)).	36
Figura 12: Alcance de remoção de sedimentos, adaptado e traduzido de White e Bettes (1984).	37
Figura 13: Aparato experimental utilizado por Fathi-Moghadam et al. (2010).	39
Figura 14: Relação entre o volume erodido, o diâmetro do descarregador, a massa específica do material, a profundidade e a espessura do depósito (Fonte: Abreu et al. (2016)).	42
Figura 15: Relação entre o volume erodido, o diâmetro do descarregador e a densidade do material (Fonte: Abreu et al (2016)).	42
Figura 16: Comparação entre os resultados de Saraiva et al. e os de outros autores (Fonte: adaptado de Saraiva et al., 2017).	43
Figura 18: Esquema das dimensões consideradas por Abreu et al. (2018).	44
Figura 19: Adimensionalização proposta por Abreu (2019) para a determinação do alcance máximo de remoção para os três modelos estudados.	45
Figura 20: Descarga de fundo composta por conduto semicircular (Fonte: adaptado e traduzido de Madadi, Rahimpour e Qaderi (2017)).	46
Figura 21: Novo tipo de descarregador de fundo concebido pelo LOH.	48
Figura 22: Esquema do modelo físico (a). A seta vermelha indica o sentido do escoamento. Vista de jusante da saída do descarregador de fundo (b) (Fonte: adaptado de Abreu et al. (2018)).	50
Figura 23: Peças de PVC empregadas nos ensaios.	51
Figura 24: Vista superior (a) e vista frontal (b) do descarregador de fundo.	52

Figura 25: Vista frontal do escâner Kinect® II com câmera RGB e sensor de profundidade (Fonte: adaptado de Kinetisense [s.d.]).	53
Figura 26: Ponta linimétrica (a) e trena a laser (b).	54
Figura 27: Descarregador de fundo com a extremidade obstruída por um CAP.	55
Figura 28: Sistema de coordenadas das batimetrias com trena a laser.	60
Figura 29: Obtenção de curvas de nível a partir da batimetria por escaneamento 3D.	62
Figura 30: Sistema de coordenadas adotado para a análise dos perfis.	63
Figura 31: Configurações observadas após o término dos ensaios: (a): caso A, DN50, 1,30 l/s, areia; (b): caso B, DN75, 5,70 l/s, areia. A linha vermelha indica o limite da cava de erosão.	66
Figura 32: Diminuição de L_s ao longo do descarregador de fundo (a) e L_s aproximadamente constante (b). Ambos ensaios em caso A, DN50 e com borracha como sedimento; vazões iguais a 1,23 l/s (a) e 2,15 l/s (b).	67
Figura 33: Remoção sob as ranhuras visível para borracha (a) e inexistente ou insignificante para areia (b). Ambos ensaios com DN75 e vazão de 5 l/s.	68
Figura 34: Efeito combinado de remoção abaixo da base das ranhuras e redução da remoção ao longo do descarregador de fundo. DN 50; 2,14 l/s; borracha. A linha vermelha indica o limite da cava de erosão.	69
Figura 35: Representação esquemática do escoamento suposto no descarregador no caso A.	71
Figura 36: Dimensões que definem a área de uma ranhura.	73
Figura 37: Representação esquemática do escoamento suposto no descarregador no caso B.	74
Figura 38: Diminuição do alcance de remoção de ranhuras no caso B. (a): DN100, 9,0 l/s, areia; (b): DN75, 5,2 l/s; (c): DN100, 9,5 l/s, borracha. A linha vermelha indica o limite da cava de erosão.	76
Figura 39: Representação esquemática dos perfis analisados.	77
Figura 40: Perfis P2 e P5 obtidos com areia.	78
Figura 41: Perfis P2 e P5 obtidos com borracha.	78
Figura 42: Perfis P2 e P5 separados por diâmetro.	82
Figura 43: Comparação de perfis obtidos a partir das duas técnicas de obter a batimetria.	85
Figura 44: Proposta de adimensional tendo (a) e não tendo (b e c) em conta a velocidade.	87
Figura 45: Relação adimensional que representa a remoção de sedimentos pelas ranhuras.	89

Lista de Tabelas

Tabela 1: Ensaios realizados com borracha processada previamente a este trabalho. Ensaios assinalados com * foram realizados com um CAP na extremidade do descarregador de fundo.	56
Tabela 2: Ensaios realizados com areia. Ensaios assinalados com ** tiveram batimetria realizada com escaneamento 3D.	56
Tabela 3: Posições dos perfis.	77
Tabela 4: Velocidade média de ingresso nas ranhuras.	83

Lista de Quadros

Quadro 1: Comparação entre os métodos de <i>pressure</i> e <i>drawdown flushing</i>	35
--	----

Lista de Símbolos

- A Área da seção transversal do descarregador de fundo (m)
- A_p Área da seção transversal da extremidade do descarregador e fundo tipo tubo ranhurado (m^2)
- D Diâmetro do descarregador de fundo (m)
- d Diâmetro do sedimento (mm)
- d_{50} Diâmetro médio do sedimento (mm)
- d_s Diâmetro característico do sedimento (mm)
- Fr Número de Froude a montante do descarregador de fundo (adm)
- Fr_s Número de Froude do grão ou do sedimento (adm)
- g Aceleração da gravidade (m/s^2)
- G_s Densidade do sedimento (adm)
- H^* Razão entre H_a e H_s (adm)
- H_a Profundidade de água sobre a geratriz inferior do descarregador de fundo (m)
- H_s Cota dentro do depósito de sedimento acima da geratriz inferior do descarregador de fundo (m)
- $H_{smáx}$ Espessura total do depósito de sedimento acima da geratriz inferior do descarregador de fundo tipo tubo ranhurado (m)
- H_w Profundidade de água sobre o centro do descarregador de fundo (m)
- L_d Comprimento do descarregador de fundo (m)
- L_s Dimensão da cava de erosão perpendicular ao barramento no descarregador de fundo tipo tubo ranhurado (m)
- L_{s^*} Razão entre L_s e D (adm)
- L_{ss} Dimensão da cava de erosão perpendicular ao barramento (m)

N_r	Número de ranhuras (adm)
Q	Vazão escoada pelo descarregador de fundo (l/s)
Q_p	Vazão escoada pela ponta do descarregador de fundo tipo tubo ranhurado (l/s)
Q_r	Vazão escoada por uma ranhura (l/s)
Q_{rt}	Vazão total escoada pelas ranhuras (l/s)
R	Espessura de uma ranhura (m)
S	Densidade do sedimento (adm)
u	Velocidade média no descarregador de fundo (m/s)
u_p	Velocidade média do escoamento através da ponta do descarregador de fundo tipo tubo ranhurado (m/s)
u_r	Velocidade média do escoamento através de uma ranhura (m/s)
V	Volume de sedimento erodido (m ³)
W	Dimensão da cava de erosão perpendicular ao sentido do escoamento (m)
W_{ss}	Dimensão da cava de erosão perpendicular ao sentido do escoamento (m)
Z	Cota a partir do fundo do modelo (m)
α	Ângulo do talude da cava de erosão gerada pelo descarregador de fundo com a horizontal (adm)
γ	Peso específico da água (N/m ³)
γ_s	Peso específico do sedimento (N/m ³)
ρ	Massa específica da água (kg/m ³)
ρ_s	Massa específica do sedimento (kg/m ³)
ρ_{wb}	Massa específica do sedimento coesivo umedecido (kg/m ³)
τ^*	Número de Shields (adm)
τ_0	Tensão de cisalhamento no leito (N/m ²)

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO

1.1 Justificativa e Delimitação do Tema

Perde-se aproximadamente 1% do volume total de armazenamento dos reservatórios de água no mundo devido à sedimentação anualmente (MAHMOOD, 1987), sendo os maiores valores observados na Ásia, podendo chegar a 1,7% (SHEN, 1999). Perde-se capacidade de atenuação de cheias e capacidade de geração de energia sendo que no Brasil a perda é da ordem de 0,5% anual (CARVALHO et al., 2000). Entretanto, em um país em que 65% da energia elétrica é gerada a partir de aproveitamentos hidroelétricos como o nosso (EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2017), a sedimentação nos reservatórios é um tema que adquire cada vez mais importância.

Os reservatórios se formam quando se interrompe o curso natural de um rio com uma barragem. Historicamente, barragens começaram a ser utilizadas com o fim de armazenar água ou aumentar o nível para derivá-la a canais de irrigação (HOWARD, 2016). Outros usos foram destinados às barragens com o passar do tempo, tais como geração de eletricidade, contenção de cheias, atenuação de grandes desníveis geográficos para permitir a navegação (quando associadas a eclusas), armazenamento de água para abastecimento urbano, recreação. A construção de barragens causa impactos físicos, biológicos, econômicos e sociais que afetam os usos mencionados e que são percebidos antes mesmos de ser possível observar os benefícios advindos da operação do empreendimento (WALLING, 2007).

A deposição dos sedimentos trazidos pelos rios que formam os reservatórios torna-se um dos principais problemas enfrentados durante operação das barragens. A capacidade

de transporte de um rio se vê gradativamente diminuída ao ingressar no reservatório devido à diminuição da velocidade, que se aproxima a zero junto ao barramento. A acumulação de sedimentos no reservatório diminui o volume disponível para o armazenamento de água além de dificultar o funcionamento de tomadas de água, assoreando-as, e de turbinas, causando abrasão em seus componentes (STRAND; PEMBERTON, 1982). Além disso, a sedimentação em reservatórios altera o regime geomorfológico dos rios e o transporte de nutrientes associados ao sedimento devido à interrupção do fluxo de sedimentos para jusante (MAHMOOD, 1987).

A prevenção e a mitigação da sedimentação constituem tarefas essenciais para a maximização da vida útil do empreendimento. O uso de descarregadores de fundo se apresenta como uma importante ferramenta de remoção de sedimento depositado no reservatório dado que outras medidas mitigadoras apresentam desvantagens consideráveis: dragagens apresentam alto custo, planos de prevenção de erosão nas bacias dependem de coordenação entre vários setores da sociedade, estruturas de *by-pass* não são comuns (SHEN, 1999).

Descarregadores são condutos instalados próximos à base do barramento para evacuar o sedimento depositado (AMIRSAYAFI, 2015). Diversos autores têm proposto equações para relacionar o alcance de remoção e a eficiência de descarregadores de fundo com parâmetros como suas dimensões e o nível de água no reservatório, contudo, não há critérios uniformes para seu dimensionamento, sua localização em planta e na vertical e sua operação. Dado o exposto, e que a tendência mundial é aumentar a demanda por água e energia (WWAP, 2014), deve-se buscar a maximização da vida útil dos reservatórios, pois a construção de novos empreendimentos é muito custosa, enfrenta barreiras ambientalistas e depende da existência de locais adequados para sua implantação – os quais se mostram

cada vez mais escassos (SHEN, 1999). A otimização do emprego dos descarregadores de fundo, portanto, se apresenta como uma forma de alcançar este objetivo.

Um descarregador de fundo tradicional exerce, em geral, efeito sobre uma região muito restrita, formando um cone de erosão a montante (MESHKATI et al., 2010). A existência de um descarregador de fundo que tenha maior alcance na direção paralela ao barramento promoveria a recuperação de um volume maior e permitiria mais liberdade na localização de tomadas de água, as quais não teriam que ser dispostas tão próximas da descarga de fundo. O presente trabalho se desenvolve no contexto apresentado com o intuito de avaliar o funcionamento de um novo tipo de descarregador de fundo, composto por um conduto com um orifício de saída e ranhuras através de estudo realizado em modelo físico reduzido.

1.2 Organização do trabalho

O presente capítulo apresenta uma breve introdução ao tema estudado e justifica a importância deste tipo de estudo.

No capítulo 2 se enunciam a questão a ser respondida pela pesquisa e os objetivos perseguidos.

O capítulo 3 apresenta uma revisão bibliográfica do tema sedimentação em reservatórios com ênfase na aplicação dos descarregadores de fundo como ferramenta de controle da acumulação de sedimentos, contextualizando as ferramentas teóricas que contribuirão para responder a questão de estudo.

No capítulo 4 se descrevem os materiais e métodos empregados, o modelo físico utilizado, a execução dos ensaios, o tipo de dados obtido e as análises realizadas.

O capítulo 5 apresenta os resultados da análise dos dados experimentais.

No capítulo 6 se realiza uma análise final e se expõem as conclusões do trabalho desenvolvido.

O capítulo 7 apresenta recomendações para trabalhos futuros baseadas nos resultados obtidos nesta pesquisa.

CAPÍTULO 2: DIRETRIZES DA PESQUISA

2.1 Questão de Estudo

Que alcance de remoção de sedimentos pode oferecer o descarregador de fundo do tipo tubo ranhurado, composto por um conduto com um orifício de saída e ranhuras, posicionado paralelamente ao barramento em relação ao alcance de retirada de sedimentos em um reservatório de água?

2.2 Objetivos

Os objetivos da pesquisa estão classificados em principal e secundário e são descritos a seguir.

2.2.1 Objetivo Principal

O objetivo principal deste trabalho é a verificação do funcionamento de um descarregador de fundo composto por um conduto com um orifício de saída e ranhuras posicionado paralelamente ao barramento, através de dados obtidos de ensaios em um modelo físico experimental.

2.2.2 Objetivo Secundário

O objetivo secundário do trabalho é a elaboração de uma equação e/ou gráfico adimensional que relacione as variáveis mais relevantes no fenômeno de remoção de sedimentos pelo modelo de descarregador de fundo proposto, visando fornecer diretrizes para seu dimensionamento.

2.3 Delimitações

O trabalho delimita-se à análise dos resultados dos ensaios de uma proposta de descarregador de fundo do tipo tubo ranhurado, avaliando as diferenças apresentadas na remoção por meio de quatro diâmetros nominais propostos.

CAPÍTULO 3: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Aspectos Gerais da Sedimentação em Reservatórios

O assoreamento dos reservatórios é inevitável. Quando um rio chega ao reservatório, a área do escoamento aumenta e a declividade da linha de energia decresce, o que ocasiona uma diminuição na velocidade média do fluxo e, por conseguinte, uma diminuição na capacidade de transporte da corrente já que esta é diretamente relacionada àquela. Isso se traduz na deposição de parte da carga sólida que antes era transportada pelo fluxo (SCHLEISS et al., 2016). A sedimentação continua até o leito atingir um novo estado de equilíbrio tal que a vazão sólida afluente iguala a vazão sólida que segue a jusante do barramento. Se chegar a esse estado, o reservatório haverá perdido a maior parte de seu volume (CHI WANG, 2004). A Figura 1 apresenta um exemplo de reservatório totalmente assoreado.

Figura 1: Represa totalmente assoreada e sem sua função original de amortecimento de cheias em Iowa, Estados Unidos (Fonte: adaptado de Healy et al. (1989)).



A carga de sedimentos trazida pelos rios pode ser dividida em duas frações: a carga de lavagem – sedimento fino (silte e argila) gerado pela erosão hídrica na bacia hidrográfica, cuja quantidade transportada não está relacionada às características do escoamento – e a carga de fundo – sedimento grosso (em geral areia) que compõe o leito do rio, cujo transporte é função das características hidráulicas da corrente (MAHMOOD, 1987). A ocorrência ou não de movimento das partículas pode ser avaliado pelo número de Shields

$$\tau_* = \frac{\tau_0}{(\gamma_s - \gamma)d} \quad (1)$$

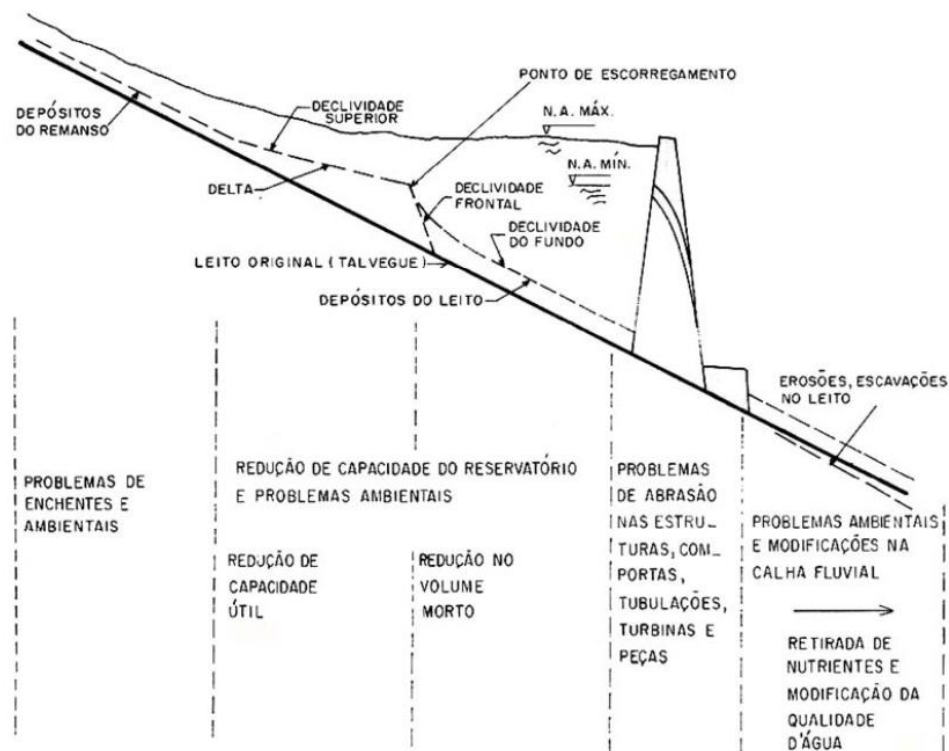
onde τ_* é o número de Shields, τ_0 é a tensão de cisalhamento junto ao leito, γ_s é o peso específico da partícula, γ é o peso específico de fluido e d é o diâmetro da partícula. Para escoamento em regime turbulento, valores de τ_* superiores a aproximadamente 0,06 sugerem movimento das partículas e valores inferiores indicam que não há movimento. O numerador representa a força motriz do movimento do sedimento e o denominador representa a força resistente ao movimento (MARTINS, 2012).

A sedimentação em reservatórios se dá de diferentes formas. Primeiramente se deposita a fração de granulometria mais grossa da carga de fundo na zona de remanso que se gera nos afluentes do reservatório (WALLING, 2007). Em seguida, na desembocadura do rio no lago, forma-se um delta de material arenoso que avança em direção ao barramento com o passar do tempo e com a variação dos níveis do reservatório (STRAND; PEMBERTON, 1982). Devido a seu diminuto tamanho, as partículas finas somente sedimentam com velocidades baixas do escoamento observadas nas regiões mais profundas do lago. Além disso, seu processo de sedimentação está mais relacionado às interações físico-químicas entre partículas que a seu diâmetro, ou seja, entram em jogo a química da água e a mineralogia das partículas de silte e argila (MAHMOOD, 1987). Contudo, de modo ge-

ral, o sedimento mais fino se deposita nas partes mais profundas do reservatório e mais próximas do barramento, o que o torna o principal responsável pelos problemas de assoreamento de tomadas de água. A Figura 2 apresenta esquematicamente a distribuição dos depósitos de sedimento.

Figura 2: Perfil longitudinal esquemático da localização dos depósitos de sedimento em um reservatório

(Fonte: adaptado de Carvalho et al. (2000)).



Além da perda de volume útil e assoreamento de tomadas de água, o assoreamento do reservatório pode ameaçar a segurança da barragem como destacado por Kondolf et al. (2014) (Figura 3). Ademais, a retenção de sedimentos como um todo causa erosão a jusante da barragem já que o sedimento que originalmente era transportado pelo rio fica retido no reservatório (WALLING, 2007). Descrições detalhadas dos proble-

mas advindos da sedimentação em reservatórios podem ser vistos em Mahmood (1987) e Wallig (2007).

Figura 3: Sequência fotográfica da represa Barlin: (a) antes de sua colmatção (10/2002), (b) assoreada (07/2007) e (c) depois de seu rompimento (09/2007) (Fonte: adaptado de Kondolf et al. (2014)).



A conservação do volume do reservatório, nomeadamente, prevenir ou remediar a sedimentação, pode passar por diversas medidas divididas em três categorias segundo Mahmood (1987): redução do aporte de sedimentos ao reservatórios, utilizar a capacidade do escoamento para manter o sedimento em suspensão e conduzi-lo através do reservatório, remoção de sedimento já depositado. Dentre as múltiplas opções apresentadas, dá-se ênfase ao uso de descarregadores de fundo (uma medida de remoção do sedimento já depositado) a partir da próxima seção deste trabalho.

A aplicação de uma ou outra medida depende da estimacão da quantidade de sedimento que se acumulará ao longo da vida útil do empreendimento. É necessário, portanto,

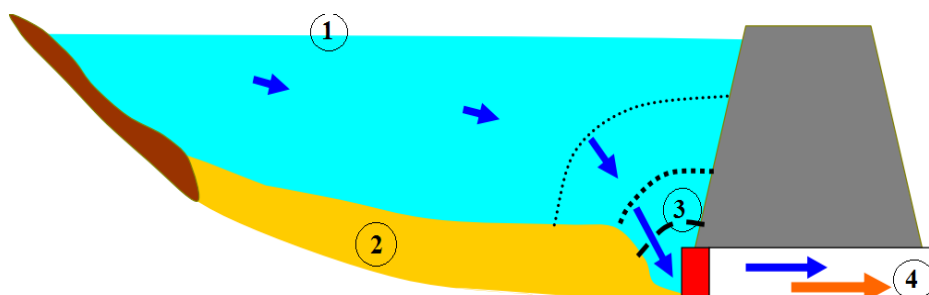
conhecer a quantidade de sedimento aportada anualmente, que quantia é retida, como os depósitos se distribuem e que espessura e densidade terão ao fim de um dado período. Estas questões são tradicionalmente respondidas através da aplicação de métodos empíricos e modelagem numérica (HAI CHEN; L. LOPEZ; V. RICHARDSON, 1978).

3.2 Descarregadores de Fundo

3.2.1 Generalidades

Descarregadores de fundo são amplamente utilizados no controle da sedimentação de reservatórios. Sua aplicação não é recente, tendo sido adotada há mais de seis décadas em reservatórios ao redor do planeta (CHAUDHRY; REHMAN, 2012). Seu uso mais antigo registrado data do século XVI na Espanha (BRANDT, 2000). Basicamente, consistem em um conduto transversal ao barramento posicionado cerca do fundo do reservatório e da fundação da barragem como mostra a Figura 4.

Figura 4: 1: reservatório, 2: depósito de sedimentos, 3: erosão causada pelo descarregador, 4: descarregador de fundo (Fonte: adaptado de Peteuil et al. (2013)).

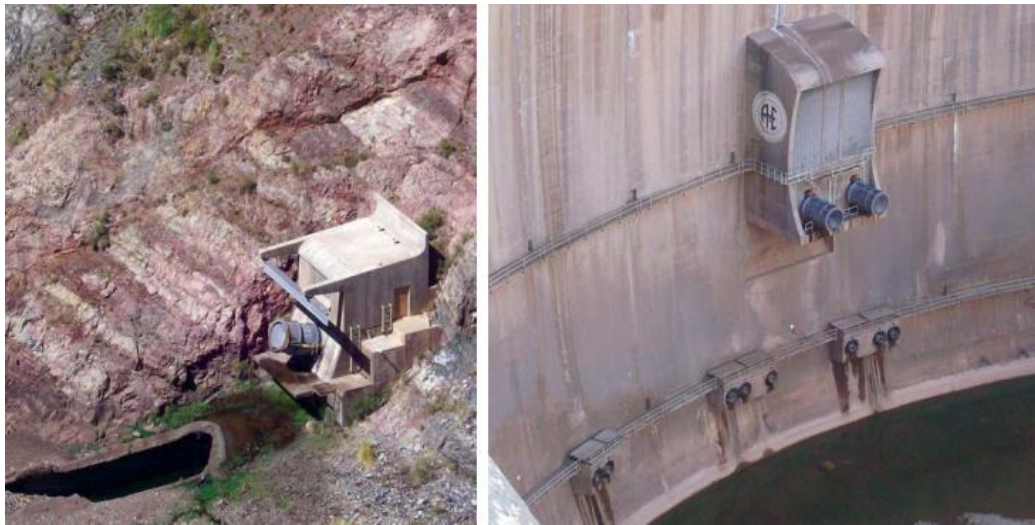


De acordo com Amirsayafi (2015), os descarregadores de fundo estão entre as estruturas mais importantes de uma represa, tendo importância na segurança da barragem e

na regulação dos níveis do reservatório. Não tendo em conta a remoção de sedimentos, o autor destaca que suas principais funções são: esvaziamento do reservatório para manutenção e inspeção, evacuação de emergência para reduzir os esforços sobre o corpo da barragem, permitir a passagem de água para jusante durante o primeiro enchimento do reservatório quando o vertedouro e outras tomadas de água ainda não podem ser utilizadas devido ao baixo nível da água, evacuação de cheias durante a construção do barramento, auxiliar o vertedouro na evacuação de cheias extraordinárias.

Ainda segundo o mesmo autor, alguns possíveis problemas devem ser considerados durante o projeto deste tipo de estrutura durante seu funcionamento sob pressão: cavitação devida à alta velocidade do escoamento, erosão das paredes do conduto devida à presença de sedimentos, erosão a jusante do descarregador, corrosão e travamento das comportas que vedam o conduto devidos a longos períodos sem funcionamento e manutenção. A erosão a jusante do descarregador de fundo pode ser mitigada com estruturas de dissipação de energia tais como as válvulas do tipo jato oco (Howell-Bunger) como mostram a Figura 5, a qual apresenta os descarregadores de fundo da represa Agua del Toro sobre o rio Diamante, Argentina (LÓPEZ; RODRIGUEZ; DÖLLING, 2011).

Figura 5: Descargas de fundo da represa argentina Agua del Toro. À esquerda nota-se a existência de uma fossa de erosão apesar da presença de uma válvula dissipadora (Fonte: adaptado de López, Rodriguez e Dölling (2011)).



Para estimar a capacidade transporte de sedimentos da descarga de fundo como conduto forçado (Figura 6) pode-se consultar o trabalho de Huygens e Tito (1994), que avalia o transporte de misturas de materiais coesivos e não-coesivos em escoamentos sob pressão. Quando a operação for à superfície livre, a capacidade de transporte pode ser estimada com equações tradicionais de transporte de sedimento em canais.

Figura 6: Descarregadores de fundo da represa Dez (Irã) em funcionamento (Fonte: adaptado de Emamgholizadeh et al. (2006)).



A vazão transportada pelos descarregadores pode ser estimada com as equações clássicas da hidráulica para o funcionamento de orifícios. Exemplos de critérios de projeto e execução de descargas de fundo podem ser encontrados em Sayah et al. (2016), publicação que trata dos descarregadores da represa Cerro del Águila no Peru (Figura 7).

Figura 7: Descarregadores de fundo com seção transversal retangular da represa Cerro del Águila. Sua função é de evacuar cheias durante a construção do barramento e eliminar sedimento quando da operação do reservatório (Fonte: adaptado de Sayah et al. (2016)).



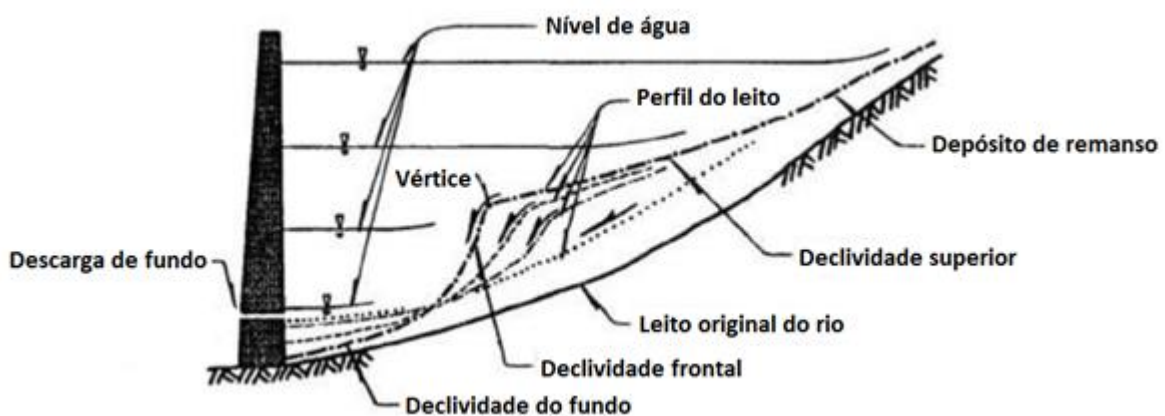
O uso de descarregadores de fundo como medida de mitigação da sedimentação em reservatórios se dá sob duas condições possíveis: com rebaixamento do nível de água, também conhecido como *drawdown flushing*, ou sem o rebaixamento do nível de água, situação conhecida como *pressure flushing* (SHEN, 1999).

3.2.2 Drawdown Flushing

Drawdown flushing consiste em erodir depósitos de sedimento e transportá-los para jusante através do esvaziamento do reservatório, resultando em escoamento à superfície livre no descarregador de fundo em todo seu comprimento (KONDOLF et al., 2014).

Quando se procede à abertura dos descarregadores, há uma concentração do escoamento ao redor da estrutura e o depósito é erodido localmente. Esta é a prática de *pressure flushing* que será descrita em 3.2.3. Contudo, a velocidade do escoamento decresce em direção a montante mais rapidamente que o quadrado da distância. Por este motivo, a erosão decorrente desta prática somente afeta uma região restrita às cercanias do descarregador (MAHMOOD, 1987). Assim que estes depósitos são removidos, a ação erosiva cessa a menos que se rebaixe o nível do reservatório de maneira que a velocidade aumente em outras regiões a montante e o escoamento seja capaz de erodir maior área do depósito (WHITE, 1990). Se o nível é rebaixado, inicia-se um processo de erosão regressiva que se propaga para montante erodindo um canal nos depósitos de sedimento (N. TALEBBEYDOKHTI; NAGHSHINEH, 2004). O rebaixamento do nível também aumenta as velocidades no extremo de montante do reservatório, o que promove a erosão do delta arenoso e faz com que o mesmo se mova em direção ao barramento, ou seja, uma erosão progressiva que também termina por induzir a formação do referido canal de erosão (BRANDT, 2000). O processo está exemplificado na Figura 8.

Figura 8: Esquema do perfil longitudinal de erosão causado pelo *drawdown flushing*: à medida que a superfície da água descende, a erosão regressiva remove o sedimento depositado (Fonte: adaptado e traduzido de Lai e Shen (1996)).



A técnica *drawdown flushing* tem sido estudada por diversos autores através de modelagem física e matemática. Um dos primeiros estudos na área foi realizado por Williams (1965, apud BRANDT, 2000). Lai e Shen (1996) relacionaram as características do escoamento no canal erodido com a vazão conduzida pelos descarregadores a partir de estudos em modelos físicos reduzidos, chegando a resultados condizentes com os evidenciados por Atkinson (1996) em função de dados medidos em reservatórios reais.

Petitejan et al. (1996, apud BRANDT, 2000) afirmam que somente modelos tridimensionais podem simular apropriadamente o transporte de sedimentos durante o esvaziamento do reservatório. Entretanto, modelos uni e bi dimensionais tem sido efetivamente aplicados no estudo do fenômeno (LAI, 1994, apud SHEN, 1999). Castillo, Carrillo e Álvarez (2015) apresentam o estudo do funcionamento dos descarregadores de fundo de uma represa no rio Paute (Equador) baseado em simulações uni, bi e tridimensionais e demonstram a aptidão da complementação de métodos para a solução de um problema tão complexo.

É unanimidade nas referências consultadas que *drawdown flushing* é mais eficiente que *pressure flushing*. Todavia, este método apresenta os inconvenientes de requerer o esvaziamento de reservatório, o que restringe sua utilização para os fins para que foi construído, e de ser um processo que pode durar meses (KONDOLF et al., 2014; MAHMOOD, 1987). Ademais, não existe um critério único para avaliar a eficiência da operação. De forma geral, deve-se buscar a maior remoção de sedimentos descartando a menor quantidade de água no menor tempo. Diversos autores propuseram equações para estimar a eficiência, as quais dependem do volume recuperado, volume de água utilizado, tempo gasto no processo e concentração dos sedimentos. Aion (2018) apresenta uma compilação de ditas equações.

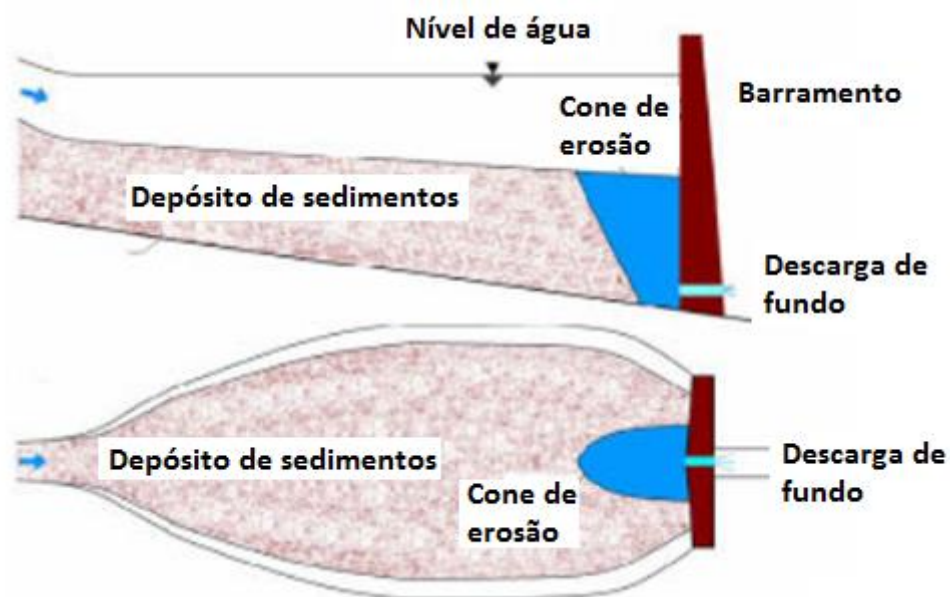
Esta prática tem sido mundialmente empregada com êxito (KONDOLF et al.,2014). Uma compilação de casos de aplicação da técnica pode ser encontrada em Chaudhry e Rehman (2012).

3.2.3 Pressure Flushing

Pressure flushing consiste na operação de descarregadores de fundo sem o rebai-xamento do nível do reservatório com o intuito de remover sedimentos de áreas contíguas ao barramento. Diferentemente do *drawdown flushing*, que recupera volume perdido para depósitos de sedimentos ao erodi-los como um rio, neste caso a operação dos descarrega-dores serve somente para remover sedimentos das imediações de tomadas de água (KONDOLF et al., 2014). Como é menos eficiente, este método é menos difundido e a bibliografia sobre o tema é mais limitada.

O fenômeno se apresenta como na Figura 10: forma-se um cone, cava ou fossa de erosão criada pela alta velocidade do escoamento na região próxima à abertura do descar-regador de fundo (MESHKATI SHAHMIRZADI et al., 2010).

Figura 10: Representação esquemática do cone de erosão gerado pelo descarregador de fundo (Fonte: adaptado e traduzido de Meshkati et al. (2010)).

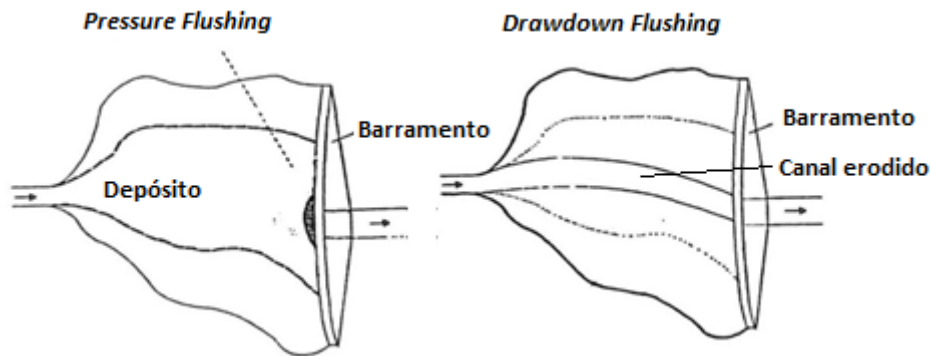


O Quadro 1 e a Figura 11 comparam os tipos de operação de descargas de fundo.

Quadro 1: Comparação entre os métodos de *pressure* e *drawdown flushing*.

<i>Drawdown Flushing</i>	<i>Pressure Flushing</i>
Esvaziamento do reservatório (perda de volume armazenado).	Sem esvaziamento do reservatório.
Grande remoção de sedimentos.	Pouca remoção de sedimentos.
Formação de um canal similar ao traçado original do rio que forma o reservatório.	Formação de um cone de erosão.
Desassoreamento de tomadas d'água e recuperação de parte do volume do reservatório.	Somente desassoreamento de tomadas d'água.
Escoamento à superfície livre.	Escoamento sob pressão.

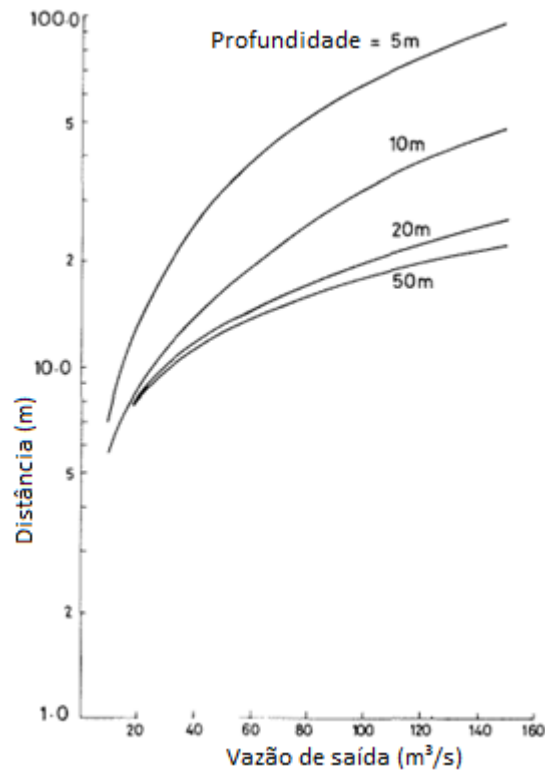
Figura 11: Comparação entre os resultados obtidos com as duas técnicas de *flushing* (Fonte: adaptado e traduzido de Shen (1999)).



Scheuerlein (2004, apud EMAMGHOLIZADEH et al., 2006) afirma que o tratamento analítico do problema é complicado devido ao forte caráter tridimensional e ao alto número de parâmetros envolvidos no escoamento nas cercanias do descarregador de fundo. A pesquisa na área, então, dá-se através de modelos físicos reduzidos, majoritariamente, e modelos matemáticos. A seguir são descritos os resultados dos estudos relacionados ao tema encontrados nas referências consultadas e que servem como orientação para o presente trabalho. Embora em cada publicação as relações adimensionais variem enquanto a alguns dos parâmetros utilizados, todos os estudos consultados coincidem que existe uma relação entre as dimensões do cone de erosão e a coluna de água sobre o depósito.

Brandt (1999) menciona que um dos primeiros estudos sobre *pressure flushing* foi o desenvolvido por Zhang et al. (1976, apud BRANDT, 1999). White e Bettess, (1984) apresentaram um gráfico para o cálculo do alcance da fossa de erosão em função da profundidade do reservatório e da vazão evacuada pelos descarregadores de fundo (Figura 12). Os autores consideraram o escoamento de um fluido invíscido e a velocidade crítica para o início da erosão do depósito igual a 0,1 m/s próximo ao fundo.

Figura 12: Alcance de remoção de sedimentos, adaptado e traduzido de White e Bettes (1984).



Emamgholizadeh et al. (2006) realizaram ensaios em um canal retangular de laboratório variando a granulometria dos sedimentos, a coluna de água sobre o depósito e as vazões conduzidas pelo descarregador de fundo para analisar a influência destes no volume de sedimento retirado pela operação do descarregador de fundo. Constatou-se que o volume erodido aumenta com a diminuição da profundidade e com o aumento da vazão evacuada. A equação obtida é

$$\frac{V^{1/3}}{H_s} = 0,6139 \left(\frac{u}{\sqrt{gH_w}} \right)^{0,0062} \left(\frac{H_s}{d_s} \right)^{0,05} \left(\frac{H_s}{H_w} \right)^{0,0036} \quad (2)$$

onde V é o volume erodido, H_s é a espessura do depósito de sedimento (m), u é a velocidade média no descarregador de fundo (razão entre vazão e área, m/s), g é a aceleração da

gravidade (m/s^2), H_w é a profundidade da água (m/s), e d_s é o diâmetro do sedimento (m). O segundo termo do lado direito da equação é o número de Froude (F_r) do descarregador de fundo (adm.). Ao final, os autores recomendam que a operação seja executada com o menor nível de água possível no reservatório e com a maior vazão possível dos descarregadores.

Meshkati et al. (2009) pesquisaram, em modelo físico reduzido, a evolução temporal do cone de erosão durante o processo de *pressure flushing*. Com isso, obtiveram equações que relacionam a profundidade, a largura e o comprimento da cava com a duração da operação e evidenciaram sua relação com o número de Froude do descarregador de fundo.

Meshkati et al. (2010) realizaram ensaios semelhantes aos de Emamgholizadeh et al. (2006), mas variando o diâmetro do descarregador de fundo em vez do diâmetro do sedimento. Como resultado, obtiveram as equações

$$\frac{V}{H_w^3} = 0,042(F_r)^{0,149} \left(\frac{H_s}{H_w}\right)^{3,082} \left(\frac{A}{H_w^2}\right)^{0,174} \quad (3)$$

$$\frac{W}{H_w} = 0,031(F_r)^{0,104} \left(\frac{H_s}{H_w}\right)^{0,733} \left(\frac{A}{H_w^2}\right)^{0,146} \quad (4)$$

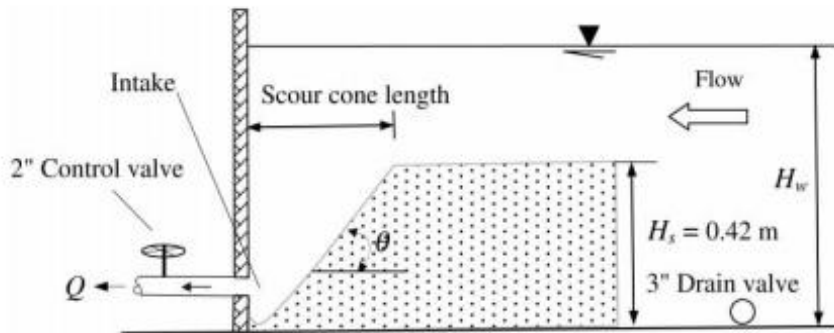
$$\frac{L}{H_w} = 0,031(F_r)^{0,104} \left(\frac{H_s}{H_w}\right)^{0,733} \left(\frac{A}{H_w^2}\right)^{0,146} \quad (5)$$

onde L é o comprimento da cava (dimensão paralela ao eixo do descarregador, m), W é a largura da cava (dimensão perpendicular ao eixo do descarregador, m) e A é a área do escoamento no descarregador (m^2). Os autores destacam que o diâmetro (área) do descarregador tem grande influência nas dimensões do cone de erosão. Ademais, a influência do diâmetro seria maior quanto maior for a altura da coluna de água.

Fathi-Moghadam et al. (2010) levaram a cabo pesquisa semelhante às recém descritas. O aparato experimental se pode visualizar na Figura 13. Os resultados indicaram que a

coluna de água é o parâmetro mais significativo para a iniciação do movimento das partículas de sedimento devido ao gradiente de pressão através do descarregador e do depósito, ao passo que a velocidade no descarregador de fundo é o parâmetro determinante das dimensões finais da cava de erosão.

Figura 13: Aparato experimental utilizado por Fathi-Moghadam et al. (2010).



As equações obtidas foram

$$\frac{V^{1/3}}{D} = 5,28 \left(\frac{u}{\sqrt{g(G_s-1)d_{50}}} \right)^{0,10} \left(\frac{H_s}{H_w} \right)^{-0,046} \quad (6)$$

$$\frac{L}{D} = 8,19 \left(\frac{u}{\sqrt{g(G_s-1)d_{50}}} \right)^{0,10} \left(\frac{H_s}{H_w} \right)^{-0,033} \quad (7)$$

nas quais D é o diâmetro do descarregador (m), G_s é a densidade (adm.) do sedimento e d_{50} é o diâmetro médio do sedimento não-coesivo (m). À diferença das equações apresentadas anteriormente, nestas o segundo termo do membro direito da equação é uma forma modificada do parâmetro adimensional de Shields, o qual representa a relação entre as forças motoras e resistentes do movimento de sedimentos. Tendo-se em conta que se está modelando escoamento sobre fundo móvel, é desejável ter em conta o Número de Shields, que é em-

pregado como critério de semelhança na modelagem física de transporte de sedimentos (MARTINS, 2012). Os autores também destacam que se observou pouca diferença entre as declividades do cone longitudinais e transversais ao escoamento, sendo a declividade longitudinal entre 2 e 6% maior.

Emamgholizadeh e Fathi-Moghdam (2014) realizam experimentos muito similares aos de Fathi-Moghadam et al. (2010), contudo, utilizando sedimento coesivo extraído de depósitos do reservatório da represa Dez (Irã) com diferentes densidades. A modelagem física reduzida enfrenta problemas quando se necessita reduzir a escala geométrica de sedimentos. No caso de se querer modelar sedimentos de natureza não-coesiva, a redução de tamanhos para o modelo pode levar a diâmetros muito pequenos, os quais podem apresentar coesão e assim perder a semelhança física entre protótipo e modelo (MARTINS, 2012). Os processos de erosão de sedimentos coesivos e não-coesivos não são iguais, de maneira que ao realizar os ensaios com sedimento coesivo, os autores tentam aproximar-se mais da realidade. Uma das principais diferenças é que resistência à erosão de depósitos de sedimento coesivo aumenta com sua consolidação e, conseqüente, aumento de densidade (MAHMOOD, 1987). De fato, os resultados apresentados indicam que a densidade do sedimento coesivo é um parâmetro definidor da geometria final do cone de erosão. As equações obtidas são

$$\frac{V}{D^3} = 0,99 \left(\frac{H_s}{H_w} \right)^{0,59} \left(\frac{\rho_{wb} - \rho}{\rho_s} \right)^{-2,85} \quad (8)$$

$$\frac{L}{D} = 0,33 \left(\frac{H_s}{H_w} \right)^{0,40} \left(\frac{\rho_{wb} - \rho}{\rho_s} \right)^{-1,44} \quad (9)$$

onde ρ_w é a massa específica da água (kg/m^3), ρ_s é a massa específica das partículas de sedimento coesivo (kg/m^3) e ρ_{wb} é a massa específica do sedimento coesivo umedecido (kg/m^3).

Abreu et al. (2016) realizaram ensaios com o intuito de estabelecer critérios para a operação de descargas de fundo convencionais (condutos circulares transversais ao barramento e com extremo de montante no paramento de montante do mesmo) em pequenas barragens e relacionaram os resultados baseando-se na seguinte relação

$$\frac{V}{D^3} \times \rho_s = f\left(\frac{H_s}{H_w}, \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w}\right) \quad (10).$$

As Figuras 14 e 15 apresentam os resultados dos ensaios. Evidenciou-se a relação entre o volume de sedimentos removido e a razão H_s/H_w já demonstrada pelos autores anteriormente citados e a maior dispersão dos volumes referentes a ensaios realizados com borracha. Os autores associam este fato à menor densidade da borracha em relação à areia e ao carvão. A maior dispersão observada na borracha pode se dever à maior variação da densidade da borracha já que o processamento desse material pode ser feito a partir de diferentes fontes (pneus diferentes, por exemplo).

Figura 14: Relação entre o volume erodido, o diâmetro do descarregador, a massa específica do material, a profundidade e a espessura do depósito (Fonte: Abreu et al. (2016)).

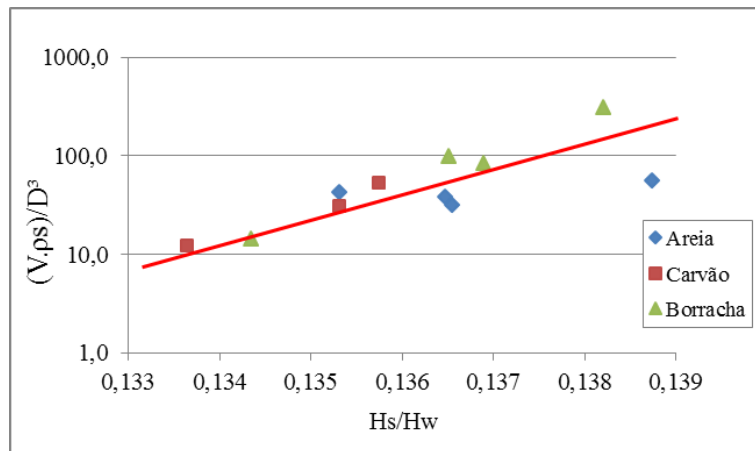
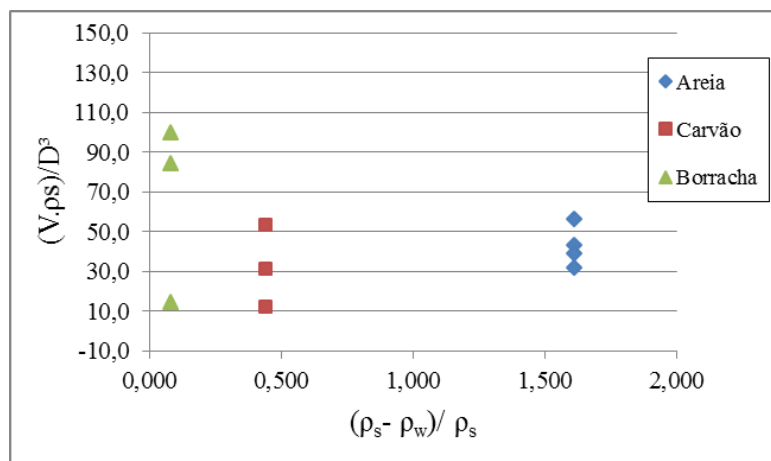
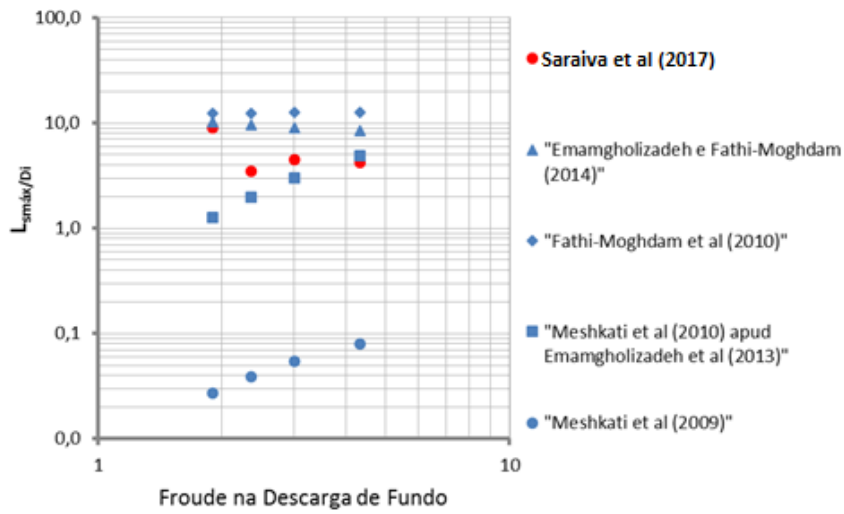


Figura 15: Relação entre o volume erodido, o diâmetro do descarregador e a densidade do material (Fonte: Abreu et al (2016)).



Saraiva et al. (2017) estudaram a previsão do alcance da remoção de sedimentos, o comprimento da fossa de erosão, utilizando grãos de borracha de densidade 1,08. Os resultados preliminares apresentados podem ser visualizados na Figura 16. Relaciona-se a razão entre o comprimento do cone de erosão e o diâmetro da descarga de fundo com o número de Froude e compara-se com os resultados obtidos por outros autores.

Figura 16: Comparação entre os resultados de Saraiva et al. e os de outros autores (Fonte: adaptado de Saraiva et al., 2017).



Abreu et al. (2017) avaliaram o alcance da remoção de um descarregador de fundo utilizando grãos de borracha como sedimento. O resultado é o gráfico adimensional apresentado na Figura 17, que relaciona o diâmetro do descarregador de fundo, o comprimento da fossa de erosão, o número de Froude da descarga de fundo e a altura de sedimento acima da geratriz inferior do descarregador (Figura 18).

Figura 17: Gráfico adimensional que relaciona as dimensões da cava com as características do escoamento e do descarregador de fundo (Fonte: adaptado de Abreu et al., 2018).

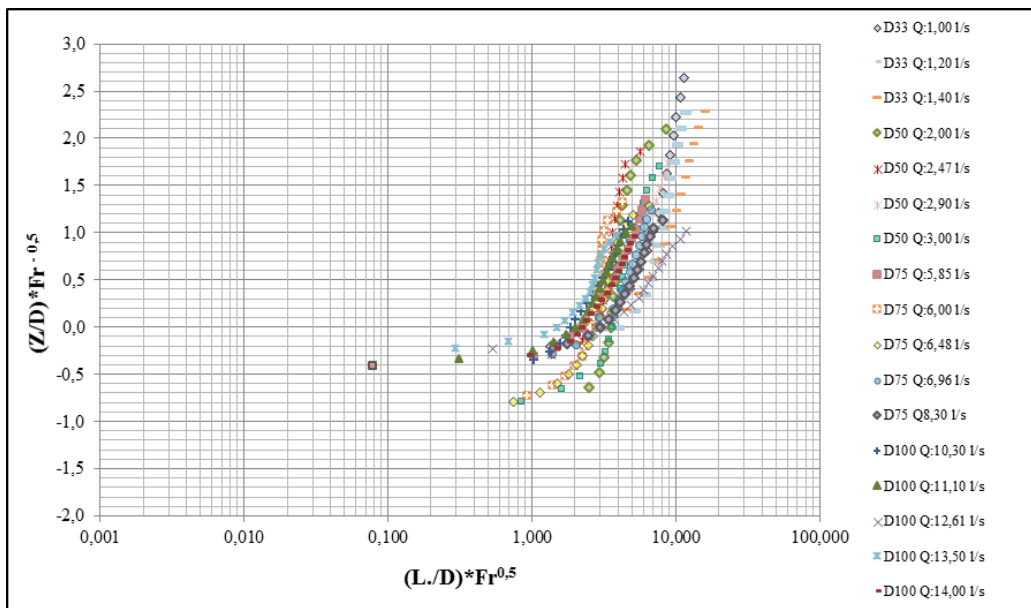
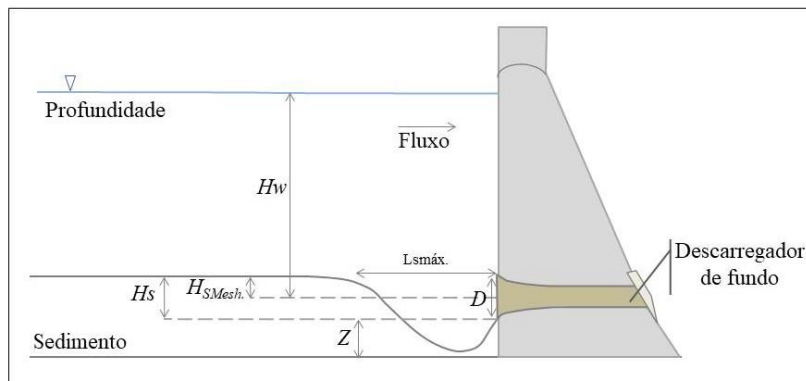
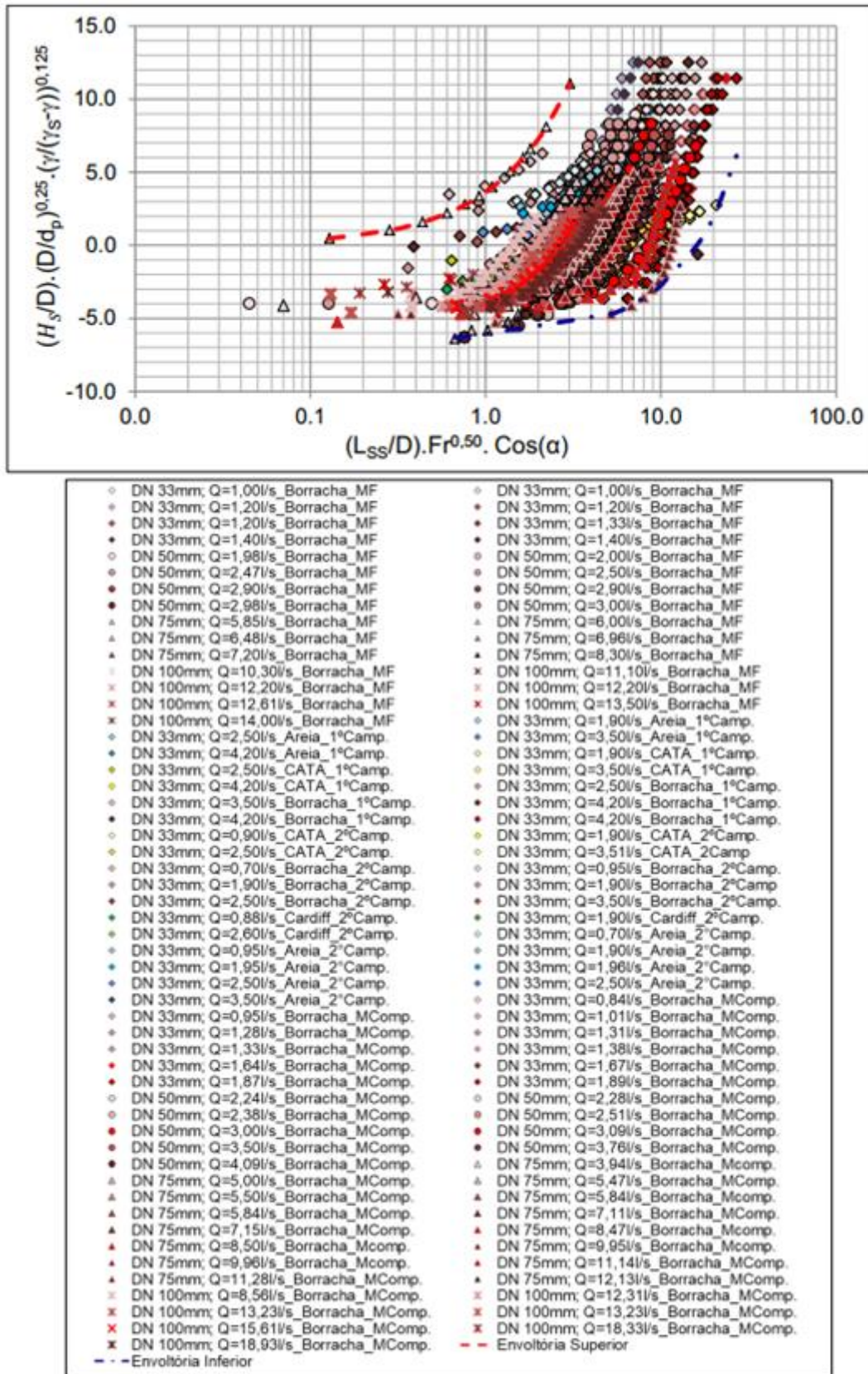


Figura 18: Esquema das dimensões consideradas por Abreu et al. (2018).



Abreu (2019) conduziu ensaios com diferentes materiais como sedimento (areia, carvão, borracha processada) em três modelos físicos; evidenciando a influência de variáveis como o diâmetro e a densidade das partículas, o diâmetro da descarga de fundo e a carga hidráulica nas dimensões finais das fossas de erosão. Além disso, propôs um adimensional em função dos diversos ensaios realizados (Figura 19).

Figura 19: Adimensionalização proposta por Abreu (2019) para a determinação do alcance máximo de remoção para os três modelos estudados.

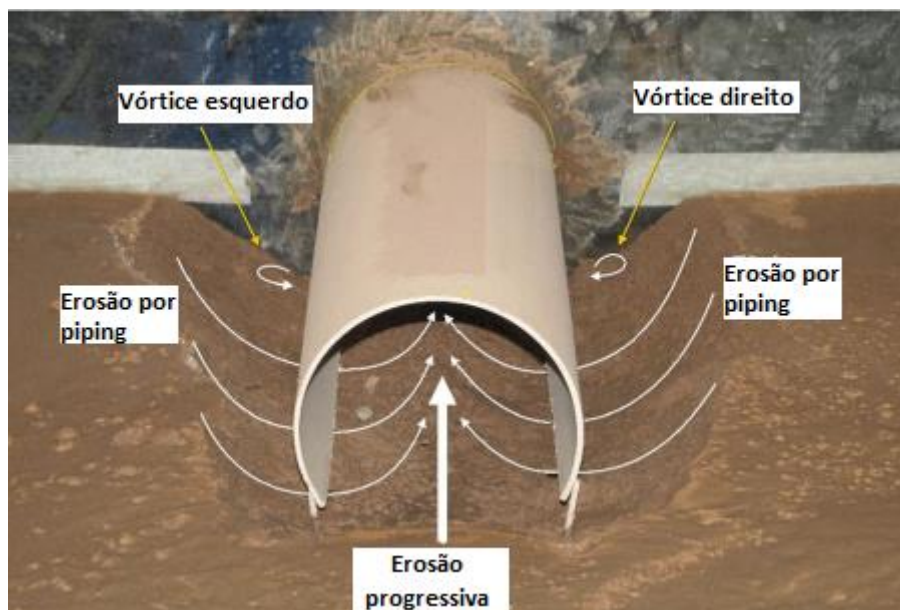


De maneira geral, destaca-se que a forma da cava de erosão é sempre a de um cone e que a parte superior do mesmo constitui um semicírculo. Além disso, essa geometria independe do tipo de material que compõe o depósito de sedimentos, do diâmetro do descarregador e do nível do reservatório (ABREU, 2019; ABREU et al., 2016, 2018; SARAIVA et al., 2017).

A quase totalidade dos estudos encontrados foram realizados com descarregadores de fundo tradicionais: um conduto de seção transversal circular perpendicular ao paramento de montante da barragem. Somente o recente trabalho publicado por Madadi, Rahimpour e Qaderi (2017) trata de uma configuração distinta da tradicional (Figura 20): consiste em um conduto de seção semicircular voltada para o leito. Constatou-se grande influência do diâmetro da estrutura semicircular na geometria da cava de erosão e um aumento na eficiência de remoção de sedimentos em comparação com descargas de fundo convencionais.

Figura 20: Descarga de fundo composta por conduto semicircular

(Fonte: adaptado e traduzido de Madadi, Rahimpour e Qaderi (2017)).



Em relação às pesquisas encontradas na literatura até o presente momento, o novo modelo proposto para a estrutura de descarga de fundo mostra-se inovador quando comparado aos descarregadores tradicionalmente empregados em barragens. Essa configuração foi concebida pelo Laboratório de Obras Hidráulicas (LOH) do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) no âmbito do projeto “Avaliação do Aporte de Sedimentos em Reservatórios Visando Aumento da Disponibilidade Hídrica” executado pelo IPH-UFRGS com apoio financeiro da FINEP. Além do conceito da estrutura, este trabalho utiliza resultados de ensaios já realizados com este tipo de descarga de fundo durante o projeto mencionado.

CAPÍTULO 4: MATERIAIS E MÉTODOS

O descarregador de fundo estudado consiste em um conduto com ranhuras transversais que se estende paralelamente ao barramento (Figura 21). Esta configuração visa um alcance de remoção maior paralelamente à barragem. A utilidade deste tipo de estrutura é, basicamente, permitir o posicionamento de tomadas de água mais distantes do ponto no qual o descarregador cruza o barramento. Em diversos casos convém locar a tomada de água cerca de alguma das ombreiras, onde a profundidade geralmente é menor que na região da calha original do rio. A descarga de fundo, por sua vez, geralmente é disposta na região mais profunda do leito original do rio já que necessita de carga (profundidade de água) a montante para funcionar. Assim sendo, esta geometria concebida pelo LOH permitiria desassorear tomadas de água mais distantes das regiões mais profundas da barragem e mais propensas ao assoreamento.

Figura 21: Novo tipo de descarregador de fundo concebido pelo LOH.



O modelo físico experimental empregado neste trabalho foi instalado no LOH. Outras pesquisas como a realizada por Saraiva et al. (2017), Abreu et al. (2018) e Abreu (2019) foram desenvolvidas com a mesma instalação.

O experimento consiste basicamente em reproduzir o fenômeno de remoção de sedimentos de um reservatório dotado de uma descarga de fundo tipo tubo ranhurado junto à parede que representa o paramento de montante de uma barragem. Após o término dos ensaios, a batimetria gerada no depósito de sedimentos foi medida com uma trena a laser e com um sensor de escaneamento 3D.

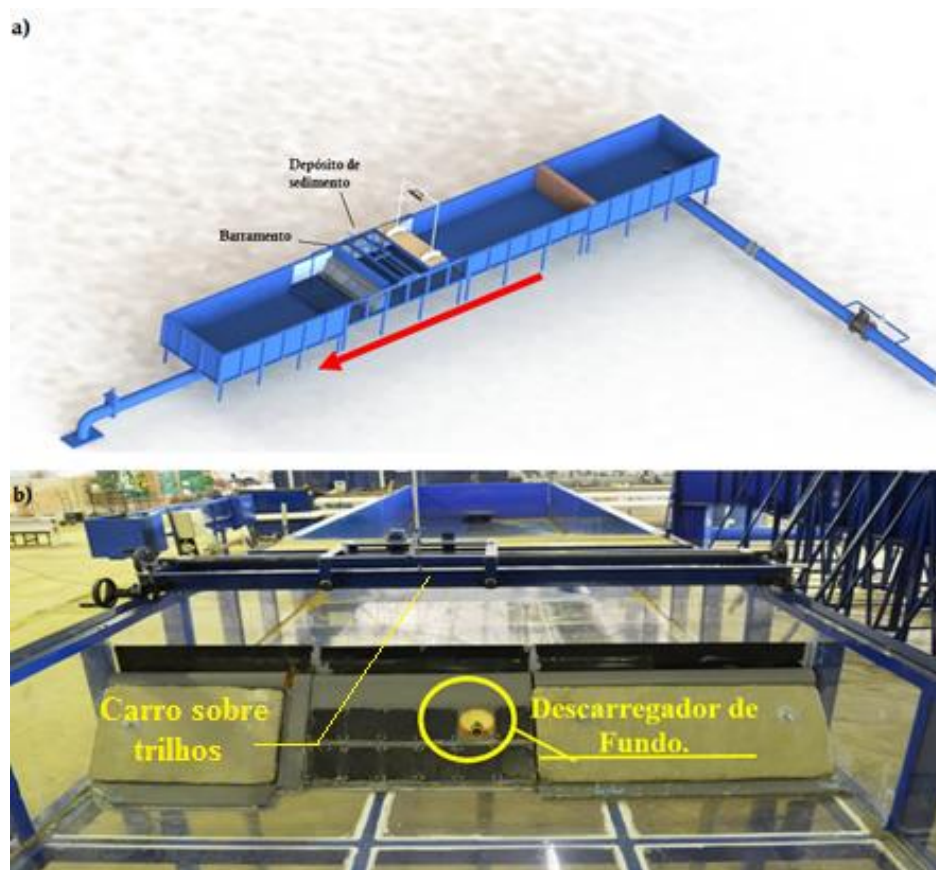
4.1 Aparato Experimental

4.1.1 Canal de Ensaio

A Figura 22 apresenta uma perspectiva esquemática do modelo físico utilizado. Um canal metálico de dimensões 8,8 m de comprimento, fundo horizontal e seção transversal de 2 m de largura por 0,6 m de altura. O modelo é alimentado por uma bomba que extrai água de um reservatório subterrâneo. A vazão ingressa no canal e atravessa um tranquilizador que tem a finalidade de uniformizar o fluxo. A jusante do tranquilizador se localiza o depósito de sedimento, o qual consiste em uma camada de superfície superior horizontal com um talude voltado para montante. A montante do modelo foram dispostos dois registros gaveta e dois medidores eletromagnéticos de vazão da marca Krohne Conaut, modelo Optiflux 2000F, sendo que um mede vazões de até 15 m³/h e o outro até 500 m³/h com precisão de $\pm 0,1\%$. A água que sai é conduzida novamente ao reservatório subterrâneo em circuito fechado. Para esvaziar o canal ao término de um ensaio e realizar as medições pertinentes, desliga-se a bomba e se permite o regresso lento da água pela mesma tubulação

por onde entrou, de maneira a não afetar a fossa de erosão gerada. O sedimento removido é capturado a jusante do barramento por uma rede e uma caixa. O canal dispõe de um carro sobre trilhos (Figura 22 b) usado para efetuar a medição da batimetria do depósito de sedimentos. Duas escalas centimétricas foram coladas sobre o barramento e a parede da margem direita a fim de permitir a localização das coordenadas x e y dos pontos em que se meça a batimetria.

Figura 22: Esquema do modelo físico (a). A seta vermelha indica o sentido do escoamento. Vista de jusante da saída do descarregador de fundo (b) (Fonte: adaptado de Abreu et al. (2018)).



4.1.2 Descarregador de Fundo

A Figura 23 apresenta a estrutura analisada: tubos de PVC, de diferentes diâmetros, com ranhuras transversais conectados a um joelho que se acopla à parede do canal metálico.

Figura 23: Peças de PVC empregadas nos ensaios.

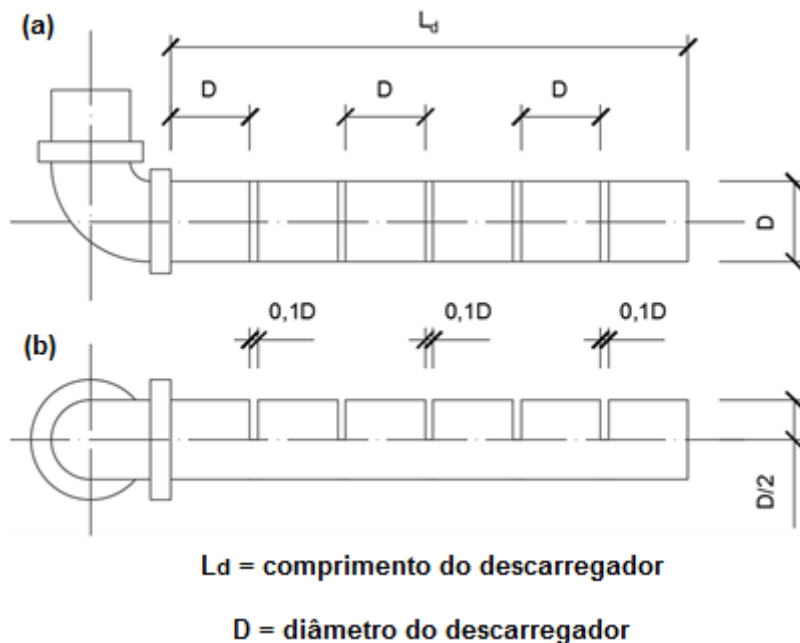


Paralelo à parede que representa o paramento de montante do barramento está posicionado o descarregador de fundo como mostrado na Figura 23. Os comprimentos dos descarregadores foram definidos a partir de ensaios preliminares com o objetivo de evitar que a cava de erosão alcançasse as paredes laterais do canal, ou seja, para que se possa conhecer de fato o alcance de remoção. A forma da ranhura (vertical, estendendo-se desde a geratriz superior até a metade da circunferência) foi escolhida também a partir de ensaios preliminares de modo a evitar o entupimento pelo sedimento. Os diâmetros nominais utilizados foram os diâmetros comerciais de PVC 32, 50, 75 e 100 mm, cujos comprimentos são, respectivamente, 45,4 cm, 75 cm, 49,4 cm e 53,2 cm. A distância entre ranhuras é de

um diâmetro nominal e sua espessura é de 10% do diâmetro nominal (Figura 24). Essa configuração foi definida como a mais adequada também após diversos ensaios preliminares.

Os ensaios preliminares realizados para definir as características das descargas de fundo não foram realizadas por este autor, senão por integrantes do LOH no âmbito do projeto de pesquisa citado anteriormente.

Figura 24: Vista superior (a) e vista frontal (b) do descarregador de fundo.



4.1.3 Sedimento

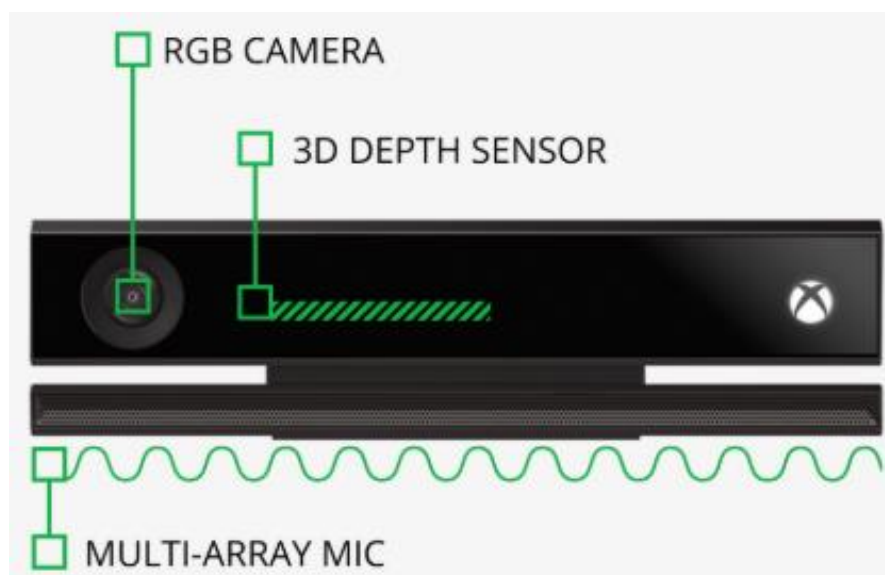
Os sedimentos foram escolhidos de forma a abranger a maior faixa de densidades possível e, assim, poder verificar a influência da densidade no processo de remoção por descargas de fundo. Empregou-se, então, borracha granulada de pneus, de massa específica 1080 kg/m^3 , diâmetro médio $1,18 \text{ mm}$ e fator de forma $0,63$; e areia, de massa específica 2610 kg/m^3 e diâmetro médio $0,71 \text{ mm}$. A espessura do depósito de sedimentos foi de 30 cm . Da mesma forma que com as dimensões das descargas de fundo, a escolha dos sedi-

mentos e a definição de suas características foram realizadas previamente ao presente trabalho.

4.1.4 Escaneamento 3D

Durante a elaboração do trabalho, o LOH adquiriu um exemplar do sensor de escaneamento Kinect® II da *Microsoft Coporation*, o que possibilita a medição da batimetria da cava gerada nos ensaios com muito mais rapidez e detalhe que com a trena a laser. O equipamento possui câmeras de detecção de profundidade, sendo um sensor de infravermelho, uma câmera infravermelha e uma câmera RGB conforme a Figura 25 (KINETISENSE, [s.d.]). A profundidade é obtida com o movimento relativo entre o sensor e o objeto escaneado através de um processo de triangulação. O Kinect® II apresenta precisão de 0,3 mm para uma distância de 1,0 m e de 7,5 mm para uma distância de 4 m (GONZALEZ et al., 2015).

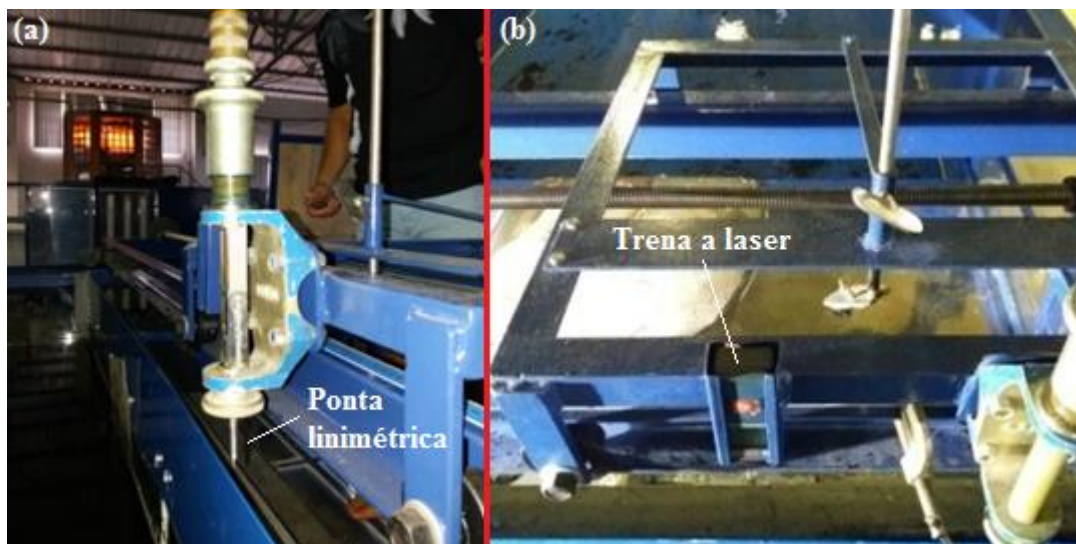
Figura 25: Vista frontal do escâner Kinect® II com câmera RGB e sensor de profundidade (Fonte: adaptado de Kinetisense [s.d.]).



4.1.5 Outros Equipamentos

Para a realização dos ensaios também foram necessários uma ponta linimétrica para a medição da linha de água (Figura 26-a) e uma trena a laser (Figura 26-b) para a medição da batimetria. O levantamento batimétrico realizado com Kinect® requereu um holofote para iluminar a cava e um computador para armazenar e exportar os dados adquiridos pelo equipamento.

Figura 26: Ponta linimétrica (a) e trena a laser (b).



4.2 Plano de Ensaio

Os ensaios com borracha granulada foram executados antes da realização do presente trabalho, portanto, os ensaios com areia foram levados a cabo com as mesmas condições de vazão e nível já ensaiadas para que se possa estabelecer comparação e verificar as diferenças devidas à densidade dos materiais.

A Tabela 1 apresenta as vazões ensaiadas com borracha, previamente a este trabalho, e que representaram condições de contorno nos ensaios com areia. Foram utilizados dados de um ensaio em que se dispôs um CAP na extremidade do descarregador de fundo, estando esse ensaio marcado com um asterisco. A Figura 27 ilustra a descarga de fundo com CAP.

Figura 27: Descarregador de fundo com a extremidade obstruída por um CAP.



As vazões ao fim dos ensaios com areia não resultaram exatamente como o plano de ensaios devido a pequenas variações. Cada ensaio foi repetido ao menos uma vez. As vazões e colunas de água (H_a , distância vertical entre a linha de água e a geratriz inferior do descarregador de fundo, ver Figura 30) efetivamente obtidas ao final de cada ensaio com areia podem ser consultadas na Tabela 2.

A oportunidade de empregar o Kinect® nos experimentos somente ocorreu quando restava apenas repetir um ensaio de DN75 e vazão de 5,20 l/s. Para verificar o desempenho do sensor, decidiu-se realizar mais dois ensaios em DN75 com vazão de 4,00 l/s, aumentando assim a faixa de vazões ensaiadas para esse diâmetro. Porém, não foram executados ensaios para essas condições com borracha granulada. Os ensaios cujas batimetrias foram escaneadas estão assinalados por dois asteriscos.

Tabela 1: Ensaios realizados com borracha processada previamente a este trabalho. Ensaios assinalados com * foram realizados com um CAP na extremidade do descarregador de fundo.

Diâmetro (mm)	Vazão (l/s)	H _a (m)	Diâmetro (mm)	Vazão (l/s)	H _a (m)
50	1,23	0,182	75	5,00*	0,373
50	1,70	0,245	75	5,19	0,379
50	1,70	0,247	75	5,20	0,380
50	2,15	0,395	100	8,60	0,207
50	2,40	0,382	100	8,60	0,248
75	4,39	0,333	100	8,60	0,273
75	4,50	0,305	100	9,00	0,279
75	4,97	0,356	100	9,00	0,294
75	4,99	0,356	100	9,50	0,332
75	5,00	0,363	100	9,50	0,378

Tabela 2: Ensaios realizados com areia. Ensaios assinalados com ** tiveram batimetria realizada com escaneamento 3D.

Diâmetro (mm)	Vazão (l/s)	H _a (m)	Diâmetro (mm)	Vazão (l/s)	H _a (m)
32	0,77	0,347	75	4,50	0,270
32	0,82	0,358	75	4,50	0,273
32	0,87	0,399	75	5,00	0,313
33	0,88	0,399	75	5,00	0,315
50	1,26	0,162	75	5,16	0,334
50	1,30	10,80	75	5,20**	0,328
50	1,70	0,251	75	5,20	0,342
50	1,72	0,249	75	5,70	0,395
50	2,14	0,370	75	5,70	0,397
50	2,15	0,368	100	8,40	0,276
50	2,19	0,379	100	8,45	0,276
50	2,19	0,380	100	8,80	0,284
50	2,27	0,394	100	8,80	0,303
75	4,00**	0,263	100	9,50	0,303
75	4,01**	0,247	100	9,50	0,336

4.3 Procedimento de Ensaio

Para cada uma das combinações de condições explicitadas em 4.2, realizou-se o ensaio segundo os passos descritos a seguir.

- Encheu-se o canal com uma vazão alta até se aproximar do nível de água desejado para o início do ensaio (definido pela condição de nível do ensaio análogo com borracha).
- Reduziu-se a vazão até aproximadamente o valor de ensaio e fez-se o ajuste fino da mesma.
- Quando a linha de água tocou a ponta linimétrica, começou-se o ensaio retirando a tampa que veda o descarregador a jusante.
- A partir desse instante anotaram-se os valores de vazão e de coluna de água medida com a ponta linimétrica a cada vinte minutos. Considerava-se que o nível estava estabilizado quando duas leituras sucessivas de nível se igualavam. Desta forma, se havia alcançado a condição de regime permanente e se podia encerrar o ensaio. O tempo de estabilização da superfície do reservatório pode levar até cerca de 4 h.
- Para encerrar o ensaio, primeiro se fechou o registro a montante e depois se fechou a descarga de fundo por jusante. A operação contrária poderia desestabilizar a fossa de erosão gerada dado que se fecharia a saída do modelo e continuaria o movimento crescente da massa de água em direção ao barramento.
- Após o fechamento do registro e da descarga, desligou-se a bomba e o registro voltou a ser aberto para permitir o esvaziamento da água presente no modelo, de forma muito lenta, com vazão baixa (aproximadamente 5 l/s) para evitar a desestabilização da cava.

4.3.1 Batimetria com Trena a Laser

Esvaziado o modelo, procedeu-se à realização da batimetria. A trena a laser foi nivelada e fixada ao carro sobre trilhos visto na Figura 22 b. Movendo o carro transversal e

longitudinalmente ao canal, tomaram-se medidas verticais. As coordenadas x e y das medições se conheciam pelas duas escalas dispostas sobre as paredes do modelo. As coordenadas x, y e z foram anotadas em planilhas de ensaio.

4.3.2 Batimetria com Escaneamento 3D

O escaneamento com Kinect® requereu, além do próprio equipamento, um computador com os seguintes requisitos mínimos: driver atualizado do Kinect®, processador de 64 bits, processador dual-core de 3,1 GHz (dois núcleos lógicos para cada núcleo físico) ou superior, RAM de 4 GB, placa de vídeo Nvidia CUDA ou GPU compatível com Kinect Fusion, uma porta USB 3.0 (chipset Intel ou Renesas). O *software* utilizado em conjunto com o equipamento foi o 3D Builder, também de autoria da *Microsoft Corporation* e distribuído gratuitamente.

Foram necessários dois operadores: um para ajustar as configurações do programa e dar início ao escaneamento e outro para movimentar o Kinect® sobre a cava. Inicialmente o operador do Kinect® se posicionou sobre a plataforma que se estende sobre o modelo localizou o equipamento sobre o depósito de sedimento. O operador do computador então ajustou no 3D Builder variáveis como a largura e o comprimento da janela de aquisição do escâner e o alcance da leitura além de orientar o posicionamento do operador do Kinect®. Quando se considerou que a cava estava bem enquadrada, deu-se início à medição e o operador do sensor o moveu sobre o modelo a distância necessária para obter dados de toda a fossa de erosão. O programa automaticamente processa os dados adquiridos e gera a superfície escaneada após o fim da medição. O operador do computador verifica se o resultado é satisfatório, isto é, se o detalhamento é suficiente e se não há regiões borradas, faltantes ou deformadas. Se o resultado não é aceitável, repete-se o procedimento. Do contrário, salva-

se o resultado em um arquivo de extensão .obj. Durante o escaneamento é importante que a região escaneada esteja bastante iluminada por um holofote.

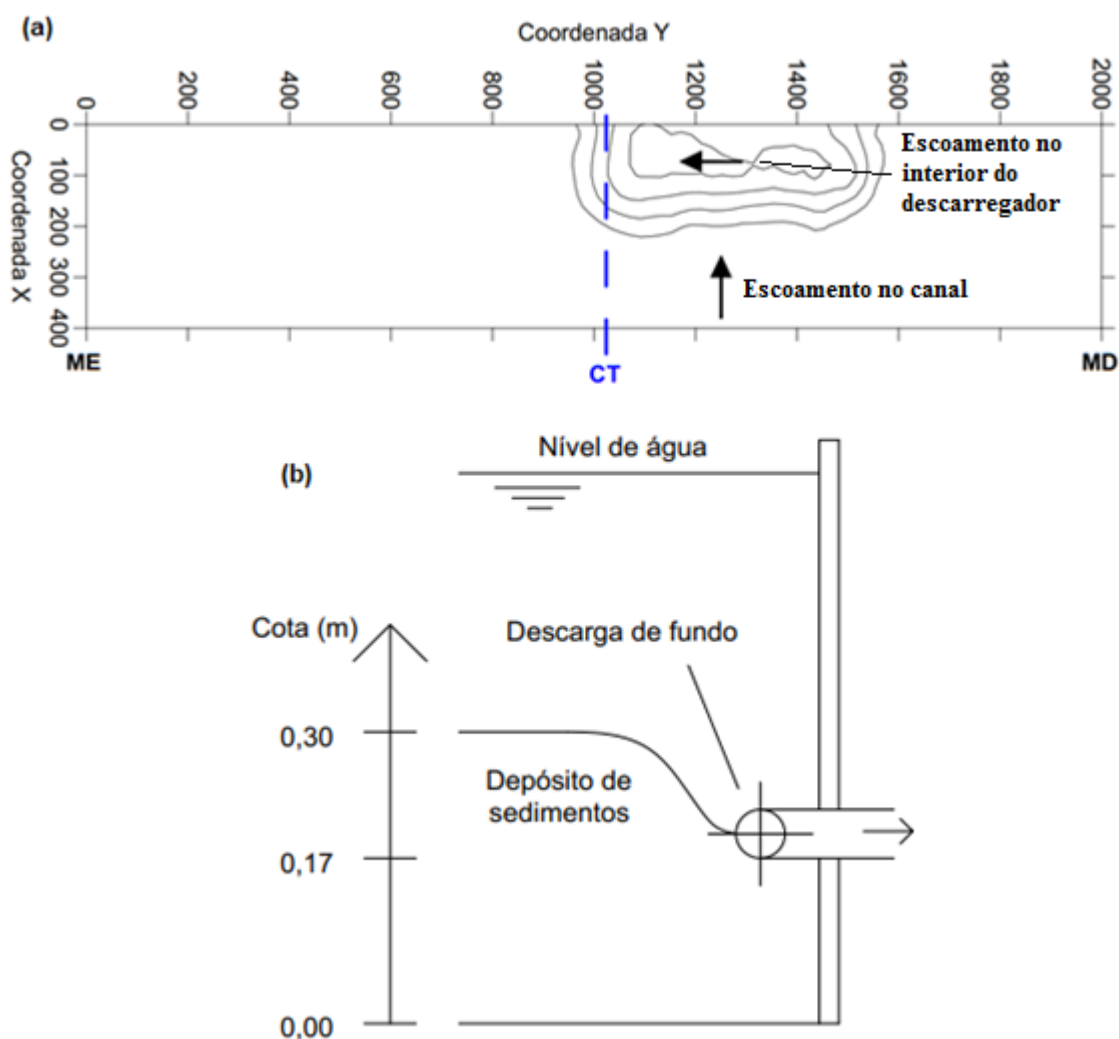
4.4 Tratamento de Dados

4.4.1 Batimetria com Trena a Laser

Os dados batimétricos obtidos com a trena a laser foram digitalizados em planilha eletrônica e importados para o software Surfer®, da *Golden Software*, no qual se interpolaram curvas de nível e se obtiveram os perfis para posterior análise.

Nas batimetrias, o eixo x ($y = 0$) representa a margem esquerda (ME) do modelo físico, o eixo y ($x = 0$) representa o barramento e a reta $y = 2000$ representa a margem direita (MD) do canal. O centro do tubo (CT) cruza o barramento em $x = 0$ e $y = 1025$ (Figura 26-a). A cota de referência ($z = 0$) corresponde ao fundo do modelo, sendo que a geratriz inferior da descarga de fundo se localiza na cota 0,17 m em todos os ensaios (Figura 28-b). Setas indicam o sentido do escoamento.

Figura 28. Sistema de coordenadas das batimetrias com trena a laser.



4.4.2 Batimetria com Escaneamento 3D

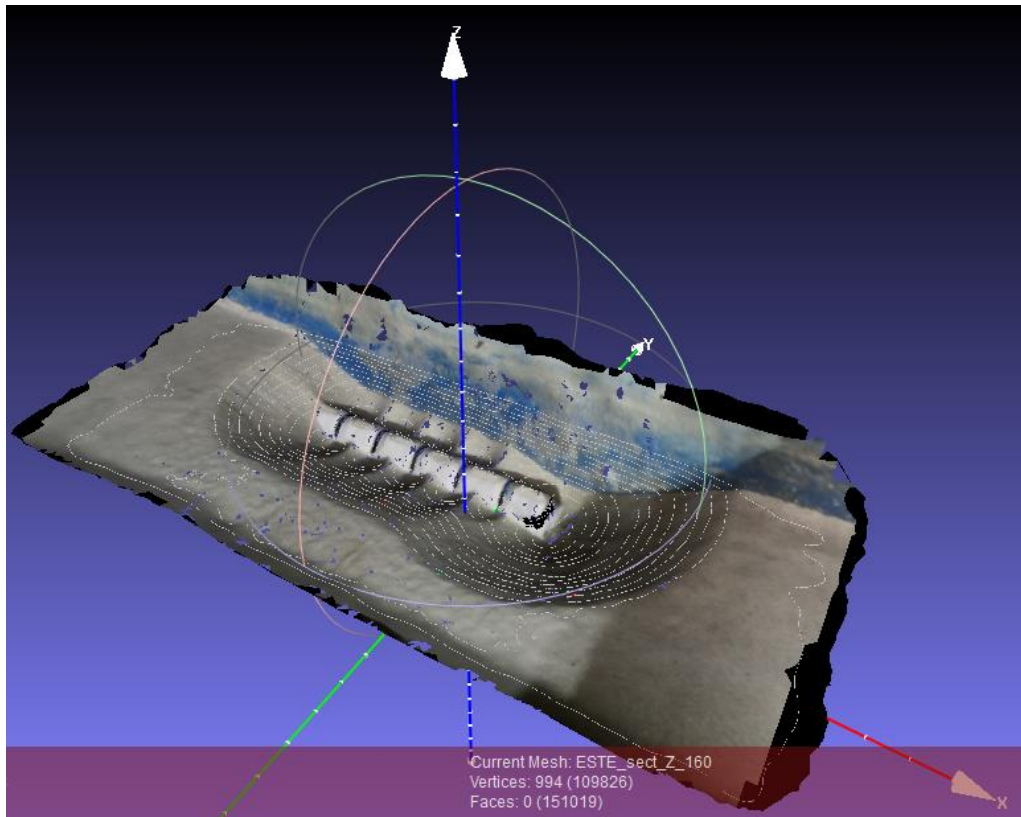
À semelhança do caso anterior, os perfis de análise se extraem das curvas de nível. O que difere os dois métodos é a forma de obtenção destas. A obtenção das curvas de nível da superfície escaneada foi efetuada com o *software* MeshLab. O MeshLab, desenvolvido pelo *Instituto di Scienza e Tecnologie dell'Informazione*, é um programa de processamento de malhas 3D que permite editar esses tipos de malhas.

O procedimento é o que segue. Abre-se o arquivo de extensão .obj gerado pelo 3D Builder com o comando *Import Mesh*. Realiza-se uma filtragem da superfície com o comando *Filters > Selection > Select no Manifold Vertices > Delete Selected Vertices*. Repete-se o procedimento até não haver mais vértices selecionados ao executar o comando *Select no Manifold Vertices*. Referencia-se a origem do sistema de coordenadas conforme a prática do operador com os comandos *Render > Show Axis* e *Filters > Normals, Curvatures and Orientation > Move, Translate, Center* ou *Rotate*. Para realizar qualquer rotação ou translação da superfície em relação à origem, é preciso tê-la selecionado inteiramente com *Filters > Selection > Select All*. Sugere-se localizar o plano XY paralelo ao plano do depósito de sedimentos e o eixo Z perpendicular a este crescendo para cima. Criam-se as curvas de nível a partir do comando *Compute Planar Section > Plane Perpendicular to: Z Axis > Cross plane offset > apply*. Em *Cross plane offset* se insere a coordenada Z da curva de nível que se deseja conhecer. Sempre antes de criar uma nova curva de nível é preciso selecionar o *layer* da superfície escaneada. Quando se tenha obtido todas as curvas de nível necessárias, apagam-se os *layers* que não são as curvas de nível e clique com botão *direito do mouse sobre os layers > Flatten Visible Layers > Merge Only Visible Layers > Apply*. Por último, exporta-se o *layer* criado com todas as curvas de nível para o formato DXF com o comando *File > Export Mesh As > .dxf*. O arquivo DXF gerado pode ser importado no Surfer® e tratado da mesma forma que em 4.4.1.

Na Figura 29 se pode observar uma captura de tela do MeshLab com a cava escaneada em 3D, as curvas de nível e os eixos coordenados. O valor absoluto das cotas não é o mais importante, não influenciando a posição sobre o eixo Z em que se disponham os dados. O que se fez foi, para cada caso, identificar qual era a cota da geratriz superior da ponta do tubo (ponto de cota conhecida, medida diretamente, na batimetria realizada com trena a laser) e depois calcular a diferença desse valor com a medida para o mesmo ponto na

batimetria da trena a laser. Subtraindo essa diferença em todos os pontos, tem-se ambas batimetrias alinhadas e prontas para serem comparadas, se for esse o objetivo.

Figura 29: Obtenção de curvas de nível a partir da batimetria por escaneamento 3D.

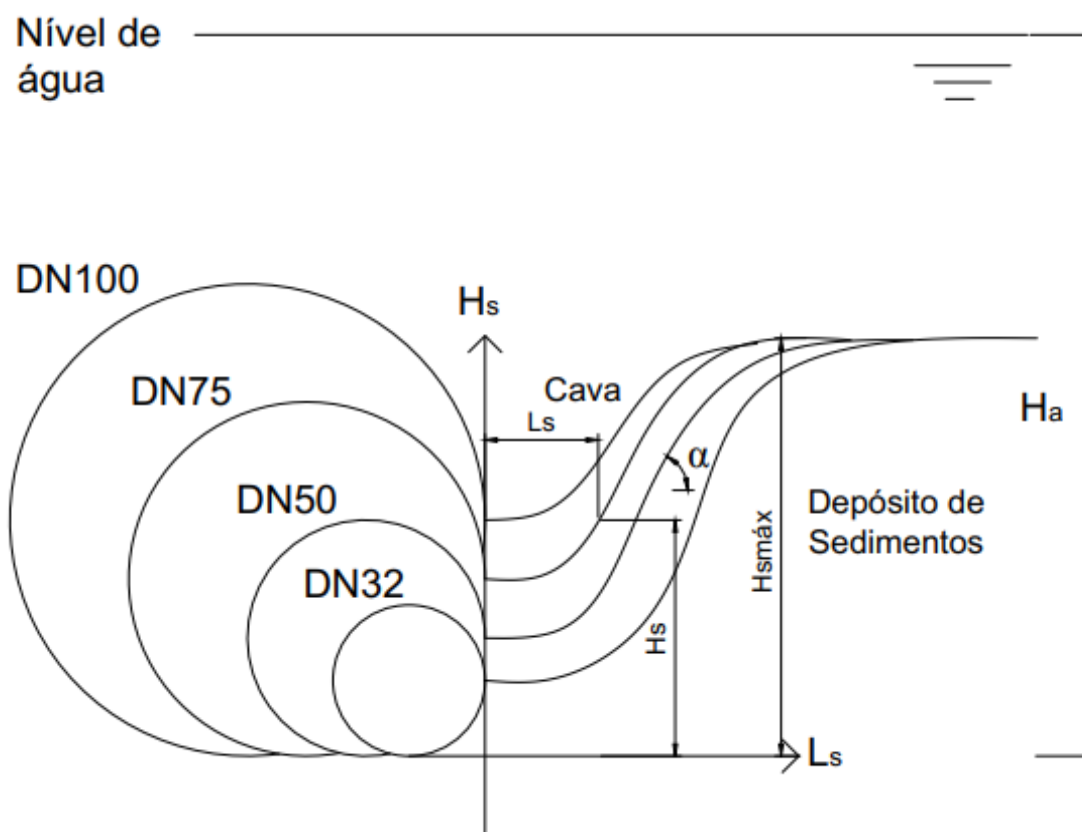


4.4.3 Análise dos Perfis

Devido às dimensões do joelho que conecta o descarregador tipo tubo ranhurado ao barramento, os eixos de diferentes diâmetros não estiveram alinhados sobre as mesmas coordenadas em todos os ensaios. Foi preciso, portanto, corrigir os alcances obtidos das batimetrias (distâncias sobre o eixo x entre o barramento e os limites da cava). Subtraiu-se a distância entre o barramento e o eixo dos tubos e também o raio do tubo, de maneira que o valor zero de alcance de remoção, doravante nomeado L_s , se localiza sobre a parede ex-

terna do conduto. Tomou-se como cota zero não mais o fundo do canal (como 4.4.1) mas sim a geratriz inferior dos tubos, pois estes estiveram alinhados por essa cota em todos os ensaios. A Figura 30 esquematiza o sistema de coordenadas escolhido. α representa o ângulo de inclinação do talude da cava em relação à horizontal. As posições dos perfis analisados dentro do sistema de coordenadas apresentado em 4.4.1 dependem dos resultados observados e são apresentados na seção 5.3.2. Há se diferencia da variável H_w empregada pelos autores mencionados na revisão bibliográfica porque é a distância medida entre a superfície da água e a geratriz inferior da descarga de fundo, ao passo que H_w se mede desde a superfície da água até o centro da descarga de fundo.

Figura 30: Sistema de coordenadas adotado para a análise dos perfis.



A interpretação dos dados obtidos baseia-se na análise dos perfis extraídos seja da batimetria feita com trena a laser, seja da batimetria medida com o Kinect®. Para cada ponto do perfil se conhece os valores de H_a , H_s , L_s além de variáveis consideradas constantes para um mesmo ensaio como a velocidade média do escoamento através de uma ranhura (u_r) e o diâmetro da descarga de fundo (D). Busca-se relacionar as dimensões da fossa de erosão com as características geométricas do descarregador de fundo e as condições hidráulicas do escoamento através do agrupamento destas variáveis em parâmetros adimensionais. A correlação entre os grupos adimensionais obtida deve permitir comparar os resultados deste modelo com outros que porventura sejam estudados.

O presente trabalho se realizou no mesmo modelo físico chamado “Final” utilizado por Abreu (2019), diferenciando-se no tipo de descarregador empregado. O tipo de análise realizada é semelhante ao gráfico adimensional apresentado na Figura 19.

A adimensionalização se baseou no teorema de Bridgman, que permite a análise do fenômeno agrupando as variáveis intervenientes em parâmetros adimensionais que formam uma relação funcional entre si e com a capacidade de remoção de sedimentos pela descarga de fundo, e dos π de Vaschy-Buckingham que indica o número de grupos adimensionais que podem ser obtidos.

CAPÍTULO 5: RESULTADOS E DISCUSSÕES

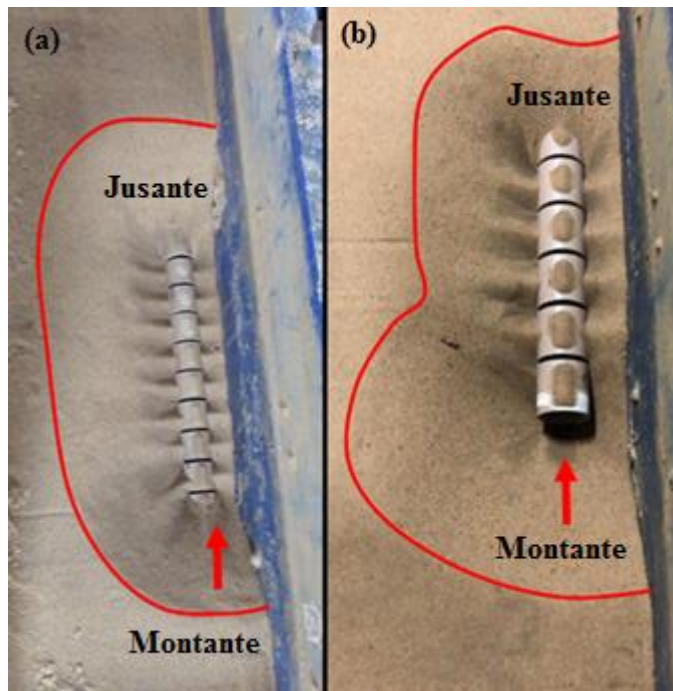
Os resultados apresentados e analisados a seguir dão conta dos seguintes aspectos: forma final da cava, o processo de remoção dos sedimentos, a influência das variáveis que intervêm no fenômeno de remoção de sedimentos através da descarga de fundo e o funcionamento da estrutura proposta na forma da relação adimensional obtida. Nos itens 5.1, 5.2 e 5.3.1 se realizam análises qualitativas dos resultados observados. No item 5.3.2 se apresenta a análise quantitativa dos perfis batimétricos.

Os termos jusante e montante utilizados na análise dos resultados se referem ao escoamento dentro da descarga de fundo, ou seja, transversal à seção do canal de ensaios, e não ao escoamento que se aproxima do barramento no sentido longitudinal do mesmo. Portanto, montante se refere à região desde onde apontam as setas na Figura 31 (ponta do descarregador de fundo) e jusante a região para onde apontam as setas na mesma figura (ponto onde a descarga de fundo atravessa o barramento).

5.1 Forma da Cava

Foram observadas duas situações nos ensaios realizados: uma em que o sedimento não é removido ao longo de toda a extensão do descarregador (caso A) e outra em que há remoção ao longo de toda a peça (caso B) conforme exemplificado na Figura 31. O caso A foi observado nos ensaios com diâmetros 32 e 50 mm e o caso B nos ensaios com diâmetros 75 e 100 mm, tanto quando se empregou borracha como sedimento como quando se utilizou areia.

Figura 31: Configurações observadas após o término dos ensaios: (a): caso A, DN50, 1,30 l/s, areia; (b): caso B, DN75, 5,70 l/s, areia. A linha vermelha indica o limite da cava de erosão.



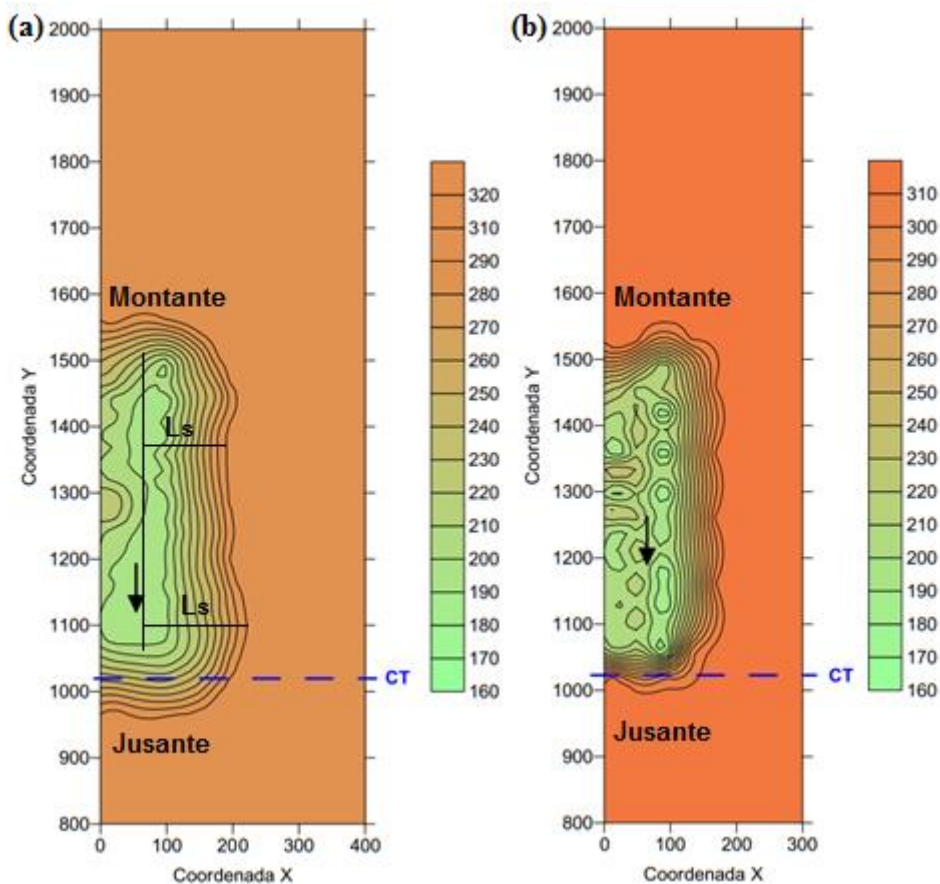
De acordo com a Figura 31, o escoamento no caso A não foi capaz de desobstruir toda a extensão do tubo, de forma que a remoção de sedimentos se deu exclusivamente por intermédio das ranhuras. A cava gerada possui seção transversal aproximadamente constante (exceto pelos extremos) já que as ranhuras são idênticas. No caso B, o escoamento removeu sedimento ao longo de toda a peça, expondo a ponta de seção transversal circular do descarregador. Deste modo, a remoção de sedimentos se deu através das ranhuras e da ponta do tubo. A seção transversal na região de influência desta última difere da seção transversal na região de influência das ranhuras, onde é o menor alcance de remoção.

Apesar de aparentar constância, a remoção devida às ranhuras diminui ao longo do descarregador no sentido de jusante para montante. Em alguns ensaios esta diminuição não é observada e em outros é perceptível embora não seja expressiva. A Figura 32 (a) apresenta um ensaio em que se observou diferença de 35% entre o maior e o menor valor de L_s , ao

passo que a Figura 32 (b) mostra um ensaio em que não há diminuição de L_s ao longo da descarga de fundo.

Figura 32: Diminuição de L_s ao longo do descarregador de fundo (a) e L_s aproximadamente constante (b).

Ambos ensaios em caso A, DN50 e com borracha como sedimento; vazões iguais a 1,23 l/s (a) e 2,15 l/s (b)



Abreu (2019) observou a remoção de sedimentos ocasionada pela operação de descargas de fundo tradicionais abaixo de sua geratriz inferior, efeito mais pronunciado quanto menor for a densidade das partículas. De acordo com essas afirmações, constatou-se alguma remoção abaixo das ranhuras e da ponta do tubo nos ensaios realizados com borracha, ao passo que nos ensaios com areia não se observou remoção abaixo das mesmas, como apresenta a Figura 33.

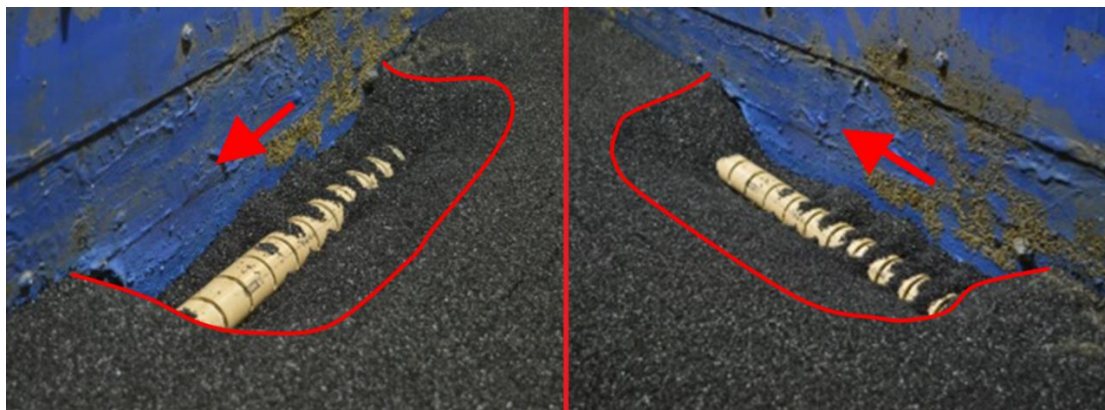
Figura 33. Remoção sob as ranhuras visível para borracha (a) e inexistente ou insignificante para areia (b).

Ambos ensaios com DN75 e vazão de 5 l/s.



Na Figura 34 observa-se a cava resultante de um mesmo ensaio desde dois ângulos diferentes. À esquerda nota-se que o sedimento foi removido em cotas inferiores à base das ranhuras e à direita nota-se maior acúmulo de borracha sobre e ao redor da estrutura, evidenciando ao mesmo tempo os efeitos de remoção em cotas inferiores às ranhuras e a diminuição da remoção de jusante para montante. Essa variação talvez pudesse ser compensada com ranhuras de largura crescente de jusante para montante ou por espaçamentos entre ranhuras maiores de montante para jusante.

Figura 34. Efeito combinado de remoção abaixo da base das ranhuras e redução da remoção ao longo do descarregador de fundo. DN 50; 2,14 l/s; borracha. A linha vermelha indica o limite da cava de erosão.



5.2 Processo de Remoção de Sedimentos

Enquanto à remoção de sedimentos ao longo do tempo, pode-se dividir o processo em três etapas: início do movimento, desenvolvimento da cava e estabilização.

A força motriz do escoamento através da descarga de fundo é a gravidade, ou seja, o gradiente de pressão entre montante (carga hidráulica a montante do barramento) e jusante (pressão atmosférica, no caso de descarga livre, ou coluna de água, no caso de descarga afogada). O depósito de sedimentos representa inicialmente uma resistência ao escoamento já que a água deve exercer pressão suficiente para empurrar os grãos para dentro do descarregador. Se a coluna de água for muito baixa (pequena relação H_a/H_s), a pressão pode não ser suficiente para vencer a resistência mesmo que o descarregador seja acionado e o fluido esteja livre para escoar a jusante. Na maioria dos ensaios realizados o movimento do sedimento iniciou imediatamente após o acionamento da descarga. Somente nos ensaios de DN50 com vazões 1,23 l/s e 1,30 l/s e DN75 com vazões 4,00 l/s e 4,01 l/s o nível inicial não foi suficiente para iniciar a remoção do sedimento. Nesses casos, o nível a montante começou a subir (já que a vazão de entrada seguiu a mesma) até o gradiente de pressão ser

suficiente para empurrar o sedimento para dentro do tubo e gerar velocidades que impediram a deposição do sedimento que entrava na descarga. A relação H_a/H_s quando do começo efetivo do ensaio era de 1,21, 1,11, 1,38 e 1,31 respectivamente. Estas observações condizem com o afirmado por Fathi-Moghadam et al. (2010): a pressão é a variável mais importante para o início do movimento das partículas através de descargas de fundo.

O desenvolvimento (crescimento) da cava se deu muito rapidamente em todos os ensaios. Logo após o início do movimento, grande quantidade (a maior parte do volume total removido) de sedimento foi transportada através da descarga, gerando um escoamento muito turvo observado a jusante. Após os primeiros instantes (cerca de 2 min), a carga sólida transportada começou a diminuir gradativamente e ao cabo dos primeiros cinco minutos, aproximadamente, a água saía clara a jusante. Contudo, isto não significava que a remoção houvesse cessado. Pequena quantidade de sedimento continuou a ser removida durante um período após o acionamento da descarga que variou de 30 min a 3h aproximadamente (os ensaios duraram, em média, 3h já que se esperava até a estabilização da linha de água para encerrar o experimento). Este fato não resultava em grande aumento das dimensões da cava, principalmente, no caso B das formas descritas. Entretanto, no caso A, com DN50 e com as maiores vazões (2,19 e 2,27 l/s), a pequena, embora constante, remoção residual avançou até desobstruir uma ranhura a mais além das que foram desobstruídas nos primeiros instantes após o acionamento do descarregador.

Nos ensaios realizados, a água não transportava sedimentos ao longo do canal de ensaios, de maneira que a estabilização da cava se deu quando a erosão causada pelo escoamento fez aumentar a seção transversal, o que ocasionou a diminuição da velocidade a valores em que esta já não possuía capacidade de movimentar as partículas do fundo. Isso condiz com o exposto por Graf (1971), que no escoamento em fundo móvel o fluxo atua sobre o leito – mobilizando e depositando partículas – e simultaneamente o leito afeta o

escoamento – oferecendo resistência na forma de micro (diâmetro das partículas) e macrorrugosidades (formas de fundo). Dessa forma, alcança-se um estado de equilíbrio dinâmico em uma seção quando a quantidade de sedimento aportada de montante iguala a que sai a jusante.

O tempo de estabilização total da cava variou em uma faixa de 20 min a 4 h, dependendo do ensaio, tendendo ao extremo inferior; ao passo que o tempo de estabilização da linha de água variou na mesma faixa, mas tendendo ao extremo superior.

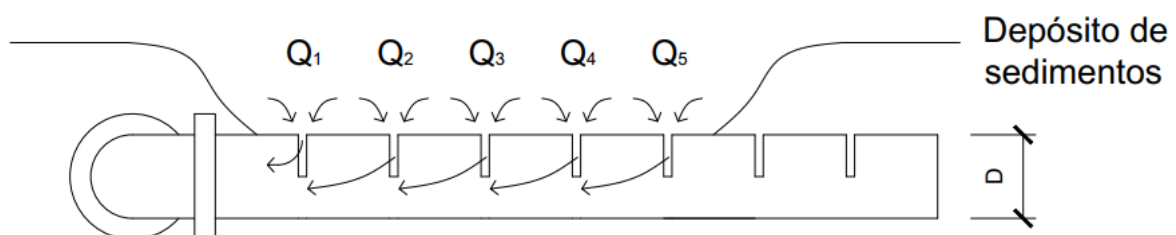
Em protótipos, a água pode conter sedimento em suspensão semelhante ao do depósito. Portanto, a capacidade de transporte do escoamento e o quanto dela já é satisfeita por sedimento vindo do interior do reservatório devem ser variáveis que influenciam as dimensões finais da cava e que não foram consideradas no presente estudo.

5.3 Análise do funcionamento da estrutura

5.3.1 Escoamento através do descarregador

A observação do caso A descrito em 5.1 sugere as configuração para o escoamento através da estrutura de descarga de fundo proposta retratada nas Figura 35.

Figura 35. Representação esquemática do escoamento suposto no descarregador no caso A.



No caso A, parte da descarga se mantém obstruída pelo depósito de sedimentos, de forma que a remoção de sedimento se dá somente através das ranhuras. Conforme o exposto em 5.1, observou-se que o alcance de remoção é, aproximadamente, constante para todas as ranhuras. Assim sendo, pode-se afirmar que a velocidade de entrada é, aproximadamente, constante ao longo da estrutura. Além disto, como as ranhuras são idênticas, infere-se que as vazões também o são e que sua soma resulta a vazão total que escoar através da descarga de fundo, ou seja,

$$u_{r1} \approx u_{r2} \approx u_{r3} \approx u_{r4} \approx u_{r5} \quad (11)$$

$$Q_{r1} \approx Q_{r2} \approx Q_{r3} \approx Q_{r4} \approx Q_{r5} \quad (12)$$

$$Q_{rt} = Q_{r1} + Q_{r2} + Q_{r3} + Q_{r4} + Q_{r5} \quad (13)$$

onde u_{ri} é a velocidade média de entrada do escoamento em uma ranhura, Q_{ri} é a vazão que ingressa em uma ranhura e Q_{rt} é a vazão total que ingressa pelas ranhuras.

Dividindo-se a vazão total pelo número de ranhuras, N_r , obtém-se a vazão em cada ranhura, Q_r , a partir da equação

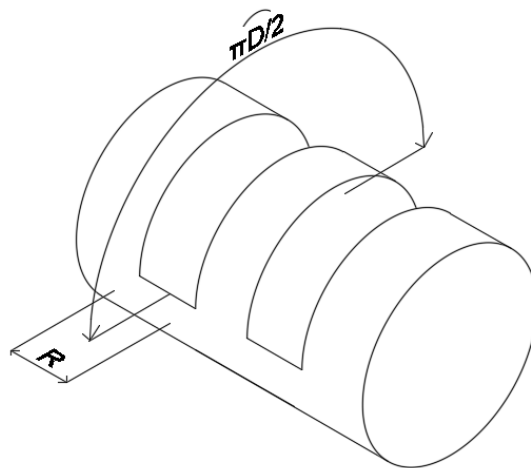
$$Q_r = Q_{rt}/N_r \quad (14).$$

Considerando a área da ranhura como a área superficial da parede externa do tubo contida dentro de uma ranhura (Figura 36) e a equação da continuidade (a vazão em uma seção transversal do escoamento é igual ao produto entre velocidade média na seção e sua área), tem-se que

$$u_r = \frac{Q_r}{A_r} = \frac{Q_r}{\pi(D/2)R} \quad (15)$$

onde u_r é a velocidade média do escoamento em uma ranhura, A_r é a área de uma ranhura, D é o diâmetro externo do tubo e R é a largura da ranhura.

Figura 36: Dimensões que definem a área de uma ranhura.

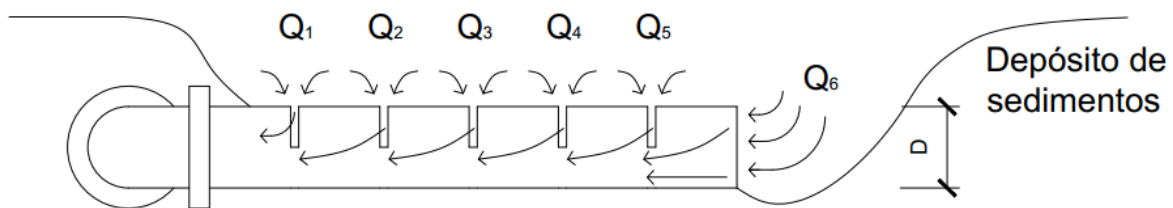


A partir da configuração de escoamento suposta na Figura 35 também pode-se inferir uma causa para a diminuição do alcance de remoção nas ranhuras mais de montante observada em alguns ensaios e mencionada em 5.1. Para ingressar a qualquer ranhura, o escoamento deve contrair-se à seção imposta pela forma da mesma e aumentar sua velocidade, ocasionando uma perda de carga localizada. Na primeira ranhura, a água ingressa e logo encontra grande parte da seção transversal do tubo para escoar. Nas outras ranhuras, o escoamento se depara com cerca de metade da seção transversal do tubo, mas logo deve contrair-se em direção ao fundo do conduto pois a jusante existe outra ranhura por onde ingressa água, o que gera outra perda de carga localizada. À medida que cresce o número de ranhuras, ditas perdas de carga se somariam e seria mais eficiente para o escoamento ingressar na estrutura em maior quantidade a jusante que a montante. Em menor magnitude

(provavelmente desprezível), influencia também a perda de carga distribuída nas paredes internas do conduto. Assim sendo, a vazão passante pelas ranhuras de montante seria ligeiramente menor, resultando em velocidades menores que ocasionam um alcance de remoção menor. Entretanto, a diminuição de L_s ao longo da estrutura foi desprezada nas suposições apresentadas em (11), (12) e (13). A suposta diminuição da vazão de entrada nas ranhuras só poderia ser verificada com medição local de velocidade, procedimento que não foi adotado neste trabalho.

O caso B é similar ao A com a diferença de que há escoamento através das ranhuras e da ponta do tubo, conforme esquematizado na Figura 37.

Figura 37. Representação esquemática do escoamento suposto no descarregador no caso B.



Nesta circunstância, observou-se que o alcance de remoção devido à ponta do tubo é, em média, 40% maior que o das ranhuras, o que indica maior vazão naquela abertura que nestas. Contudo, não se dispõe de dados suficientes para calcular a vazão que ingressa pelas ranhuras e a que ingressa pela ponta do tubo já que não se mediu velocidade durante os ensaios. De qualquer forma, observou-se que a remoção devida às ranhuras é aproximadamente constante fora da zona de influência da ponta do tubo, pelo que é razoável assumir que na Figura 37

$$u_{r1} \approx u_{r2} \approx u_{r3} \approx u_{r4} \approx u_{r5} < u_6 \quad (16)$$

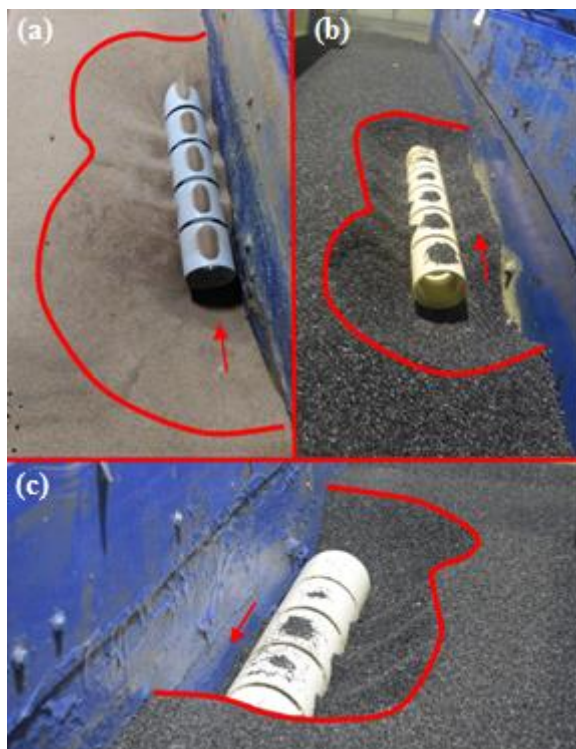
$$Q_{r1} \approx Q_{r2} \approx Q_{r3} \approx Q_{r4} \approx Q_{r5} < Q_6 \quad (17)$$

$$Q = Q_{r1} + Q_{r2} + Q_{r3} + Q_{r4} + Q_{r5} + Q_6 = Q_{rt} + Q_p \quad (18)$$

onde u_6 e Q_6 ou Q_p são a velocidade média e a vazão através da ponta do descarregador, respectivamente. Ou seja, a vazão total é a soma da vazão das ranhuras mais a vazão da ponta, restando o problema de definir o valor numérico de cada uma.

À semelhança do caso A, também se observou uma diminuição do alcance de remoção das ranhuras ao longo da peça em alguns ensaios (como os apresentados na Figura 38), sendo mais visível imediatamente a jusante da área de influência da ponta desobstruída. Acredita-se que isto se deva a que próximo da extremidade do tubo as últimas ranhuras e a ponta interfiram entre si, o que só poderia ser afirmado através da observação das linhas de corrente no local, dado do qual não se dispõe. De qualquer forma, este efeito não foi observado em todos os ensaios e tampouco é muito relevante, motivo pelo qual se o desconsiderou na configuração proposta em (15), (16) e (17) da mesma forma que se fez no caso A.

Figura 38. Diminuição do alcance de remoção de ranhuras no caso B. (a): DN100, 9,0 l/s, areia; (b): DN75, 5,2 l/s; (c): DN100, 9,5 l/s, borracha. A linha vermelha indica o limite da cava de erosão.



5.3.2 Análise dos Perfis

A forma da cava foi analisada de forma qualitativa em 5.1. Nesta seção se discute quantitativamente o alcance de remoção da descarga de fundo. Foram definidos perfis transversais e longitudinais a fim de caracterizar a erosão gerada pelo acionamento do descarregador. Os perfis escolhidos se apresentam de forma esquemática na Figura 39. Os perfis P2 e P5 representam as seções transversais devidas às ranhuras, P4 a seção transversal referente à influência de remoção devida à ponta do tubo e P1 e P3 (sobre o eixo da estrutura de descarga) representam as seções longitudinais que se devem aos dois efeitos (ranhuras a jusante e ponta a montante) no caso B e somente às ranhuras no caso A. A Tabela 3 apresenta as posições dos perfis considerados.

Figura 39. Representação esquemática dos perfis analisados.

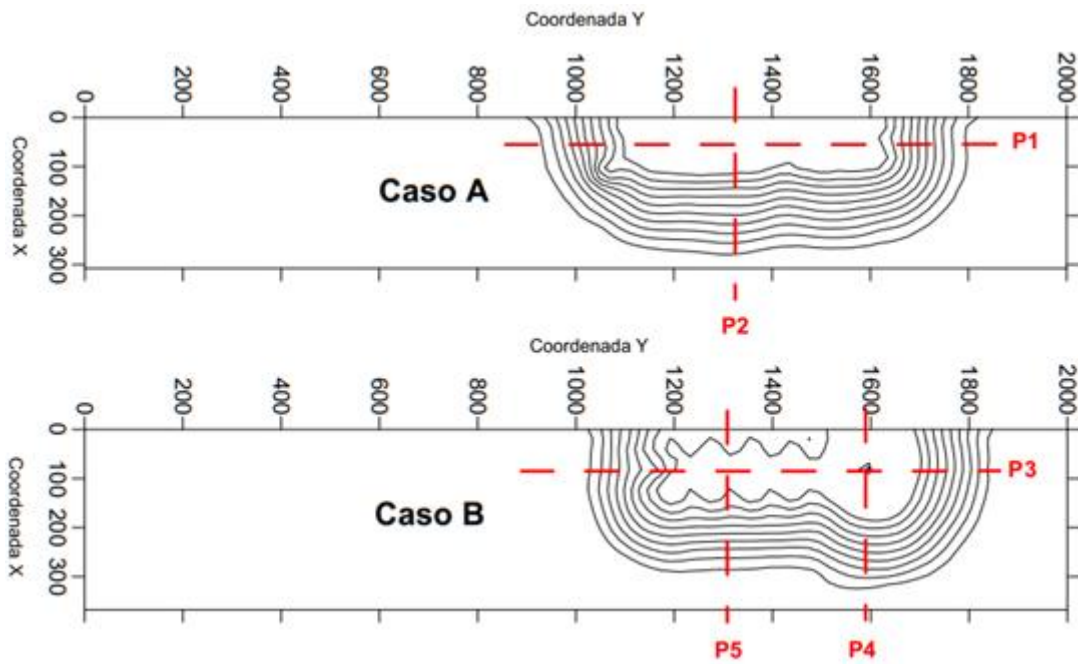


Tabela 3: Posições dos perfis.

DN	P1	P2	P3	P4	P5
32	x = 40	y = 1421	—	—	—
50	x = 60	y = 1397	—	—	—
75	—	—	x = 90	y = 1615	y = 1321
100	—	—	x = 60	y = 1621	y = 1271

Neste trabalho, preferiu-se aprofundar a análise nos perfis P2 e P5, mostrados nas Figuras 40 e 41, nas quais H_s e L_s são as dimensões definidas na Figura 30.

Figura 40: Perfis P2 e P5 obtidos com areia.

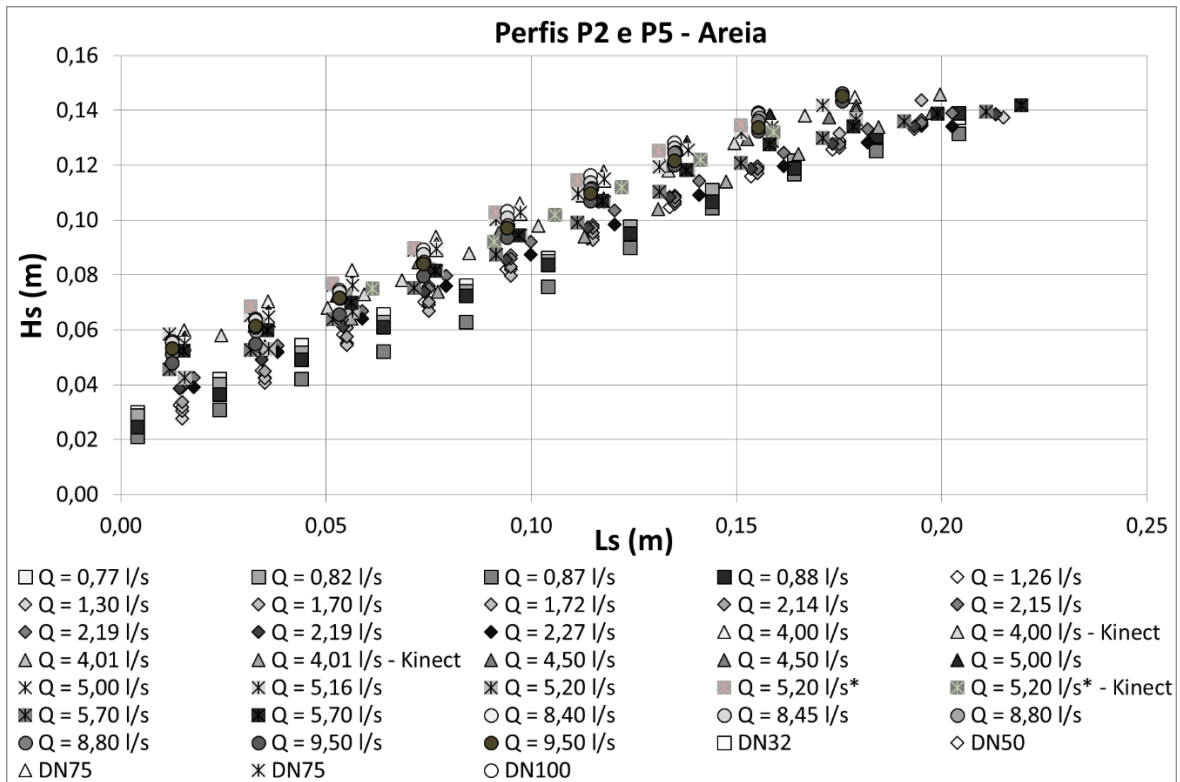
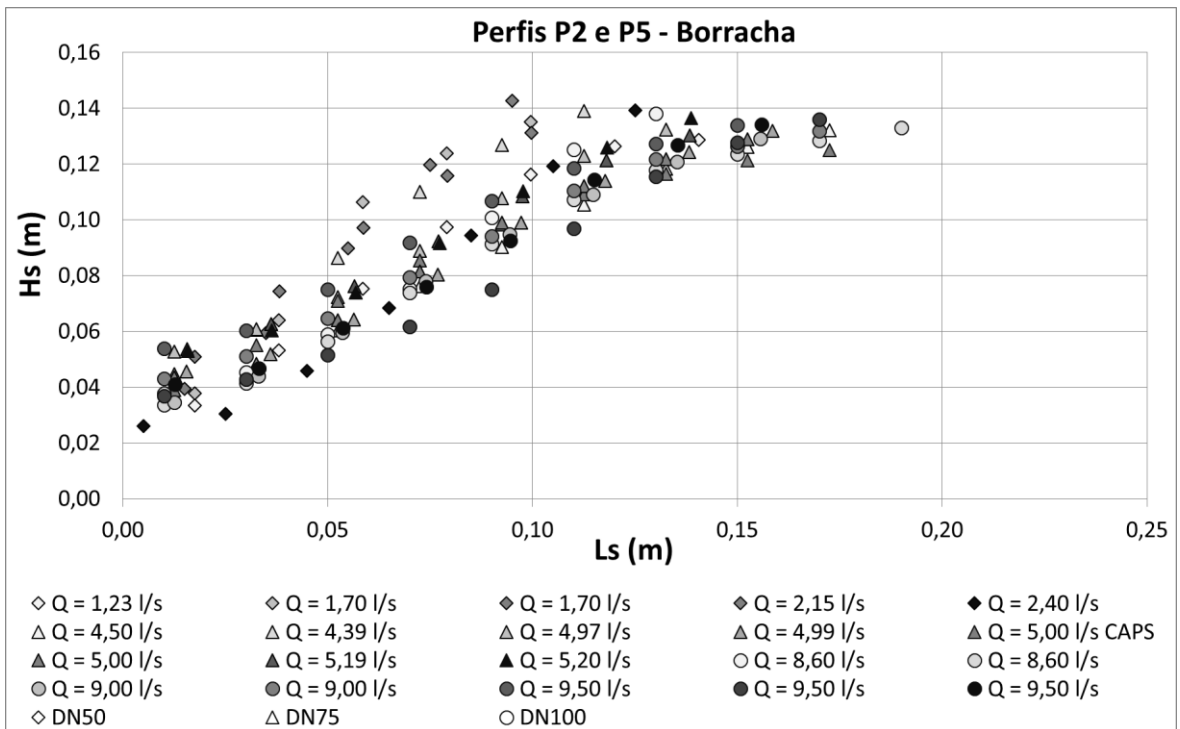


Figura 41: Perfis P2 e P5 obtidos com borracha.



Observa-se variação de L_s em função das características do sedimento, do diâmetro da descarga de fundo e das vazões ensaiadas. Pode-se notar que L_s é maior nos ensaios com areia que nos ensaios com borracha processada como sedimento. Isso vai de encontro ao resultado esperado. A borracha deveria ter sido mais removida que a areia pois possui menor densidade. Entretanto, é necessário ter em conta que o diâmetro das partículas de borracha é maior (1,18 mm contra 0,71 mm da areia). Se, por exemplo, compara-se em base ao número de Shields (equação 1), considerando uma mesma tensão de cisalhamento no leito, constata-se que o número de Shields para borracha é uma ordem de grandeza superior ao da areia (1,082 da borracha contra 0,089 da areia). Assim sendo, mesmo com um diâmetro superior ao da areia, a baixa densidade da borracha ainda deveria preponderar e resultar em uma maior remoção. A única explicação plausível para o resultado encontrado é o fator de forma dos grãos de borracha (0,63), que são muito mais angulosos que os de areia. Essa forma angulosa promoveria uma espécie de travamento entre as partículas, dificultando sua remoção. Esse resultado indica que em modelos físicos é necessário considerar também o fator de forma das partículas ao aplicar escalas de redução.

Além do menor valor de L_s , pode-se relacionar o fator de forma das partículas de borracha à forma dos perfis obtidos para os menores diâmetros e menores vazões. Nos ensaios com areia, a forma do perfil, ou seja, a inclinação do talude, é muito similar para todos os casos. Por sua vez, nos ensaios com borracha a inclinação é maior com menores vazões e menores diâmetros, resultando em um alcance de remoção reduzido. Contudo, com o aumento da vazão e dos diâmetros a inclinação tende a diminuir e assemelhar-se mais com a dos ensaios em areia. Acredita-se que nos ensaios com menores vazão e diâmetro o escoamento não removeu tanto as partículas de borracha quanto se esperava devido ao travamento entre os grãos ocasionado por seu fator de forma. À medida que se aumenta a carga hidráulica (e por consequência a vazão) e o diâmetro (e por consequência a área

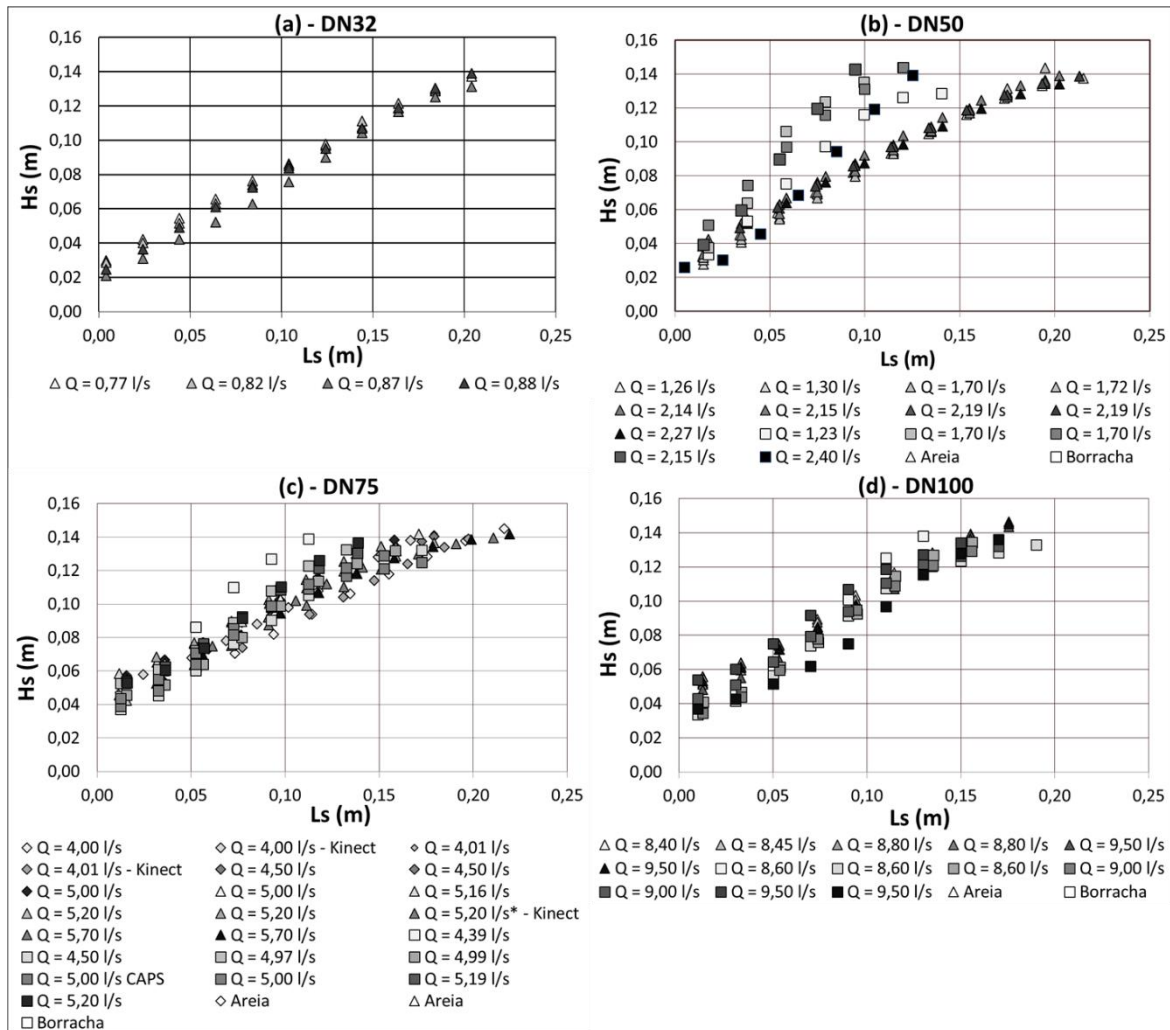
disponível para o escoamento), o fator de forma perde importância e o talude se assemelha mais ao talude obtido com areia, em que não há indícios de que o fator de forma seja relevante. O mesmo comportamento foi verificado por Abreu (2019) empregando a mesma borracha processada como sedimento em estudos com descargas de fundo convencionais.

Nos ensaios com areia percebe-se que o alcance diminui com o aumento do diâmetro da estrutura. Isso ocorre, primeiramente, porque os diferentes diâmetros estavam alinhados por sua geratriz inferior, o que faz com que as bases das ranhuras estivessem situadas em cotas mais elevadas conforme se aumenta o diâmetro. Como a forma do talude se mantém, há um deslocamento também para cotas superiores do mesmo tipo de perfil, resultando em um alcance de remoção ligeiramente inferior para os diâmetros maiores. Em segundo lugar, acredita-se que não se observou L_s maior para os maiores diâmetros devido a uma importante limitação do modelo físico empregado: sua altura. As maiores vazões em cada diâmetro foram ensaiadas com colunas de água muito semelhantes, pois era o máximo que se podia realizar sem haver transbordamento (Tabela 2). Dessa forma, o aumento de carga hidráulica nos ensaios com diâmetros maiores foi pouco ou nenhum em relação aos ensaios com diâmetros menores. O aumento de seção disponível para o escoamento com o aumento do diâmetro não foi acompanhado de um aumento de carga hidráulica, por isso o alcance não foi superior. De fato, foi menor, e isso se deve a que a relação H_a/H_s é maior para os diâmetros menores mesmo que H_a seja similar à dos diâmetros maiores, o que ocasiona maior remoção. Isso reafirma a importância do parâmetro adimensional H_a/H_s empregado por diversos autores (equações 2 a 10).

A Figura 42 apresenta os mesmos perfis das Figuras 40 e 41 (P2 e P5), entretanto, separados por diâmetro da descarga de fundo. A comparação entre materiais diferentes para um mesmo diâmetro evidencia o anteriormente exposto quanto à influência do fator de forma na diferença entre o comportamento esperado (L_s maior com borracha que com

areia) e observado (L_s maior com areia que com borracha) da borracha processada. No DN50 a influência do fator de forma é maior, observando-se alcance de remoção consideravelmente menor que da areia e ângulo de inclinação (α , Figura 30) consideravelmente maior. Além disso, não há remoção visível abaixo da ranhura (cuja base se encontra em 0,025 m). Com o aumento do diâmetro (DN75), a forma do talude da borracha se aproxima da forma do talude de areia e nas proximidades da ranhura alguns ensaios com borracha alcançaram cotas inferiores aos ensaios com areia. Já nos ensaios com o DN100, nos quais os efeitos do fator de forma seriam menos relevantes, a borracha foi removida abaixo das ranhuras (cuja base se encontra em 0,05 m), como esperado para sedimento de baixa densidade, ao passo que nos ensaios com areia não se observou tal efeito. Ainda, observou-se alcance de remoção maior para a borracha para valores de H_s inferiores a, aproximadamente, 0,11 m nos perfis para os ensaios de 9,5 l/s, 9,0 l/s e 8,6 l/s. Isso indica um resultado mais próximo do esperado, embora uma remoção não tão superior quanto a esperada devido ao fator de forma. Além disso, para H_s superior a 0,11 m, ambos materiais tendem a ter o mesmo alcance de remoção, verificando-se novamente o efeito do fator de forma. Fica evidenciada, então, a diminuição da influência do fator de forma com o aumento do diâmetro e da vazão. Também se pode notar que existe maior dispersão entre os perfis dos ensaios com borracha que entre os perfis de ensaios com areia. Isso pode se dever à maior variação da massa específica entre os grãos de borracha já que esse material pode ser processado a partir de diferentes fontes (pneus de diferentes massas específicas, por exemplo).

Figura 42: Perfis P2 e P5 separados por diâmetro.



É fato conhecido que a velocidade é uma variável importante no escoamento sobre fundo móvel (GRAF, 1971). De fato, a velocidade do fluxo é uma variável considerada no Número de Froude da descarga de fundo nas equações 2 a 5 e no Número de Shields nas equações 6 e 7. Entretanto, apesar de considerada, sua influência não é clara dado que os expoentes a que o termo que a contempla está elevado em muitas das equações propostas (2 a 7) é, via de regra, bastante baixo. Em (2), por exemplo, a velocidade é elevada à potência 0,0062, ou seja, o fenômeno tecnicamente não dependeria da velocidade. De certa forma, poder-se-ia dizer que a velocidade nessas equações está mais associada ao ajuste matemático que se buscou que com o fenômeno físico que se pretendia representar. Isso

não necessariamente indica que a velocidade não é uma variável que intervém na remoção de sedimentos por descargas de fundo. Pode indicar somente que nos experimentos específicos realizados não foi possível avaliar a influência da velocidade. De fato, no trabalho de Abreu (2019), a relação adimensional obtida considera o Número Froude da descarga de fundo com o expoente 0,5.

Como explicado anteriormente, só é possível calcular as velocidade de entrada na estrutura estudada nos ensaios com diâmetros de 32 e 50 mm e no ensaio de diâmetro 75 mm em que se utilizou um CAP. As velocidades calculadas pela equação 15 para esses ensaios se apresentam na Tabela 4.

Tabela 4: Velocidade média de ingresso nas ranhuras.

Material	Diâmetro (mm)	Vazão (l/s)	N_r	u_r (m/s)	H_a (m)
Areia	32	0,82	9	0,566	0,358
	32	0,77	9	0,532	0,347
	32	0,87	9	0,601	0,399
	32	0,88	9	0,608	0,399
	50	1,26	9	0,357	0,162
	50	1,30	9	0,368	0,180
	50	1,70	10	0,433	0,251
	50	1,72	10	0,438	0,249
	50	2,14	11	0,495	0,370
	50	2,15	11	0,498	0,368
	50	2,19	11	0,507	0,379
	50	2,19	11	0,507	0,380
	50	2,27	11	0,526	0,394
	Borracha	50	1,23	9	0,348
50		1,70	10	0,433	0,245
50		1,70	10	0,433	0,247
50		2,15	10	0,547	0,395
50		2,40	9	0,679	0,382
75 (CAP)		5,00	5	1,132	0,373

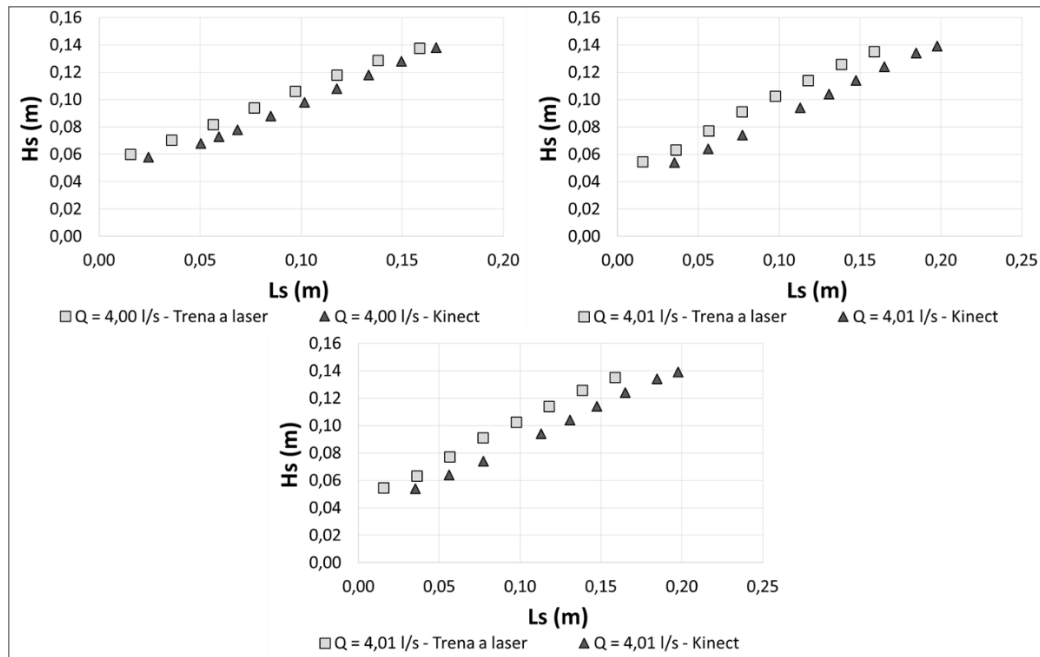
Para areia e DN50 a velocidade variou 47% e para DN32 a variação foi de 14%. Contudo, essas variações não representam um aumento apreciável do alcance de remoção como mostra a proximidade dos perfis nas Figuras 42-a e 42-b. É importante notar que nos

ensaios de DN50 com o aumento da vazão também houve um aumento do número de ranhuras desobstruídas. Isso ocasionou a divisão da vazão por um número maior de aberturas e, assim, o aumento da velocidade foi menos expressivo do que teria sido se o número de ranhuras se mantivesse constante. O ensaio de DN75 com CAP apresentou a maior velocidade e, de fato, possui um dos maior alcances máximos (na cota mais elevada) e uma das maiores remoções em cotas inferiores às ranhuras dentre os ensaios com DN75 conforme mostra a Figura 42 c. No entanto, seu alcance de remoção não difere consideravelmente de outros ensaios realizados com a mesma vazão e ponta do tudo desobstruída, ou seja, com vazão ingressando através das ranhuras e da ponta do tubo, o que ocasiona uma diminuição da vazão que entre pelas ranhuras. Todavia, entre todos os ensaios de DN75 e vazão de 5 l/s, a coluna de água variou somente 16%, isso indica que não se verificou importância ao menos direta da velocidade sobre L_s com os experimentos realizados.

Não se nota uma variação tão grande de L_s com o aumento da velocidade também porque esta diminui com o quadrado da distância (MAHMOOD, 1987); então, por exemplo, dobrar a velocidade de entrada nas ranhuras não faz dobrar a distância a que se gera a velocidade mínima para remover sedimento.

A Figura 43 apresenta uma comparação dos resultados obtidos com o escaneamento 3D em relação à trena a laser. A forma do perfil está bem representada em ambos casos, entretanto, o escaneamento apresenta valores de L_s superiores. Isso se pode atribuir ao fato de que com o escaneamento a interpolação se dá entre pontos espaçados poucos milímetros entre si, ao passo que com a trena a laser o menor intervalo de amostragem foi de 4 cm. Além disso, embora o alinhamento das duas batimetrias tendo como referência a geratriz superior da extremidade do tubo, esse alinhamento foi feito de maneira visual ainda não se obteve uma forma de alinhar exatamente as duas batimetrias.

Figura 43: Comparação de perfis obtidos a partir das duas técnicas de obter a batimetria.



5.3.3 Proposta de Adimensional

Quatro equações definiriam a extensão da cava de erosão: uma para P1, uma para P2 e P5, uma para P3 e uma para P4. A busca de uma equação que represente o funcionamento da estrutura proposta se deu através da adimensionalização dos perfis P2, pois nos perfis P5 não se conhece a velocidade do escoamento. Supondo que a forma do perfil é similar para diferentes relações H_s/D (e isso é observado dado a grande semelhança entre os perfis nos ensaios de diferentes diâmetros), obtém-se mais possibilidades de H_s/D ao se adimensionalizar todo o perfil em vez de somente o alcance máximo. Além disso é possível prever o perfil inteiro da cava.

Os grupos adimensionais empregados foram obtidos a partir do teorema dos π de Vaschy-Buckingham. As variáveis empregadas foram u_r , H_a , ρ_s , ρ , D , R , d , H_s , g e L_s . Os grupos adimensionais obtidos podem ser divididos em dois tipos: os que variam ao longo do perfil e que, portanto, condicionam a forma do perfil adimensionalizado (H_a/H_s , H_s/D ,

H_s/R , H_s/d , L_s/D , L_s/R , H_a/L_s , L_s/H_s); e os que não variam ao longo do perfil, servindo para agrupar os perfis adimensionalizados dos diferentes ensaios (H_a/D , H_a/R , R/d , H_a/d , D/d , $u_r/(gd)^{0.5}$, $(\rho_s-\rho)\rho$, $u_r/[gd(\rho_s-\rho)/\rho]^{0.5}$). Também foram verificados os grupos adimensionais mais relevantes empregados por outros autores. Embora o fator de forma das partículas tenha se mostrado importante em alguns ensaios, os resultados mostraram que sua influência diminuiu com o aumento da vazão e do diâmetro. Em um caso de aplicação em protótipo, o diâmetro e as vazões seriam muito superiores aos utilizados neste trabalho, de maneira que o fator de forma seria irrelevante. Assim sendo, decidiu-se não considerá-lo na obtenção do adimensional.

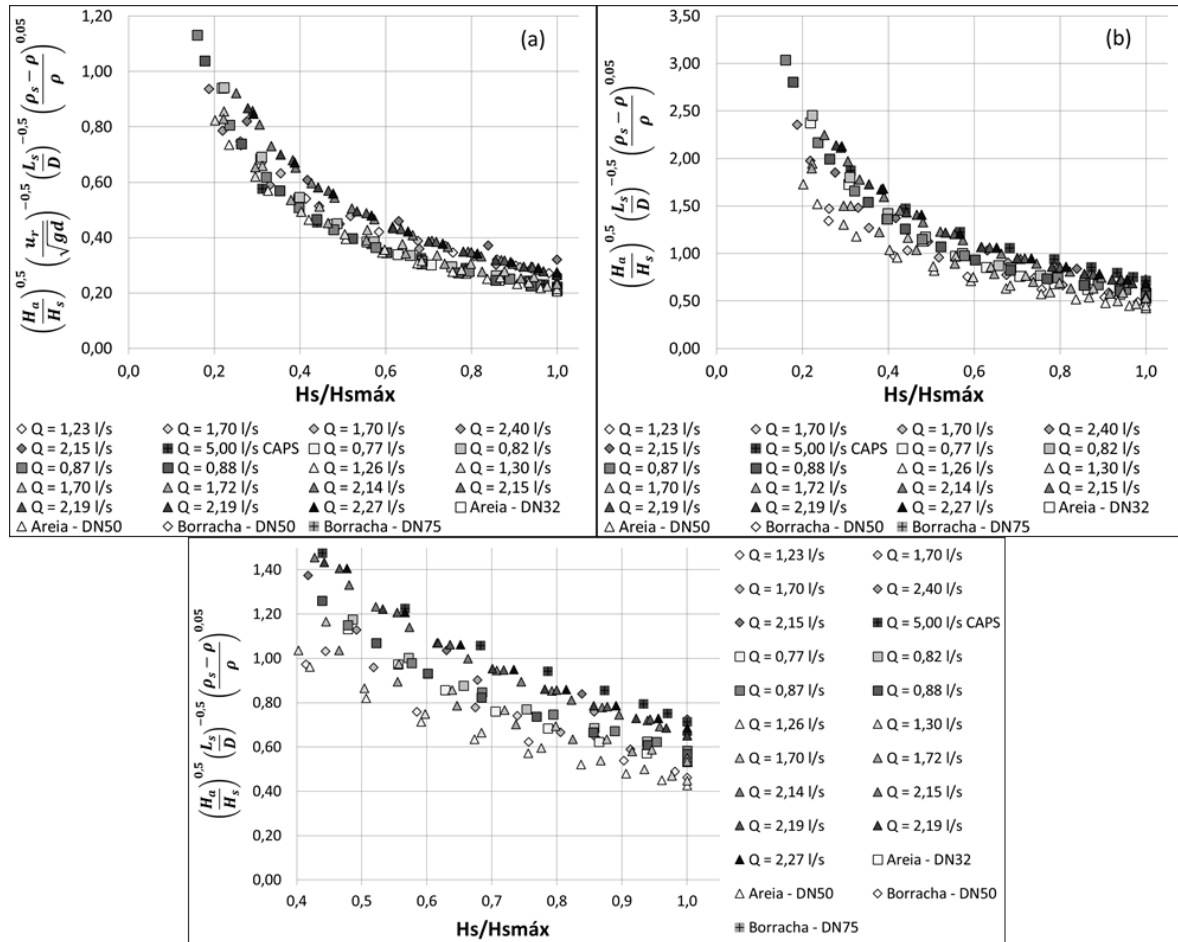
Segundo o teorema dos π , como são 10 as grandezas secundárias consideradas e 3 as grandezas fundamentais (tempo, distância e massa), seria possível agrupar as grandezas secundárias em 7 grupos adimensionais independentes. No adimensional final nem todos os 7 grupos foram considerados pois nem todos se mostraram relevantes na descrição do fenômeno estudado.

Tendo em conta que se adimensionalizaria todo o perfil, pareceu razoável que em um dos eixos do gráfico adimensional obtido figurasse uma relação que facilite a identificação da posição dentro do perfil que se quer estimar. Assim sendo, no eixo das abscissas optou-se por utilizar somente a relação $H_s/H_{smáx}$, que varia de 0 a 1 sendo 0 a base do depósito de sedimentos ou leito original do reservatório e 1 o topo ou superfície do depósito de sedimentos (Figura 30). No eixo das ordenadas, então, localiza-se a relação composta pelos grupos adimensionais.

Como discutido anteriormente, acredita-se que nos ensaios realizados não foi possível observar influência da velocidade no alcance de remoção de sedimentos, o que induziria à sua desconsideração na adimensionalização. Contudo, a fim de comprovar essa suposição, elaborou-se o gráfico adimensional a partir dos dados dos ensaios em que a velo-

cidade é conhecida (Tabela 3) e se comparou o mesmo resultado para os mesmos dados sem ter em conta a velocidade. O resultado se apresenta na Figura 44.

Figura 44: Proposta de adimensional tendo (a) e não tendo (b e c) em conta a velocidade.



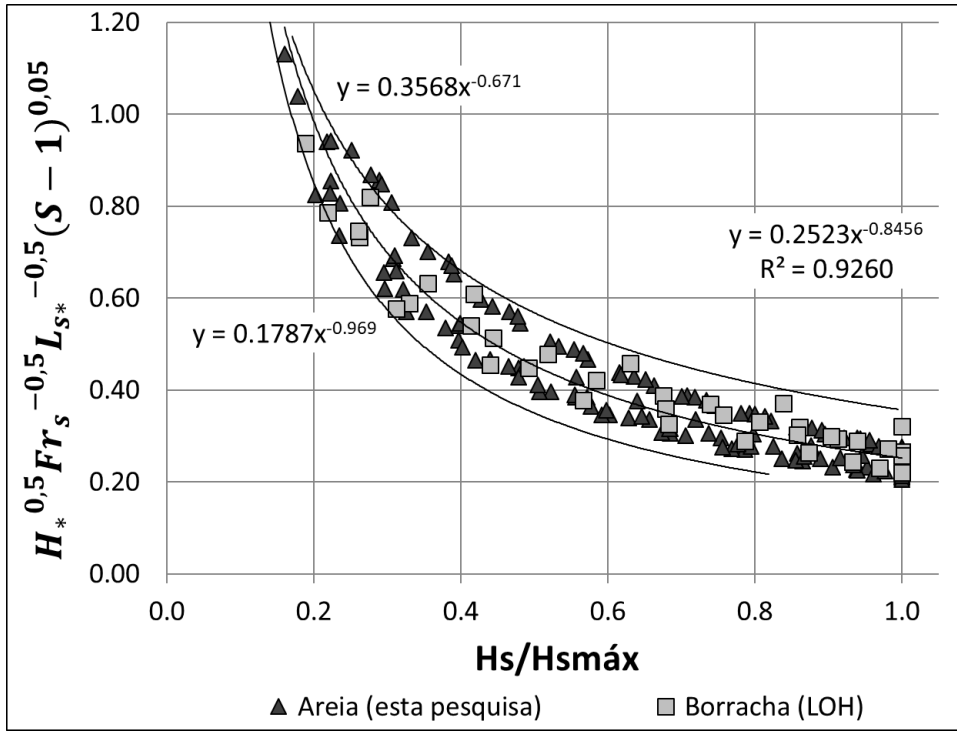
Ao desconsiderar-se a velocidade (Figura 44-b), pode-se cair no equívoco de pensar que a relação segue sendo satisfatória já que a forma do gráfico se mantém e a dispersão dos dados não aumenta muito. Entretanto, uma verificação mais atenta verifica que em 44-a os ensaios com maiores vazões se distribuem por todo o agrupamento de perfis, ao passo que em 44-b as curvas estão ordenadas por vazão em ordem crescente de baixo para cima (na Figura 44-c pode-se observar com mais detalhe). Isso faria com que em uma aplicação deste gráfico, mesmo que adimensionalizado, com uma vazão superior às utilizadas

nos ensaios, o ponto buscado caia fora da curva ajustada. Em (a) não se observa essa tendência, o que indica que a velocidade, na forma do número de Froude do grão ou do sedimento (Fr_s), propicia o correto agrupamento dos dados embora não se verifique influência direta no alcance de remoção L_s .

Na verdade, o parâmetro que considera a velocidade é muito similar ao Número de Shields modificado empregado nas equações 6 e 7, com a diferença de que a relação entre a densidade do sedimento e da água estão outro parâmetro adimensional. Tentou-se utilizar o mesmo parâmetro de Shields modificado, pois se julgou importante já que se está tratando de um fenômeno de transporte de sedimentos. Contudo, como se pode notar, a relação entre massas específicas se mostrou pouco representativa ao estar elevada à potência 0,05, ou seja, o fenômeno seria independente da densidade do material que compõe o leito. Esse resultado provavelmente está distorcido pelo fator de forma dos grãos de borracha, que fizeram com que L_s para borracha fosse menor ou igual ao da areia quando se esperava que fosse maior.

Como mencionado anteriormente, H_a/H_s apresenta-se como parâmetro importante para a representação do fenômeno. O parâmetro L_s/D permite, através do isolamento de L_s , atingir o objetivo final da equação: estimar o alcance de remoção da descarga de fundo proposta. A Figura 45 apresenta a equação ajustada.

Figura 45: Relação adimensional que representa a remoção de sedimentos pelas ranhuras.



Ajustou-se uma curva do tipo potencial e se obteve R^2 igual a 0,9260, o que indica um muito bom ajuste aos dados. A equação obtida é

$$H_*^{0,5} Fr_s^{-0,5} L_{s*}^{-0,5} (S - 1)^{0,05} = 0,2523 \left(\frac{H_s}{H_{smáx}} \right)^{-0,8456} \quad (19)$$

onde

$$H_* = \frac{H_a}{H_s} \quad (20)$$

$$Fr_s = \frac{u_r}{\sqrt{gd}} \quad (21)$$

$$L_{s*} = \frac{L_s}{D} \quad (22)$$

$$S = \frac{\rho_s}{\rho} \quad (23).$$

Isolando L_s , obtém-se

$$L_s = D \left[0,2523 \left(\frac{H_s}{H_{smáx}} \right)^{-0,8456} H_*^{-0,5} Fr_s^{0,5} (S - 1)^{-0,05} \right]^{-2} \quad (24)$$

que pode ser aplicada para estimar o alcance de remoção para determinada cota se são conhecidos o sedimento que compõe o depósito, a velocidade de ingresso à ranhura, a carga hidráulica, a espessura do depósito de sedimento e o diâmetro da estrutura.

Também foram propostas duas curvas envoltórias ao ajuste dos dados que foram obtidas com o software CurveExpert®. As envoltórias dizem respeito à região com 95% de probabilidade de conter dados futuros. As envoltórias superior e inferior são, respectivamente

$$H_*^{0,5} Fr_s^{-0,5} L_{s*}^{-0,5} (S - 1)^{0,05} = 0,3568 \left(\frac{H_s}{H_{smáx}} \right)^{-0,6709} \quad (25)$$

$$H_*^{0,5} Fr_s^{-0,5} L_{s*}^{-0,5} (S - 1)^{0,05} = 0,1787 \left(\frac{H_s}{H_{smáx}} \right)^{-0,9689} \quad (26).$$

Isolando L_s obtém-se

$$L_s = D \left[0,3568 \left(\frac{H_s}{H_{smáx}} \right)^{-0,6709} H_*^{-0,5} Fr_s^{0,5} (S - 1)^{-0,05} \right]^{-2} \quad (27)$$

$$L_s = D \left[0,1787 \left(\frac{H_s}{H_{smáx}} \right)^{-0,9689} H_*^{-0,5} Fr_s^{0,5} (S - 1)^{-0,05} \right]^{-2} \quad (28).$$

Considerando que as variáveis de entrada são as mesmas, a principal diferença entre as equações são os coeficientes 0,3568 e 0,1787. Como ambos são elevados à potên-

cia -2, na Equação 27 o resultado é multiplicado por 7,86 e na Equação 28 é multiplicado por 31,32. Assim sendo, a envoltória que se deveria utilizar em um dimensionamento conservador é a superior, Equações 25 e 27, pois resulta em alcances de remoção menores.

A equação 19 é uma das quatro equações que se supõe que definam os alcances de remoção da cava gerada pela estrutura de descarga de fundo proposta, dando conta da remoção por parte das ranhuras exclusivamente. Como explicado em 5.1, neste trabalho não foi possível obter a velocidade de passagem nas ranhuras e na ponta do tubo no caso B a partir dos dados de que se dispõem diretamente. Assim sendo, seria impossível, em princípio, obter relações adimensionais para o funcionamento da estrutura no caso B tendo em conta a velocidade. Propõe-se o seguinte procedimento a fim de contornar o problema exposto.

Percebe-se que os perfis P2 e P5 (devidos somente à ação das ranhuras) de todos os ensaios para um mesmo material guardam grande semelhança entre si enquanto à sua forma quando for minimizado o efeito do fator de forma dos grãos. Parece razoável presumir que os perfis P5 do caso B possuem uma lei de funcionamento igual à do P2 do caso A, ainda que se desconheça a velocidade naquela situação. Assume-se, então, que a equação 19 é válida para o perfil P5 dos casos B. Conhecendo L_s nessas situações (obtidos dos perfis nas Figuras 38 e 39), obtém-se a velocidade para os perfis P5 (u_r , ou seja, a velocidade de passagem do escoamento por uma ranhura). Calcula-se Q_r isolando-o na equação 15:

$$Q_r = u_r A_r \quad (15).$$

Calcula-se Q_{rt} isolando-o na equação 14:

$$Q_{rt} = Q_r N_r \quad (14).$$

Calcula-se Q_p isolando-o na equação 18:

$$Q_p = Q - Q_{rt} \quad (18).$$

Calcula-se a velocidade média do escoamento na ponta do tubo com a equação

$$u_p = Q_p/A_p = Q_p/(\pi D^2/4) \quad (29)$$

onde A_p é a área de seção transversal da extremidade da descarga de fundo. De porte da velocidade nas ranhuras e na ponta do tubo, buscam-se relações adimensionais para a remoção de sedimentos nos perfis P1, P3 e P4.

O procedimento apresentado – e as suposições em que se baseia – advêm da observação e interpretação da forma da cava e das partes da estrutura responsáveis pela remoção do sedimento em cada ensaio. Os valores de velocidade obtidos e a distribuição de vazão ao longo da estrutura poderiam ser verificados com a realização de novos ensaios e a medição da velocidade localmente. Bem como a suposta interferência ente a ponta do tubo e as ranhuras mais de montante poderia ser verificada através da visualização do escoamento com traçadores.

5.3.4 Limites de Aplicação

Este trabalho não possui um protótipo como referência para aplicar os resultados obtidos. Contudo, se for considerada uma escala de redução geométrica 1:20, a altura do modelo em protótipo representaria uma barragem de 12 m de altura – o que a classifica como uma barragem de pequena altura, ou seja, menor que 15 m de altura (ANA, 2016).

Considerando que o modelo experimental estivesse concebido na escala geométrica 1:20, sugere-se que o intervalo de validade para a equação 19 seja: cargas hidráulicas (H_a) entre 3,20 e 8,00 m e diâmetros da descarga de fundo (D) entre 0,65 e 2,00 m.

CAPÍTULO 6: CONCLUSÕES

Atendendo ao objetivo principal deste trabalho, os resultados dos ensaios realizados permitiram avaliar o funcionamento da estrutura de descarga de fundo proposta. Observou-se que a forma da erosão gerada está relacionada ao tipo de abertura na descarga de fundo e com o escoamento através da estrutura nos dois casos observados: a remoção devida às ranhuras é inferior à causada pela ponta do tubo.

Observou-se a influência das variáveis que intervêm no fenômeno de remoção de sedimentos através da análise dos perfis obtidos das batimetrias. A carga hidráulica se afirmou como um dos principais parâmetros na representação do fenômeno estudado; reafirmando o fato de ser a variável mais importante para desencadear a erosão do depósito de sedimentos (FATHI-MOGHADAM et al., 2010) e sendo um dos parâmetros mais relevantes no adimensional obtido na forma da relação H_a/H_s .

Os ensaios realizados não permitiram verificar a influência direta da velocidade de ingresso nas ranhuras na variação de L_s , contudo, essa variável se mostrou importante para o agrupamento dos perfis adimensionalizados.

O aumento do diâmetro atuou no sentido de diminuir os efeitos causados pelo fator de forma dos grãos de borracha, fazendo com que a inclinação do talude nesse caso se aproximasse à inclinação do talude de areia nos diâmetros 75 e 100 mm.

Não foi possível verificar completamente a influência da massa específica das partículas. Esperava-se que L_s fosse maior nos ensaios com borracha granulada, entretanto, observou-se o contrário e se atribuiu o resultado ao fator de forma dos grãos, os quais são muito angulosos, o que termina por dificultar sua remoção pelo escoamento. Entretanto, verificou-se comportamento esperado das partículas menos densas no fato de que houve

remoção em cotas inferiores às da base das ranhuras para os ensaios com borracha e não para os com areia.

O fator de forma foi, portanto, o provável responsável da menor relevância da densidade dos materiais na equação 19. Isso leva a sugerir o emprego de grãos mais esféricos em estudos futuros que envolvam a utilização de modelos físicos.

Atendendo ao objetivo secundário desta pesquisa, derivou-se uma equação para a remoção de sedimentos através das ranhuras da estrutura proposta. A equação 19 contém as variáveis que se observaram como as mais relevantes para a adimensionalização dos perfis e seu agrupamento, apresentando bom ajuste aos dados. Sua aplicação, no entanto, não pode ser efetuada de maneira irrestrita, sendo os limites superiores de aplicação propostos os valores de 8,00 m de carga hidráulica e 2,00 m de diâmetro da descarga de fundo.

É importante atentar para as limitações e dificuldades enfrentadas na utilização deste modelo. Ambos sedimentos empregados, principalmente a areia, foram bem selecionados, de forma que se deveria aplicar a equação 24 com cautela para depósitos de sedimento com granulometria mais estendida. Também somente foram empregados sedimentos não-coesivos e sabe-se que em casos reais o tipo de sedimento que tende a se depositar junto ao maciço das barragens pode ser sedimento mais fino, talvez sendo coesivo. O transporte e a erosão de sedimentos coesivos não são iguais aos de sedimentos não-coesivos, principalmente, se o depósito de sedimentos possui algum grau de consolidação (caso em que a remoção causada pelo acionamento da estrutura deve ser reduzida). Isso chama a atenção para o fato de que é mais interessante acionar a descarga de fundo periodicamente a fim de evitar a consolidação dos depósitos nas proximidades da descarga de fundo.

Ainda sobre sedimentos, o fator de forma dos grãos de borracha apresentou influência sobre os resultados. O fato de que com o aumento do diâmetro dentro do próprio modelo essa característica começa a perder importância sugere que em um caso real (em

que o diâmetro será ainda maior e o sedimento ainda menor, provavelmente) o fator de forma será irrelevante, de forma que em futuros estudos seria importante empregar sedimentos que eliminem sua influência. Além disso, os ensaios foram realizados com água clara. Em um caso real deve haver sedimento em suspensão vindo de montante e isso pode afetar a dimensão final da cava dado que parte da capacidade de transporte do escoamento já pode estar satisfeita com o sedimento de montante.

Outra dificuldade encontrada diz respeito à altura do modelo, o que não permitiu ensaiar com maiores cargas hidráulicas, e, portanto, maiores velocidades – que poderiam indicar a influência desta variável.

O emprego do escaneamento 3D, ainda que pouco explorado (somente em três ensaios), apresentou grande ganho de tempo de obtenção dos dados e detalhamento em comparação ao resultado obtido com a trena a laser.

CAPÍTULO 7: RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Embora se tenha observado e podido analisar diversos aspectos da forma da cava e do escoamento através da descarga de fundo do tipo tubo ranhurado, resta muito a compreender sobre o fenômeno. Considerando os resultados obtidos, sugerem-se as seguintes recomendações para trabalhos futuros:

1. Como continuação a este trabalho, sugere-se seguir o procedimento proposto em 5.3.3 para a efetuar a análise dos perfis P1, P3 e P4 e derivar equações análogas à equação 19;
2. As descargas de diâmetros 75 e 100 mm não foram obstruídas em sua extremidade como as de diâmetro 32 e 50 mm, provavelmente, porque possuem menor comprimento em relação ao diâmetro. Além disso, observou-se que mais ranhuras foram desobstruídas com o aumento da carga hidráulica. O exposto indica a necessidade de estabelecer alguma relação entre as características do escoamento e do sedimento com a geometria da estrutura a fim de estimar quantas ranhuras podem ser desobstruídas e se a ponta do conduto será desobstruída ou não (saber se a operação se dará em caso A ou em caso B). Também seria interessante realizar ensaios com peças de maior comprimento e diâmetro a fim de verificar a importância do efeito de diminuição de L_s das ranhuras de jusante para montante com a mudança de escala;
3. O descarregador de fundo estudado sempre foi nivelado com a horizontal. Reservatórios reais ocupam o leito e o vale de um rio, de forma que sua seção transversal não é plana como a do experimento realizado neste trabalho.

Assim sendo, uma pesquisa futura poderia estudar o funcionamento da mesma peça estando inclinada em relação à horizontal;

4. É importante ter em conta que os resultados observados somente valem para estruturas com uma relação R/D igual a 0,1. Para generalizar o funcionamento da estrutura, é necessário ainda investigar a variação do tamanho das ranhuras e do espaçamento entre as mesmas;
5. Uma análise fundamental para a aplicação do adimensional obtido é a dos coeficientes de descarga do descarregador de fundo proposto. Para que se possa estimar uma velocidade em função da carga hidráulica e poder aplicar a equação 19, é preciso conhecer o coeficiente de descarga se a estrutura é considerada como um orifício;
6. Sugere-se empregar mais sedimentos com diferentes densidades e com partículas tão esféricas quando se possa;
7. A fim de generalizar ainda mais os resultados, sugere-se a realização de ensaios com diferentes espessuras de depósito de sedimento;
8. Seria interessante também desenvolver uma equação que descreva o desenvolvimento da cava ao longo do tempo após o acionamento da descarga de fundo. Isso indicaria o tempo necessário para atingir dimensões consideráveis e assim evitar desperdício de água. No momento atual da pesquisa, pode-se sugerir a regra prática de que a maior parte do sedimento é removido nos primeiros instantes e que quando a água não sai turva a jusante, pode-se considerar que já não haverá aumento das dimensões da cava;
9. Sugere-se a investigação mais aprofundada do uso do Kinect® para o escaneamento de batimetrias em modelos físicos reduzidos e sua comparação sistemática com outros métodos mais tradicionais.

10. Em barragens de materiais soltos, a velocidade do escoamento poderia erodir a base do talude, de forma que seria interessante realizar ensaios com um joelho de 90° voltado para montante na ponta da descarga de fundo de forma e afastar as altas velocidades do corpo da barragem.
11. Por fim, sugere-se o estudo do funcionamento da descarga de fundo tipo tubo ranhurado posicionada perpendicularmente ao barramento (para dentro do reservatório) a fim de verificar se é possível a remoção de sedimento dos depósitos no interior do reservatório.

REFERÊNCIAS

- ABREU, A. S.; HAMPE, R. F.; FORMIGHERI, M. G. S.; DA SILVEIRA, D. S.; DESESSARDS, F. P.; TEIXEIRA, E. D.; MARQUES, M. G. ESTIMATIVA DA REMOÇÃO DE SEDIMENTOS EM RESERVATÓRIOS DE PEQUENAS BARRAGENS ATRAVÉS DE DESCARREGADORES DE FUNDO. In: XII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE SEDIMENTOS 2016, Porto Velho. **Anais...** Porto Velho
- ABREU, A. S.; DE OLIVEIRA, V. L.; CUNICO, P. G. R.; CAMARGO, P. L. B.; FERLA, R.; MARTINEZ, C. B.; ENDRES, L. A. M.; SANAGIOTTO, D. G.; DAI PRÁ, M.; TEIXEIRA, E. D.; MARQUES, M. G. Análise Preliminar do Alcance de Remoção de Sedimentos por Descarregadores de Fundo em Pequenas Barragens. In: XXVIII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA 2018, Buenos Aires, Argentina. **Anais...** Buenos Aires, Argentina
- ABREU, A. S. **Análise experimental em modelo físico de estruturas hidráulicas de remoção de sedimentos em barragens: Descarregadores de fundo.** 2019. Universidade Federal de Pelotas, [s. l.], 2019.
- AINON, M. **Remoção de Sedimentos em Reservatórios de Barragens de Usinas Hidrelétricas através de Descarga de Fundo.** 2018. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, [s. l.], 2018.
- AMIRSAYAFI, P. Measures for Success in Dam Bottom Outlet Design. **GSTF Journal of Engineering Research**, [s. l.], 2015.
- ANA. **Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens.** Brasília. Disponível em: <<http://arquivos.ana.gov.br/cadastros/barragens/ManualEmpreendedor/GuiaPraticoDePequenasBarragens.PDF>>.
- ATKINSON, E. **The feasibility of flushing sediment from reservoirs.** HR Wallingford, Reino Unido.
- BRANDT, S. A. A review of reservoir desiltation. **International Journal of Sediment Research**, [s. l.], v. 15, p. 321–342, 2000.
- CARVALHO, N. de O.; FILIZOLA JÚNIOR, N. P.; SANTOS, P. M. C.; LIMA, J. E. F. W. **Guia de avaliação de Assoreamento de Reservatórios.** [s.l: s.n.]. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/biblioteca/downloads/livros/GuiaAsso.pdf>>.
- CASTILLO, L. G.; CARRILLO, J. M.; ÁLVAREZ, M. A. Complementary Methods for Determining the Sedimentation and Flushing in a Reservoir. **Journal of Hydraulic Engineering**, [s. l.], 2015.
- CHAUDHRY, M. A.; REHMAN, H. Worldwide Experience of Sediment Flushing Through Reservoirs. **Mehran University Research Journal of Engineering & Technology**, [s. l.], 2012.
- CHI WANG, J. Hydro-Induction Sediment Discharge Technique for Preventing Sedimentation. In: WORLD WATER AND ENVIRONMENTAL RESOURCES CONGRESS 2004, Salt Lake City. **Anais...** Salt Lake City: American Society of Civil Engineers, 2004.
- EMAMGHOLIZADEH, S.; BINA, M.; FATHI-MOGHADAM, M; GHOMEYSHI, M. Investigation and Evaluation of the Pressure Flushing Through Storage Reservoir. **ARNP J. Eng. Appl. Sci.**, [s. l.], v. 1, 2006.
- EMAMGHOLIZADEH, S.; FATHI-MOGHDAM, M. Pressure Flushing of Cohesive Sediment in Large Dam Reservoirs. **Journal of Hydrologic Engineering**, [s. l.], 2014.
- EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Balanço Energético Nacional 2018. **Epe**, [s. l.],

2017.

FATHI-MOGHADAM, M.; EMAMGHOLIZADEH, S.; BINA, M.; GHOMESHI, M. Physical modelling of pressure flushing for desilting of non-cohesive sediment. **Journal of Hydraulic Research**, [s. l.], 2010.

GONZALEZ, H.; RODRÍGUEZ-GONZÁLVEZ, P.; MATÍNEZ-SÁNCHEZ, J.; GONZÁLEZ-AGUILERA, D.; ARIAS, P.; GESTO, M; DÍAZ VILARIÑO, L. Metrological comparison between Kinect I and Kinect II sensors. **Measurement**, [s. l.], v. 70, 2015.

GRAF, W. H. **Hydraulics of sediment transport**. [s.l.] : McGraw-Hill, 1971.

HAI CHEN, Y.; L. LOPEZ, J.; V. RICHARDSON, E. Mathematical modeling of sediment deposition in reservoirs. **J. HYDRAUL. DIV.: PROC. ASCE**, [s. l.], v. 104, p. 1605–1616, 1978.

HOWARD, T. & **A History of Dams: From Ancient Times to Today**. 2016. Disponível em: <<https://tataandhoward.com/2016/05/a-history-of-dams-from-ancient-times-to-today/>>.

KINETISENSE. **What is Kinect Motion Capture?** [s.d.]. Disponível em: <<https://kinetisense.com/kinect-motion-capture/>>.

KONDOLF, G. M.; GAO, Y.; ANNANDELE, G. W.; MORRIS, G. L.; JIANG, E.; ZHANG, J.; CAO, Y.; CARLING, P.; FU, K.; GUO, Q.; PETEUIL, C.; SUMI, T.; WANG, H.; WANG, Z.; WEI, Z.; WU, B.; YANG, C. T. Sustainable sediment management in reservoirs and regulated rivers: Experiences from five continents. **Earth's Future**, [s. l.], 2014.

LAI, J. S.; SHEN, H. W. Flushing sediment through reservoirs. **Journal of Hydraulic Research**, [s. l.], 1996.

LÓPEZ, F.; RODRIGUEZ, A.; DÖLLING, O. R. **Inventario de presas y centrales hidroeléctricas de la República Argentina**. Buenos Aires, Argentina.

MADADI, M. R.; RAHIMPOUR, M.; QADERI, K. Improving the Pressurized Flushing Efficiency in Reservoirs: an Experimental Study. **Water Resources Management**, [s. l.], 2017.

MAHMOOD, K. **Reservoir sedimentation - impact, extent and mitigation**. Washington, DC.

MARTINS, R. (ED.). **Recent Advances in Hydraulic Physical Modelling**. [s.l.: s.n.].

MESHKATI, M. E.; DEHGHANI, A. A.; NASER, G.; EMAMGHOLIZADEH, S.; MOSAEDI, A. Evolution of Developing Flushing Cone during the Pressurized Flushing in Reservoir Storage. **International Journal of Environmental, Chemical, Ecological, Geological and Geophysical Engineering**, [s. l.], 2009.

MESHKATI, M. E.; DEHGHANI, A. A.; SUMI, T.; MOSAEDI, A.; MEFTAH, M. Experimental Investigation of Pressure Flushing Technique in Reservoir Storages. **Water and Geoscience**, [s. l.], n. 54, p. 132–137, 2010.

N. TALEBBEYDOKHTI; NAGHSHINEH, A. Flushing sediment through reservoirs. **Journal of Hydraulic Research**, [s. l.], 2004.

PETEUIL, C.; FRUCHART, F.; ABADIE, F.; REYNAUD, S.; CAMENEN, B.; GUERTAULT, L. Sustainable management of sediment fluxes in reservoir by environmental friendly flushing: the case study of the Génissiat dam on the Upper Rhône River (France). **ISRS Kyoto, Japan**, [s. l.], 2013.

SARAIVA, L. S.; ABREU, A. S.; DA SILVEIRA, D. S.; DESESSARDS, F. P.; FERLA, R.; DAI PRÁ, M.; TEIXEIRA, E. D.; ENDRES, L. A. M.; MARQUES, M. G. Previsão do alcance da remoção de sedimentos por descarga de fundo de pequenas barragens. In: SIMPÓSIO DE HIDRÁULICA E RECURSOS HÍDRICOS DOS PAÍSES DE LÍNGUA PORTUGUESA 2017,

Porto. **Anais...** Porto

SAYAH, S. M.; CALVO, S.; BONANNI, S.; FENELLI, A. Design and erection of the 6 bottom outlets of Cerro del Águila dam for flood routing during construction and future sediment flushing. **ResearchGate**, [s. l.], 2016.

SCHLEISS, A. J.; FRANCA, M. J.; JUEZ, C.; DE CESARE, G. Reservoir sedimentation. **Journal of Hydraulic Research**, [s. l.], 2016.

SHEN, H. W. Flushing sediment through reservoirs. **Journal of Hydraulic Research**, [s. l.], v. 37, n. 6, p. 743–757, 1999.

STRAND, R. I.; PEMBERTON, E. L. **Reservoir Sedimentation: Technical Guideline for Bureau of Reclamation**. Denver, Estados Unidos.

WALLING, D. E. Methods of computing sedimentation in lakes and reservoirs, UNESCO technical report, 1985. No of pages: 224. Available from IHP secretariat, division of water sciences, Unesco, Paris, France. **Earth Surface Processes and Landforms**, [s. l.], 2007.

WHITE, W. R. Reservoir sedimentation and flushing. **IAHS Proc. Hydrology in Mountainous Regions**, [s. l.], 1990.

WHITE, W. R.; BETTESS, R. The feasibility of flushing sediments through reservoirs. **International Association of Hydrological Sciences**, [s. l.], 1984.

WWAP. **World Water Development Report 2014**. [s.l: s.n.].