

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO  
AMBIENTAL

ARTHUR COSTA CERQUEIRA

AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DE OBSTÁCULOS NO CONTROLE DE CORRENTES  
DE TURBIDEZ

PORTO ALEGRE

2022

ARTHUR COSTA CERQUEIRA

AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DE OBSTÁCULOS NO CONTROLE DE CORRENTES  
DE TURBIDEZ

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do grau de mestre.

Orientador: Rafael Manica

PORTO ALEGRE

2022

### CIP - Catalogação na Publicação

Costa Cerqueira, Arthur  
AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DE OBSTÁCULOS NO CONTROLE DE  
CORRENTES DE TURBIDEZ / Arthur Costa Cerqueira. --  
2022.  
133 f.  
Orientador: Rafael Manica.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do  
Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas,  
Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e  
Saneamento Ambiental, Porto Alegre, BR-RS, 2022.

1. Modelagem física. 2. Correntes de turbidez. 3.  
Obstáculos. 4. Minibacias. I. Manica, Rafael, orient.  
II. Título.

ARTHUR COSTA CERQUEIRA

AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DE OBSTÁCULOS NO CONTROLE DE CORRENTES  
DE TURBIDEZ

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do grau de mestre.

Aprovado em: Porto Alegre, 30 de março de 2022.

---

Prof. Dr. Rafael Manica – UFRGS  
Orientador

---

Prof. Dr. Maurício Dai Prá  
Examinador

---

Profª. Drª. Carolina Holz Boffo  
Examinadora

---

Dr. Cristiano Fick  
Examinador

## RESUMO

As correntes de turbidez são o principal fenômeno de transporte de sedimentos nos ambientes marinho profundo. Ao longo do seu percurso, essas correntes passam por diversas configurações topográficas (obstáculos) que alteram o seu comportamento hidrodinâmico e deposicional. Essa interação pode ser compreendida em campo, através do monitoramento do fenômeno, ou por meio de estudos experimentais de correntes de turbidez em laboratório escoando sob condições controladas. Assim, essa pesquisa buscou avaliar experimentalmente correntes de turbidez escoando sob leitões com presença de obstáculos, visando o entendimento da interação hidrodinâmica entre o fluxo de sedimento e os seus respectivos depósitos gerados com os obstáculos. Nove simulações físicas com uma mistura de água e carvão mineral ( $C_{vol} = 5\%$ ) pobremente selecionado e cuja mediana ( $D_{50}$ ) é igual a  $47 \mu m$  foram realizadas em um canal de acrílico de dimensões  $4,0 \times 0,49 \times 0,24$  metros. Três vazões de injeção foram empregadas ( $5, 10$  e  $25 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ ) em três configurações topográficas distintas: ensaios de controle sem obstáculos; ensaios com três obstáculos em sequência de  $3 \text{ cm}$  de altura e; ensaios com três obstáculos de  $6 \text{ cm}$  de altura. A partir destas simulações, os resultados indicam que o aumento da vazão de injeção é capaz de depositar partículas maiores em regiões distais da origem, no entanto, a presença de obstáculos alterou esta dinâmica. Quanto maior a altura dos obstáculos, maior é o bloqueio do fluxo e mais alterações nos seus perfis vertical de velocidade, na geometria e no padrão de sedimentação são verificados. Os sedimentos são barrados a montante causando o afinamento dos depósitos gerados. Entre os obstáculos, o fluxo troca de regime de escoamento, criando zonas de recirculação e também alterando o tamanho do grão ali depositado. E, após passagem sobre os mesmos, o fluxo tende a se reestabelecer a sua estrutura hidrodinâmica à condição anterior. A sedimentação dos depósitos apresentou alterações entre os segmentos antes, entre e depois dos obstáculos, sugerindo que os obstáculos funcionam na redistribuição das partículas promovendo diferenças na deposição entre estes trechos. Por último, os ensaios experimentais se mostraram ferramenta eficiente para entender essa interação do fluxo com os obstáculos topográficos, o que levaria, em sistemas naturais análogos, após sucessivas deposições nesta superfície, alterações significativas nas características do depósito gerado.

**Palavras-chave:** Modelagem física. Correntes de turbidez. Obstáculos. Minibacias.

## ABSTRACT

Turbidity currents are the main sediment transport phenomenon in deep marine environments. Along their course, these currents pass through several topographical configurations (obstacles) that change their hydrodynamic and depositional behavior. This interaction can be understood in the field, through the monitoring of the phenomenon, or through experimental studies of turbidity currents in the laboratory flowing under controlled conditions. Thus, this research sought to experimentally evaluate turbidity currents flowing under beds with the presence of obstacles, aiming at understanding the hydrodynamic interaction between the sediment flow and their respective deposits generated with the obstacles. Nine physical simulations with a mixture of water and mineral coal ( $C_{vol} = 5\%$ ) poorly selected and whose median ( $D_{50}$ ) is equal to  $47 \mu\text{m}$  were performed in an acrylic channel of dimensions  $4.0 \times 0.49 \times 0.24$  meters. Three injection discharge were used ( $5, 10$  and  $25 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ ) in three different topographic configurations: control tests without obstacles; tests with three obstacles in a row,  $3 \text{ cm}$  high each; and trials with three  $6 \text{ cm}$  high obstacles. From these simulations, the results indicate that the increase in injection flow is capable of depositing larger particles in regions distal to the origin, however, the presence of obstacles altered this dynamic. The greater is the height of the obstacles, the greater is the flow blockage and more changes in their vertical velocity profiles, geometry and sedimentation pattern are verified. The sediments are dammed upstream causing the thinning of the deposits generated. Among the obstacles, the flow changes the flow regime, creating recirculation zones and also changing the size of the grain deposited there. And, after passing over them, the flow tends to regenerate its hydrodynamic structure similar to the previous condition. The sedimentation of the deposits showed alterations between the segments before, between and after the obstacles, suggesting that the obstacles work in the redistribution of particles promoting differences in the deposition between these stretches. Finally, experimental tests proved to be an efficient tool to understand this flow interaction with topographic obstacles, which would lead, in analogous natural systems, after successive depositions on this surface, to significant changes in the characteristics of the deposit generated.

**Keywords:** Experimental modeling. Turbidity currents. Obstacles.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Classificação dos fluxos gravitacionais de sedimento de Middleton e Hampton (1973). .....	24
Figura 2 - Classificação de fluxos gravitacionais de sedimento quanto a concentração de sedimento (Modificado de: Mulder e Alexander, 2001a). .....	25
Figura 3 - Classificação de fluxos gravitacionais de sedimentos (Modificado de: Haughton, 2009). .....	26
Figura 4 - Classificação de correntes de turbidez de alta densidade (MANICA, 2009). .....	27
Figura 5 - Diagrama esquemático dos tipos de correntes de turbidez (Modificado de: Mulder e Alexander, 2001a) .....	28
Figura 6 - Classificação de correntes de turbidez através de seus processos de iniciação (Adaptado de: PIPER e NORMAK, 2009). .....	29
Figura 7 - Corrente de turbidez quase-permanente (A) e corrente de turbidez pulsante (B) (Adaptado de: KNELLER e BRANNEY, 1995). .....	30
Figura 8 - Modelo de formação de corrente de turbidez proposta por Symons et al. (2017). .....	32
Figura 9 - Estrutura de uma corrente de turbidez (Fonte: o Autor). .....	33
Figura 10 - Comportamento hidrodinâmico de uma corrente de turbidez através do seu perfil de velocidades e perfil de concentrações (Fonte: o Autor). .....	34
Figura 11 - Sequência de Bouma (Shanmugam, 1997). .....	36
Figura 12 - Diagrama esquemática da organização das camadas deposicionais das correntes de turbidez proposta por Lowe (1982) apartir da Sequência de BOUMA (Modificado de: TALLING et al., 2012). .....	37
Figura 13 – Diagrama esquemático de um Turbidito (Adaptado de: PINET, 2017)...	38
Figura 14 - Imageamento tridimensional do assoalho oceânico na margem continental de Saharan, nas Ilhas Canárias, e complexo de feições topográficas e de depósitos de fluxos gravitacionais de sedimentos (GEE et al., 2001). .....	39
Figura 15 - Mudanças no comportamento hidrodinâmico de correntes de turbidez em quebra de declividade (Garcia e Parker, 1989). .....	42
Figura 16 - Distribuição de densidade de depósito em um canal com quebra de declividade indicada pela linha inclinada entre as distâncias 0 e 1 m da entrada (KUBO, 2004). .....	43

Figura 17 - Diagrama esquemático de uma corrente de turbidez escoando sobre um obstáculo (ASGHARI PARI et al., 2010). .....	44
Figura 18 - Distribuição granulométrica ao longo da distância para diferentes alturas de obstáculos (BRUNT et al., 2004). .....	45
Figura 19 - Fenômeno da recirculação da corrente de turbidez identificada pelos perfis de velocidade (Adaptado de: Yaghoubi et al., 2017). .....	46
Figura 20 - Interação hidráulica entre uma corrente de turbidez e um obstáculo (CORREIA, 2012). .....	50
Figura 21 – Diferentes regimes de escoamento e sua interação com os obstáculos. Dada pela altura relativa do obstáculo ( $h$ ) pela altura da corrente ( $h_1$ ) e número de Froude densimétrico ( $Fr$ ) (OSHAGHI et al., 2013). .....	52
Figura 22 - Fluxograma da pesquisa. ....	54
Figura 23 - Croqui do sistema de simulação de corrente de turbidez (folha 6 do Anexo II). .....	55
Figura 24 - Canal de acrílico de simulação das correntes de turbidez. ....	56
Figura 25 - Difusor utilizado na injeção da mistura (as medidas apresentadas estão em milímetros; desenho fora de escala). ....	57
Figura 26 - Câmera filmadora digital de alta definição. ....	58
Figura 27 - Caixa de emissão e processamento de sinal ultrassônico (A) e transdutores emissores e receptores de sinal ultrassônico (B). .....	58
Figura 28 - Croquí do posicionamento das sondas de UVP ao longo do canal de simulação (medidas em centímetros; Anexo II).....	59
Figura 29 – Croqui esquemático do sistema de injeção e da posição do medidor de vazão eletromagnético (as medidas apresentadas estão em centímetros; desenho fora de escala; Anexo II).....	60
Figura 30 - Analisador de partículas a laser da marca Cilas 1180. ....	61
Figura 31 - Diagrama esquemático dos equipamentos utilizados na realização dos ensaios de controle. ....	62
Figura 32 - Diagrama esquemático dos equipamentos utilizados na realização dos ensaios com obstáculos. ....	62
Figura 33 - Curva granulométrica do Carvão 205 utilizado nesta pesquisa (Adaptado de: KOLLER, 2016) .....	63
Figura 34 - Modelo de obstáculos que serão utilizados. ....	66



Figura 35 – Diagrama de arranjos topográficos dos ensaios realizados (fora de escala).....	68
Figura 36 – Diagrama de velocidade média pela distância do canal.....	71
Figura 37 - Perfis médios de velocidade da série 1, sem obstáculos, distribuídos ao longo do canal.....	72
Figura 38 – Perfis médios de velocidade da série 2, com obstáculos de 3 cm de altura (geometria em amarelo na figura), distribuídos ao longo do canal.....	73
Figura 39 - Perfis médios de velocidade da série 3, com obstáculos de 6 cm de altura (geometria em amarelo na figura), distribuídos ao longo do canal.....	74
Figura 40 - Perfis verticais médios adimensionais de velocidades dos ensaios das séries 1 (E1, sem obstáculos), série 2 (E2, com obstáculos de 3 cm de altura), série 3 (E3, com obstáculos de 6 cm de altura). ....	76
Figura 41 - Registro fotográfico das correntes de turbidez da série 1 (sem obstáculos) compreendendo o um trecho de 40 cm do canal, na posição de 200 cm a 240 cm da injeção.....	78
Figura 42 - Registro fotográfico das correntes de turbidez da série 2 (obstáculo $h = 3$ cm) compreendendo o um trecho de 40 cm do canal, na posição de 200 cm a 240 cm da injeção.....	79
Figura 43 - Registro fotográfico das correntes de turbidez da série 3 (obstáculo $h = 6$ cm) compreendendo o um trecho de 40 cm do canal, na posição de 200 cm a 240 cm da injeção.....	79
Figura 44 - Gráfico de tendência do comportamento da espessura da corrente.....	81
Figura 45 - Espessuras de depósito de experimentos da série 1 sem obstáculos (a); série 2 com obstáculos de 3 cm de altura (b); e série 3 com obstáculos de 6 cm de altura (c). ....	82
Figura 46 - Variação do $D_{50}$ para os ensaios com vazões sem obstáculos, com obstáculos de 3 cm e 6 cm, respectivamente (a), (b) e (c).....	84
Figura 47 - Variação do $D_{médio}$ para os ensaios com vazões de 5, 10 e 25 $L.min^{-1}$ , respectivamente (a), (b) e (c). ....	85
Figura 48 – Mapa granulométrico dos depósitos da série 1 de experimentos, sem obstáculos, sendo as vazões (Q) de (a) $Q_1$ de 5 $L.min^{-1}$ ; (b) $Q_2$ de 10 $L.min^{-1}$ ; e (c) $Q_3$ de 25 $L.min^{-1}$ . ....	87

Figura 49 - Mapa granulométrico dos depósitos da série 2 de experimentos, com obstáculos de 3 cm de altura, sendo as vazões (Q) de (a) $Q_1$ de 5 L.min <sup>-1</sup> ; (b) $Q_2$ de 10 L.min <sup>-1</sup> ; e (c) $Q_3$ de 25 L.min <sup>-1</sup> . .....	88
Figura 50 - Mapa granulométrico dos depósitos da série 3 de experimentos, com obstáculos de 6 cm de altura, sendo as vazões (Q) de (a) $Q_1$ de 5 L.min <sup>-1</sup> ; (b) $Q_2$ de 10 L.min <sup>-1</sup> ; e (c) $Q_3$ de 25 L.min <sup>-1</sup> . .....	89
Figura 51 - Perfis de velocidade adimensionalizados e agrupados por vazão, comparando as séries 1, 2 e 3 (sem obstáculos e com obstáculos de 3 cm e 6 cm, respectivamente).....	91
Figura 52 - Relação estabelecida entre a velocidade adimensionalizada e o número de Froude densimétrico entre os ensaios com e sem a presença de obstáculos. ....	93
Figura 53 – Relação estabelecida entre o número de Froude e as alturas máximas adimensionais. ....	94
Figura 54 - Variação do número de Froude ao longo do comprimento do canal.....	95
Figura 55 – Relações entre o número de Froude e a altura adimensional do obstáculo, conforme diagrama proposto por Oshaghi et al. (2013). ....	97
Figura 56 – Relação adimensional estabelecida pelo número de Froude e a velocidade máxima adimensional.....	98
Figura 57 – Relação entre altura adimensional onde a velocidade é máxima e o número de Froude.....	99
Figura 58 – Relação estabelecida entre fluxo de sedimentos e o número de Froude para as diferentes vazões. ....	100
Figura 59 – Fluxo sedimentar relacionado com a velocidade máxima do perfil de velocidades das correntes de turbidez. ....	101
Figura 60 - Diagrama de relações entre os diâmetros adimensionais e o número de Froude densimétrico.....	103
Figura 61 - Diagrama de relações entre o diâmetro médio adimensional e o número de Froude densimétrico.....	104
Figura 62 - Classificação granulométrica de Udden (1914) e Wentworth (1922) (CHRISTOFOLETTI e MORENO, 2017). ....	117

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Percentual de classes granulométricas do Carvão 205 utilizado nesta pesquisa (Adaptado de: KOLLER, 2016). .....	64
Tabela 2 - Semelhança hidráulica de injeção entre ensaios do Processos II e condições de injeção para esta pesquisa.....	66
Tabela 3 - Alturas calculadas dos obstáculos para experimentos da série ET.	67
Tabela 4 - Arranjo de ensaios realizados. ....	68
Tabela 5 - Escala de grau de seleção de grão (FOLK e WARD, 1957). ....	70
Tabela 6 - Parâmetros medidos nos ensaios e utilizados na adimensionalização dos perfis de velocidades.....	75
Tabela 7 - Erro relativo entre os ensaios da série com obstáculos em relação aos ensaios da série sem obstáculos.....	77
Tabela 8 - Variação da espessura da corrente ( $H_t$ ), velocidade da cabeça ( $U_{cab}$ ) e vazão de injeção ( $Q$ ). ....	80
Tabela 9 - Mudanças no gradiente de variação das linhas de tendências do gráfico entre velocidade adimensional ( $u/U_c$ ) pelo número de Froude densimétrico ( $F_{rd}$ ). ....	93
Tabela 10 - Grau de seleção dos depósitos das correntes de turbidez em cada ensaio.....	105

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classificação de fluxos gravitacionais de sedimentos e seus depósitos (Modificado de: Postma, 1986).....	25
Quadro 2 - Estudos dos efeitos da topografia no controle das correntes de turbidez através de modelagem física.....	41
Quadro 3 - Cores de referência para representação gráfica de tamanhos de sedimentos (Adaptado de: Udden (1914) e Wentworth (1922)). .....	86

## LISTA DE SÍMBOLOS

- a – Altura do difusor;
- b – Largura do difusor;
- B – Largura do canal de simulação;
- $C_{vol}$  – Concentração volumétrica da mistura;
- C – Concentração média da corrente de turbidez;
- c – Concentração medida da corrente de turbidez;
- $C_{max}$  – Concentração medida máxima do perfil de concentração da corrente de turbidez;
- D – Diâmetro de partícula;
- $D_{50}$  – Mediana dos diâmetros da amostra de sedimento;
- $D_{medio}$  – Média dos diâmetros da amostra de sedimento;
- $d_i$  – Diâmetro interno da tubulação de injeção.
- $Fr_d$  – Número de Froude densimétrico;
- g – Aceleração da gravidade;
- $g'$  – Aceleração da gravidade reduzida;
- H – Altura média da corrente de turbidez;
- $H'$  – Altura relativa da corrente de turbidez pela altura do obstáculo;
- $H'_c$  – Altura relativa da corrente de turbidez pela altura do obstáculo em condição de escoamento crítico na crista do obstáculo;
- $H_t$  – Altura média do corpo corrente de turbidez;
- $h_{umax}$  – Altura onde ocorre a velocidade máxima do perfil de velocidade;
- $h_{ob}$  – Altura do obstáculo;
- L – Comprimento do canal de simulação;
- p – Profundidade do canal de simulação;
- $p_i$  – Profundidade no ponto i do leito do canal de simulação;
- $p_o$  – Profundidade no marco zero do canal de simulação;
- Q – Vazão;
- q – Fluxo de sedimento ( $m^3.s^{-3}$ )
- $q_A$  – Vazão unitária da corrente de turbidez;
- $q_{ob}$  – Vazão unitária da corrente de turbidez na crista do obstáculo;
- $Ri$  – Número de Richardson;
- s – Declividade do leito;

T – Temperatura;

U – Velocidade média da corrente de turbidez;

$U_c$  – Velocidade média da cabeça da corrente de turbidez;

$U_{média}$  – Velocidade média do perfil de velocidade da corrente de turbidez;

u – Velocidade local da corrente de turbidez;

$u_{max}$  – Velocidade local máxima da corrente de turbidez;

$V_s$  – Volume de sedimento;

$V_m$  – Volume da mistura;

z – Cota altimétrica em relação ao leito;

$\eta$  – Proporção da corrente que passa pelo obstáculo;

$\rho$  – Massa específica;

$\rho_A$  – Massa específica do fluido ambiente;

$\rho_c$  – Massa específica da corrente de turbidez;

$\rho_s$  – Massa específica do sedimento;

$\sigma_{(\phi)}$  - Grau de seleção de sedimentos;

$\phi$  - Parâmetro logarítmico em função do diâmetro de grão;

$\omega$  - Velocidade de queda de sedimento.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>18</b>
<b>1.1. Justificativa .....</b>	<b>20</b>
<b>2. OBJETIVOS .....</b>	<b>22</b>
<b>2.1. Questão de Pesquisa .....</b>	<b>22</b>
<b>2.2. Objetivo Geral.....</b>	<b>22</b>
<b>2.3. Objetivos Específicos .....</b>	<b>22</b>
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>23</b>
<b>3.1. Fluxos Gravitacionais de Sedimentos.....</b>	<b>23</b>
3.1.1. Definições acerca de Fluxos Gravitacionais de Sedimentos .....	23
3.1.2. Classificação dos fluxos gravitacionais de sedimentos .....	23
<b>3.2. Correntes de Turbidez .....</b>	<b>28</b>
3.2.1. Formação de Correntes de Turbidez .....	29
3.2.2. Estrutura da Corrente de Turbidez .....	32
3.2.3. Hidrodinâmica da Corrente de Turbidez .....	34
3.2.4. Deposição da Corrente de Turbidez .....	35
<b>3.3. Efeitos de Topografia no Escoamento de Correntes de Turbidez</b>	<b>38</b>
3.3.1. Efeitos de topografias no escoamento de correntes de turbidez nos ambientes naturais .....	39
3.3.2. Modelagem Física de Correntes de Turbidez Interagindo com Obstáculos.....	40
3.3.3. Formação de Ressalto Hidráulico no Escoamento de Correntes de Turbidez.....	41
3.3.4. Correntes de Turbidez Escoando Sobre Obstáculos.....	44
<b>3.4. Modelagem Física de Correntes de Turbidez .....</b>	<b>47</b>
3.4.1. Teoria da Semelhança e Simulação Física em Modelos Reduzidos	47
3.4.2. Análise Dimensional de Correntes de Turbidez.....	47
<b>4. METODOLOGIA.....</b>	<b>53</b>
<b>4.1. Fluxograma da pesquisa .....</b>	<b>53</b>

<b>4.2. Aparato Experimental .....</b>	<b>54</b>
4.2.1. Equipamentos de Coleta e Processamento de Dados Hidrodinâmicos das Correntes de Turbidez.....	57
4.2.2. Equipamentos de Coleta e Análise de Sedimentos .....	60
4.2.3. Outros Equipamentos .....	61
4.2.4. Disposição Geral do Aparato Experimental .....	62
4.2.5. Caracterização Granulométrica do Sedimento de Mistura .....	62
4.2.6. Análise a partir do diâmetro médio adimensional dos sedimentos de simulação.....	64
<b>4.3. Procedimento Experimental.....</b>	<b>65</b>
4.3.1. Concentração Volumétrica da Mistura de Simulação .....	65
4.3.2. Vazões de Injeção .....	65
4.3.3. Topografia Seleccionada.....	66
4.3.4. Planejamento de Ensaios .....	67
4.3.5. Preparos Iniciais, Finalização e Aquisição dos Dados dos Ensaios	68
4.3.6. Cálculo do Grau de Seleção do Sedimento dos Depósitos .....	70
<b>5. RESULTADOS .....</b>	<b>71</b>
<b>5.1. Dados de Velocidade das Correntes de Turbidez .....</b>	<b>71</b>
5.1.1. Velocidade Média da Corrente de Turbidez ao Longo do Canal ..	71
5.1.2. Perfis verticais médios de velocidade das correntes de turbidez .	72
<b>5.2. Parâmetros Geométricos das Correntes de Turbidez.....</b>	<b>78</b>
<b>5.3. Depósitos de Correntes de Turbidez.....</b>	<b>81</b>
5.3.1. Espessura dos Depósitos de Correntes de Turbidez.....	81
5.3.2. Variação do $D_{50}$ e do $D_{médio}$ dos depósitos das correntes de turbidez	83
<b>5.4. Análise Granulométrica dos Depósitos .....</b>	<b>86</b>
<b>6. DISCUSSÕES .....</b>	<b>90</b>
<b>6.1. Os efeitos causados pela presença de obstáculos na hidrodinâmica das correntes de turbidez .....</b>	<b>90</b>



6.1.1.	Alterações nos Perfis Verticais Adimensionais de Velocidade .....	90
6.1.2.	O Número de Froude Densimétrico e o Escoamento de Correntes de Turbidez Sobre Obstáculos .....	92
<b>6.2.</b>	<b>Vazões como condicionantes da interação de correntes de turbidez e obstáculos .....</b>	<b>98</b>
6.2.1.	Fluxo de sedimentos e as diferentes vazões interagindo com obstáculos.....	100
<b>6.3.</b>	<b>A influência dos obstáculos na deposição de correntes de turbidez</b>	<b>102</b>
6.3.1.	Diâmetro médio adimensionalizado como indicador de alterações na deposição de partículas de correntes de turbidez .....	102
6.3.2.	Os obstáculos enquanto mecanismo de distribuição dos grãos depositados pelas correntes de turbidez .....	105
<b>7.</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>107</b>
<b>8.</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>109</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>110</b>
	<b>ANEXOS .....</b>	<b>116</b>
	<b>ANEXO I – CLASSES GRANULOMÉTRICAS (UDDEN, 1914; WENTWORTH, 1922 .....</b>	<b>117</b>
	<b>ANEXO II – ESTRUTURA EXPERIMENTAL .....</b>	<b>118</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Correntes de densidade se desenvolvem quando há o movimento relativo entre duas ou mais massas fluidas de massas específicas diferentes, gerando interfaces de mistura (SIMPSON, 1969). Estas correntes podem ser desencadeadas por presença de substâncias dissolvidas, por diferença de temperatura, diferença de salinidade e presença de partículas em suspensão; ALAVIAN, 1986; ALAVIAN et al., 1992).

O estudo de correntes de densidade tem grande relevância em diferentes áreas do conhecimento pois é essencial para o entendimento de diferentes processos que ocorrem na natureza. Na engenharia e geologia, as correntes de densidade, que envolvem transporte de massa e partículas, são denominados como fluxos gravitacionais de sedimentos, cuja diferença de massa específica da corrente e do fluido ambiente é resultado de sedimentos em suspensão conduzidos pela corrente.

Os fluxos gravitacionais de sedimentos englobam todo mecanismo de transporte de sedimentos que ocorrem tanto nos ambientes fluviais quanto nos ambientes oceânicos. Em se tratando do ambiente marinho, os estudos voltados para a sedimentação nestes locais vêm ganhando atenção de pesquisadores e da indústria desde a década de 50 do século passado. Entender os mecanismos de sustentação e de deposição dos sedimentos transportados por fluxos gravitacionais corrobora para o entendimento dos depósitos gerados no contexto complexo das bacias oceânicas.

As correntes de turbidez são um tipo de fluxo gravitacional de sedimentos responsáveis por grande parcela dos processos sedimentares nas bacias oceânicas, uma vez que sua iniciação está atrelada a instabilidade de taludes e remobilização de leitos (MIDDLETON, 1993). A interação entre grãos de sedimento, turbulência, suspensão e mistura de sedimento resultam em um fenômeno que possui características hidráulicas próprias (KNELLER e BUCKEE, 2000).

A compreensão do processo hidrodinâmico que conduz os sedimentos para as bacias oceânicas possui implicações geológicas de alto valor econômico. Os depósitos gerados por estes fluxos se tornam rochas sedimentares porosas com potencial a serem rochas reservatórias de petróleo e gás. Neste sentido, as

pesquisas que buscam agregar conhecimento aos fluxos gravitacionais de sedimentos se tornam complexas, visto que é financeiramente inviável observar estes fenômenos se desenvolverem nos ambientes naturais, sendo necessário estudá-los em escala reduzida.

As correntes de turbidez que percorrem as bacias oceânicas interagem com o relevo e feições topográficas do assoalho marinho, os quais podem ser diápiros de sal, montes submarinos e depressões (WYNN et al., 2000; GEE et al., 2001). Neste contexto, estas estruturas se tornam obstáculos e causam resistência ao escoamento, podendo redirecionar o fluxo, bloquear totalmente ou parcialmente, confinar ou desconfinar a carga de sedimentos transportada. Além disso, a resposta hidráulica desta interação pode ser registrada nos depósitos gerados (KNELLER e BUCKEE, 2000).

Para entender os efeitos dos obstáculos no escoamento de correntes de turbidez, utiliza-se principalmente a abordagem da modelagem física, a qual é uma importante ferramenta para auxiliar nos estudos de fluxos gravitacionais de sedimentos. O emprego da simulação física viabiliza observar parâmetros em condições controladas para obter relações de causa e efeito na interação de variáveis. Além disso, a modelagem física possibilita a composição de um volume de dados para estabelecer uma relação entre variáveis que podem ser matematicamente representadas (CARNEIRO, 1996).

O Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) foi idealizado por volta de 1950 para trabalhar com simulação física de processos hidráulicos voltados para pesquisas do setor hidroenergético. Nesta trajetória, em 1999 surgiu o Núcleo de Estudos em Correntes de Densidade (NECOD), em parceria com projetos financiados, primordialmente pela Petróleo Brasileiro S.A. (Petrobras), e focado na simulação física de fluxos gravitacionais de sedimentos.

Com isto, este trabalho está inserido como uma contribuição ao projeto de pesquisa intitulado “Caracterização das correntes de turbidez formadas por diferentes materiais sedimentares: correlação entre propriedades reológicas das misturas e processos hidrodinâmicos e deposicionais (Processos II)”. É um projeto conduzido em parceria e financiamento do Centro de Pesquisa e Desenvolvimento Leopoldo Américo Miguez de Mello da Petrobras (CENPES – Petrobras).

Ao longo da trajetória de produção científica do NECOD, poucos estudos tiveram o enfoque específico em estudar os efeitos hidrodinâmicos no escoamento de correntes de turbidez através de obstáculos. Havendo destaque aos estudos conduzidos por Manica et al. (2006), em analogia ao cânion Almirante Câmara – bacia de Campos, Buffon (2014) e Silva (2014) que estudaram esta interação a partir de relevos representativos em escala reduzida da bacia oceânica de Sergipe-Alagoas, na costa leste brasileira. Portanto, este trabalho se constrói como contribuição ao conhecimento do grupo de pesquisa no entendimento da relação hidráulica entre correntes de turbidez e obstáculos topográficos.

### 1.1. Justificativa

O escoamento de corrente de turbidez nos ambientes naturais está condicionado a diferentes mecanismos de controle. Além dos controles hidrodinâmicos do próprio fluxo devido a turbulência e energia, há também forte influência de fatores topográficos do assoalho oceânico. Neste último cenário, as correntes são submetidas a uma dinâmica de mistura, diluição e concentração através de bloqueios e redirecionamentos de fluxos, o que favorece o preenchimento de depressões no relevo oceânico, e conseqüente acúmulos de depósitos (HE et al., 2013; NASR-AZADANI e MEIBURG, 2014a; NASR-AZADANI et al., 2018).

Wynn et al. (2000) observaram que os depósitos turbidíticos na margem continental do noroeste da África são controlados por diferentes aspectos relativos às formas de relevo da bacia. Entre os fatores que condicionam o escoamento de correntes de turbidez neste ambiente consta a posição da quebra de declividade entre o talude continental e a bacia oceânica, a existência de ilhas vulcânicas, montes submarinos e correntes de contorno transversais à costa (contornitos<sup>1</sup>) que se sobressaem no relevo do leito.

Estudos conduzidos avaliando a interação hidráulica entre correntes de turbidez e obstáculos de geometria simplificada identificaram alterações no

---

<sup>1</sup> Depósitos ou rochas sedimentares formadas por correntes profundas de contorno dos taludes continentais, formando corpos com aspectos de montes (*mounds*) por vezes alongados, em geral compostos por sedimentos de granulometria fina como silte e argila. (FERNÁNDEZ et al., 2009)

comportamento da dispersão das partículas de sedimentos. Os obstáculos são capazes de separar a estrutura dos fluxos gravitacionais mais concentrados, barrando a camada basal mais concentrada e permitindo o escoamento da camada acima diluída. A presença de um obstáculo também pode selecionar (distribuir) a deposição das partículas através da interceptação dos grãos maiores (KUBO, 2004; BRUNT et al., 2004).

Dessa forma, a identificação de efeitos causado na hidrodinâmica do escoamento por estas estruturas é importante para que se possa inferir e extrapolar estes entendimentos aos ambientes naturais. Posteriormente, esse entendimento auxilia na identificação dos depósitos naturais potenciais geradores de rochas reservatório de petróleo e gás.

Por fim, estudar o escoamento de correntes de turbidez sobre obstáculos em modelos físicos permite avaliar pontualmente os efeitos hidrodinâmicos das feições topográficas no controle do fluxo. Espera-se com isso, que essa abordagem da simulação física ajude no entendimento do fenômeno, permitindo quantificar estes efeitos e estabelecer correlações dos resultados com as respectivas condições topográficas estudadas.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Questão de Pesquisa**

A existência de obstáculos topográficos na trajetória de escoamento de uma corrente de turbidez resulta em efeitos hidrodinâmicos no fluxo e nos depósitos associados. Desta forma, de que maneira a altura do obstáculo e a condição de injeção atuam na seleção dos grãos e separação das fases destes fluxos?

### **2.2. Objetivo Geral**

O objetivo geral desta pesquisa é avaliar diferentes condições de escoamento de correntes de turbidez sob leitos com presença de obstáculos, buscando o entendimento da interação hidrodinâmica entre o fluxo de sedimento e estas singularidades.

### **2.3. Objetivos Específicos**

Alguns objetivos específicos foram estabelecidos para que sejam observados os aspectos mais relevantes para o entendimento da hidrodinâmica desta interação.

- a) Avaliar o comportamento hidrossedimentológico do material granular sob a ação de diferentes vazões;
- b) Entender o comportamento da geometria da corrente de turbidez escoando sobre a topografia;
- c) Caracterizar os efeitos dos obstáculos nos depósitos gerados pelas correntes de turbidez;
- d) Entender a relação da altura de obstáculo com os efeitos hidrodinâmicos e deposicionais no controle das correntes de turbidez;

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1. Fluxos Gravitacionais de Sedimentos

##### 3.1.1. Definições acerca de Fluxos Gravitacionais de Sedimentos

As correntes de densidade ocorrem quando fluidos de massa específica diferente se movimentam relativamente governados pela ação da força gravitacional. Estas correntes se desenvolvem devido a interação entre um fluido ambiente e um fluido com presença de material em suspensão, diferença de temperatura, salinidade ou presença de sedimentos (KNELLER e BUCKEE, 2000).

Os fluxos gravitacionais de sedimentos são um tipo de corrente de densidade, cuja mistura composta por fluido e sedimentos se move sobre uma superfície devido a força gravitacional atuando sobre os grãos suspensos no fluxo (MIDDLETON e HAMPTON, 1973; MIDDLETON, 1993).

##### 3.1.2. Classificação dos fluxos gravitacionais de sedimentos

A classificação dos fluxos gravitacionais de sedimentos tem como objetivo central enquadrar correntes com diferentes concentrações, reologia e mecânica de fluxo como forma de se obter uma previsão de comportamento hidrodinâmico e de modelo deposicional típico. Nesta perspectiva, inúmeros autores vêm tentado quebrar certos paradigmas para se obter uma classificação mais detalhada em termos de associar o fluxo hidrodinâmico com as implicações sedimentares.

Middleton e Hampton (1973) sugeriram a primeira classificação de fluxos gravitacionais de sedimentos baseado no suporte dos grãos carregados pelo escoamento. Nesta classificação, os fluxos podem ter a denominação de correntes de turbidez, fluxo de sedimento fluidizado, fluxo de grãos e fluxo de detritos.

O transporte de sedimento nas correntes de turbidez é dominado pela componente ascendente da turbulência e resulta em movimentos de alta energia cinética dos grãos; o fluxo de sedimento fluidizado é governado pelo fluxo ascendente intragranular do fluido ambiente na corrente; o fluxo de grão tem como mecanismo de suporte a interação e a colisão das partículas da corrente,

devido a sua alta concentração; o fluxo de detritos é uma corrente de densidade cujo movimento se dá através da existência de uma matriz coesiva de partículas de tamanho argila, o que sustenta as partículas maiores (MIDDLETON e HAMPTON, 1973).

A figura 1 apresenta um diagrama esquemático com as classificações dos fluxos gravitacionais de sedimentos através do seu mecanismo de suporte.

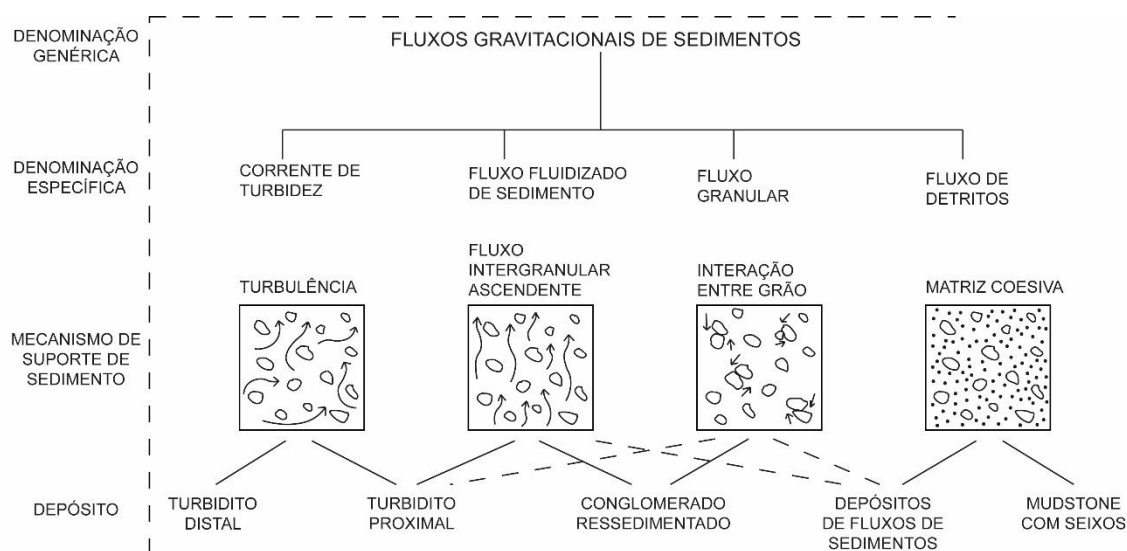


Figura 1 - Classificação dos fluxos gravitacionais de sedimento de Middleton e Hampton (1973).

Postma (1986) propôs uma classificação de correntes de turbidez baseada nas suas características deposicionais e na reologia do fluxo. Esta correlação entre o fluxo e o depósito gerado sugere a existência de quatro nomenclaturas para os depósitos, as quais são: turbidito; turbidito coesivo; depósito de fluxo de detritos não coesivo; depósito de fluxo de detritos coesivo.

O quadro 1 mostra que Postma (1986) nomeou os fluxos no estado permanente em oito classificações, quais sejam: corrente de turbidez; corrente de turbidez piroclástica; fluxo turbulento de alta coesão; fluxo liquefeito; fluxo fluidizado; fluxo granular; fluxo granular lamoso; fluxo de detrito coesivo.



Quadro 1 - Classificação de fluxos gravitacionais de sedimentos e seus depósitos (Modificado de: Postma, 1986).

Característica do fluxo durante a deposição	Tipo de Fluxo Permanente	Nome do depósito
Turbulento, baixa concentração, não coesivo	Corrente de turbidez	Turbidito
Turbulento, baixa concentração, coesivo		Turbidito coesivo
Turbulento, alta concentração, não coesivo	Corrente de turbidez piroclástica	Não existe
Turbulento, alta concentração, coesivo	Fluxo turbulento de alta coesão	
Laminar, baixa concentração, não coesivo		
Laminar, baixa concentração, coesivo		
Laminar, alta concentração, não coesivo	Fluxo liquefeito; fluxo fluidizado; fluxo de grãos; fluxo de grão lamoso	Depósito de fluxo de detrito não coesivo
Laminar, alta concentração, coesivo	Fluxo de detrito coesivo	Depósito de fluxo de detrito coesivo

Mulder e Alexander (2001a) estabeleceram uma classificação dos fluxos gravitacionais de sedimentos baseada em limiares de concentração volumétrica ( $C_v$ ) de partículas na corrente. Nesta classificação, o fluxo cuja concentração está entre 0 e 10% são definidos como correntes de turbidez; de 10 a 40% são correntes de densidade concentradas; concentração entre 35 e 85% são classificadas como fluxos coesivos, conforme é apresentado na figura 2.

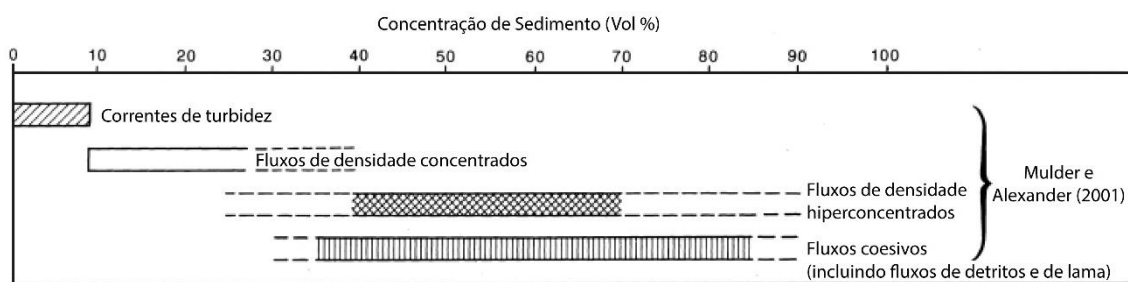


Figura 2 - Classificação de fluxos gravitacionais de sedimento quanto a concentração de sedimento (Modificado de: Mulder e Alexander, 2001a).

Haughton et al. (2009) apresentaram uma classificação de fluxos de sedimentos baseada no depósito, reologia e turbulência do fluxo. Nesta classificação os fluxos podem ser correntes de turbidez de baixa densidade, correntes de turbidez de alta densidade (ambos não coesivos e comportamento turbulento); fluxos compostos (ou fluxos híbridos com a presença das duas

interfaces coesiva e não coesiva e comportamento transitório entre laminar e turbulento); e fluxos de detritos (de natureza coesiva e comportamento laminar).

A figura 3 esquematiza a classificação dos fluxos gravitacionais de sedimentos proposta por Haughton et al. (2009).


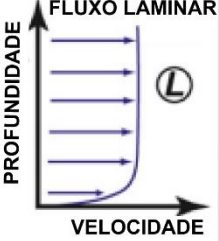

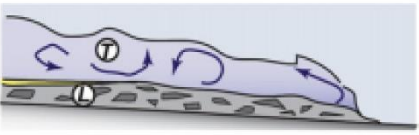

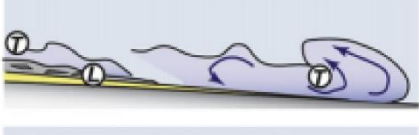
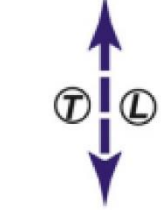

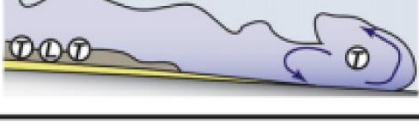
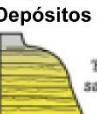

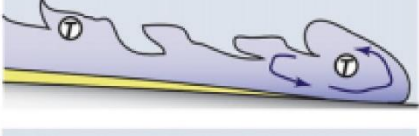
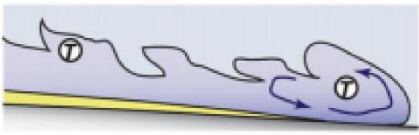
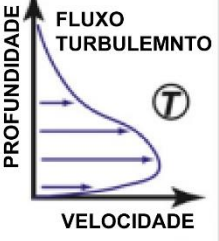


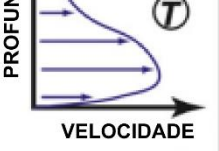

TIPOS DE FLUXO		ESTRUTURA DE FLUXO	COMPORTAMENTO	DEPÓSITO
FLUXOS DE DETRITOS	COESIVO			 Debritos
				 Megabed
FLUXO COMPOSTOS/ COGENÉTICOS	MISTO			 'Linked' debris
				 Depósitos híbridos  'Banded' sandstone
				
CORRENTE DE TURBIDEZ DE ALTA DENSIDADE				 Turbidito de alta densidade
CORRENTE DE TURBIDEZ DE BAIXA DENSIDADE				 Turbidito de baixa densidade

Figura 3 - Classificação de fluxos gravitacionais de sedimentos (Modificado de: Haughton, 2009).

Manica (2009) desenvolveu uma classificação para fluxos gravitacionais de sedimentos de acordo com a concentração volumétrica de grãos, percentual de partículas fração argila, e comportamento reológico (que é a variável dependente da classificação). Através de um diagrama, são estabelecidas seis regiões de comportamento características dos fluxos, sendo as regiões: I as correntes de turbidez de baixa densidade; região II e III as correntes de turbidez de alta densidade inerciais; região IV ocorre as correntes de turbidez de alta densidade viscosas; regiões V e VI os fluxos de detritos, conforme figura 4.

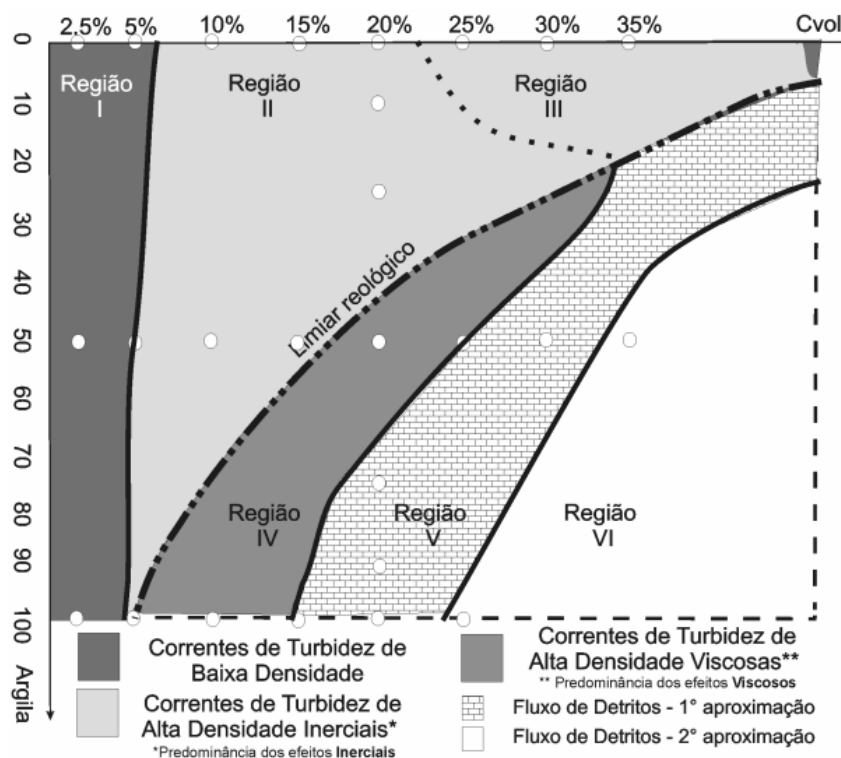


Figura 4 - Classificação de correntes de turbidez de alta densidade (MANICA, 2009).

Segundo Talling (2013), os fluxos gravitacionais de sedimentos de comportamento híbrido (*sensu* Haughton, 2009) podem ser classificados conforme a intensidade da força de coesão das partículas da mistura. Neste enquadramento, os fluxos podem ser: fluxo de detrito muito forte ou forte; fluxo de detrito de força moderada; mistura de sedimento de pouca força; fluxo de lama de pouquíssima força.

Os fluxos muito forte ou forte possuem uma força de coesão entre 100 e 1000 Pascal (Pa ou  $N.m^{-2}$ ). Estes fluxos são viscosos, escoam em regime laminar com a presença de uma corrente de turbidez diluída no limite de mistura. O fluxo de detrito de força moderada possui uma força de coesão entre as partículas entre 5 e 100 Pa. Estes fluxos são necessariamente laminares nos depósitos de regiões distais, no entanto, nas áreas proximais podem haver uma estratificação com fluxos turbulentos (TALLING, 2013)

A mistura de sedimento de pouca força possui intensidade de coesão das partículas de intensidade entre 0,1 e 5 Pa. A estratificação do fluxo ocorre em duas situações: a primeira é o desenvolvimento de fluxo de detrito na região proximal e transformação para corrente de turbidez na região distal; a segunda

situação é o escoamento de uma corrente de turbidez na região proximal e transformação de um fluxo de detrito coesivo na região distal (TALLING, 2013).

Os fluxos de lama de pouquíssima força, de acordo com o modelo genérico de Talling (2013), possuem força de coesão entre as partículas de intensidade inferior a 0,1 Pa. Nesta categoria, uma corrente de turbidez (escoamento regido pela turbulência) se transforma em um fluxo de lama (escoamento laminar, regido pela matriz coesiva dos grãos finos da mistura).

### 3.2. Correntes de Turbidez

Mulder e Alexander (2001a) propuseram um modelo esquemático de mecanismos que influenciam no desenvolvimento das correntes de turbidez, o que possibilitou elaborar para uma divisão dos tipos de correntes de turbidez que podem escoar. A classificação de correntes de turbidez proposta define as correntes de turbidez por pulso, correntes de turbidez tipo pulso e corrente de turbidez quase permanente (desenvolvida nesta pesquisa), conforme é esquematizado na figura 5.





Reologia	Mecanismo de suporte de grão dominante	Perfil de velocidade representativo	Tipos de Fluxo
Não-coesivo	Suporte por turbulência		<p>CORRENTE DE TURBIDEZ POR PULSO</p>  <p>CORRENTE DE TURBIDEZ TIPO PULSO</p>  <p>CORRENTE DE TURBIDEZ QUASE PERMANENTE</p> 

Figura 5 - Diagrama esquemático dos tipos de correntes de turbidez  
(Modificado de: Mulder e Alexander, 2001a)

O foco deste trabalho está em abordar as correntes tipificadas como de estado permanente, e cujo comportamento é hiperpicnal. Ou seja, as correntes simuladas deverão ter densidade maior que a do fluido ambiente e fluxo contínuo de injeção por um determinado tempo de permanência, se tornado análogas às correntes de contorno oceânicas.

De acordo com Piper e Normak (2009), os processos de formação das correntes de turbidez estão relacionados com aspectos hidrodinâmicos do fluxo, o que pode ser verificado através dos depósitos resultantes. A figura 6 mostra como as correntes de turbidez podem ser classificadas através de sua gênese, o que considera a duração do evento, o tamanho de material e volume de material transportado.

DURAÇÃO	RÁPIDA →						PROLONGADO	
	dezenas de minutos		horas				dias/semanas	
PROCESSO DE INICIAÇÃO	Liquificação	Falhas e transformações simples	Instabilidades	Transformação e falhas retrógradas	Ignição por ressuspensão e por tempestades	Fluxos Hiperpicnais	Plumas	
Sedimento								
Tamanho de grão do sedimento de fonte	Areia	Lama misturada	Areia	Lama misturada	Areia	Areia misturada com lama	Lama	
condutores de erosão de areia e lama								
Volume transportado	Pequena 0,01 1 km <sup>3</sup> 100	Pequena Média	Pequena Média	Média Grande	Pequena Média	Pequena Média Grande	Pequena	
Tipo de fluxo	Baixa conc. pulso	Baixa conc. pulso	Baixa conc. pulso	Baixa conc. turbulenta	Baixa conc. turbulenta	<b>Composto baixa e alta concentração</b>	Baixa conc. turbulenta	

Figura 6 - Classificação de correntes de turbidez através de seus processos de iniciação (Adaptado de: PIPER e NORMAK, 2009).

Nesta classificação de correntes de turbidez proposta por Piper e Normak (2009) a gênese da corrente de turbidez e o seu tempo de duração se tornam elementos de caracterização que une o processo de iniciação a hidrodinâmica do fenômeno. O que sugere que os mecanismos de formação de correntes de turbidez estão em congruência com o comportamento do fluxo e, portanto, estes atributos podem ficar impressos nos seus respectivos depósitos.

### 3.2.1. Formação de Correntes de Turbidez

A formação das correntes de turbidez está associada a ocorrência de algum mecanismo de ignição, o qual pode ser um evento catastrófico cuja intensidade, duração e frequência condicionam o comportamento hidrodinâmico do fluxo. Estes mecanismos no ambiente subaquático podem ter diferentes origens, sendo algumas amplamente estudadas nas últimas décadas, como por exemplo, a instabilidade de taludes e superfícies erodíveis.

De acordo com Parson et al. (2007), a formação dos fluxos gravitacionais de sedimento que transportam material ao longo de margens continentais se dá através de certos fenômenos que os desencadeia. Os principais eventos de formação das correntes de turbidez são a instabilidade de taludes da plataforma continental, influência da variação de marés e das ondas, influência da carga de sedimentos de um delta ou desembocaduras de rios. Estes fenômenos podem atuar em conjunto na formação de correntes de turbidez.

De acordo com Bagnold (1962), a corrente de turbidez se desenvolve através de numa condição denominada autossuspensão. Esta condição é capacidade que o fluxo possui em estabelecer uma tensão de cisalhamento junto ao fundo com intensidade suficiente para erodir a superfície do leito, incrementando mais partículas na corrente através da suspensão do sedimento do leito e manutenção da turbulência, e assim sucessivamente.

O estado de permanência de uma corrente de turbidez está associada a sua gênese, pois mecanismos de iniciação de maior duração tendem a gerar correntes de turbidez quase-permanente no tempo, já que o fluxo possui força motriz suficiente para desenvolver uma velocidade média aproximadamente constante no tempo. Enquanto que mecanismos iniciação de menor duração (por exemplo, iniciação instantânea) podem formar correntes de turbidez de comportamento pulsante, altamente variável. À medida que elas avançam, rapidamente se depositam e a sua extinção ocorre em um período mais breve (MEIBURG e KNELLER, 2009).

A figura 7 mostra os diferentes estados de permanência de uma corrente de turbidez ao longo do tempo, sendo o estado quase-permanente e o estado pulsante.

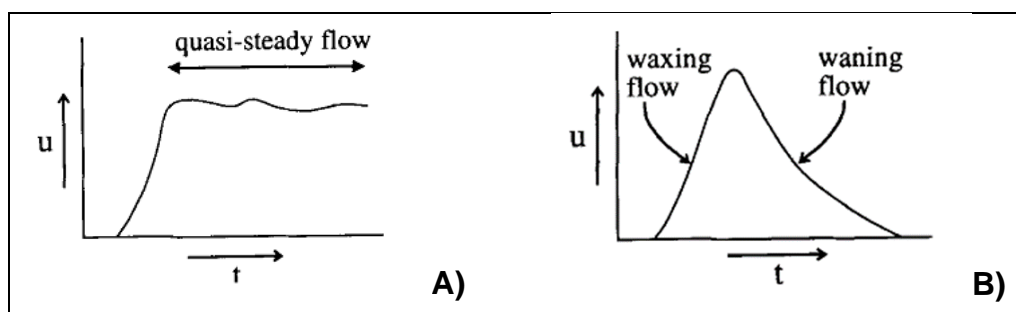


Figura 7 - Corrente de turbidez quase-permanente (A) e corrente de turbidez pulsante (B) (Adaptado de: KNELLER e BRANNEY, 1995).

De acordo com Symons et al. (2017), o monitoramento de eventos de correntes de turbidez em canions submarinos possibilitou que um novo modelo de comportamento do fluxo fosse proposto. Neste modelo foram consideradas três fases para sua formação e desenvolvimento (Figura 8):

- I. A primeira fase é a iniciação da corrente, o que condiciona um fluxo de curta duração, alta energia e concentração, e baixa espessura;
- II. A segunda fase é quando o fluxo se dilui e a cabeça se expande, ganhando energia através da turbulência, o que torna o fluxo capaz de erodir e carregar partículas maiores por mais tempo, assumindo a condição de autossuspensão;
- III. A terceira fase é quando a corrente de turbidez se expande longitudinalmente, assumindo forma e estrutura, e iniciando a sua deposição, conforme figura 8.

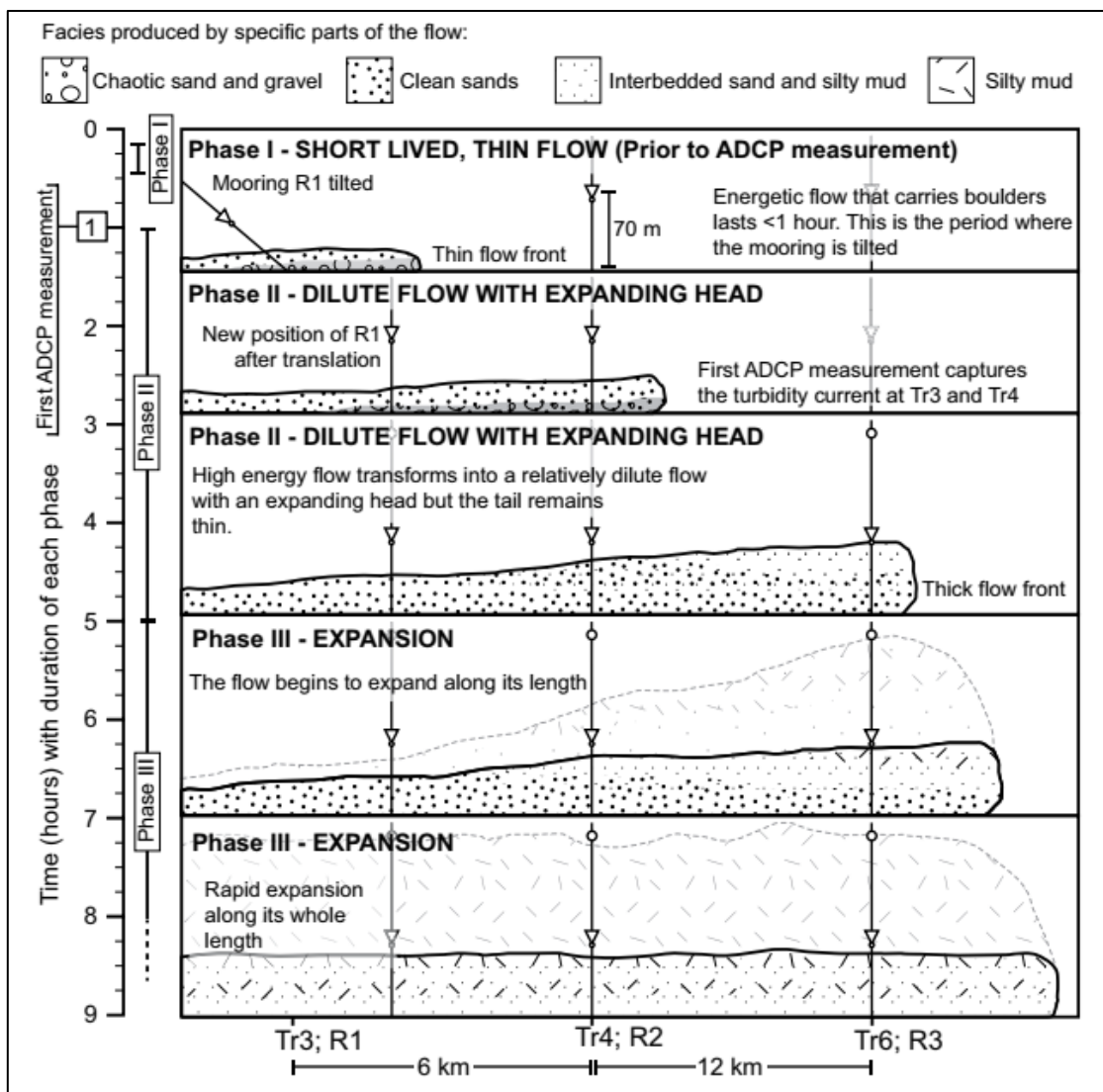


Figura 8 - Modelo de formação de corrente de turbidez proposta por Symons et al. (2017).

### 3.2.2. Estrutura da Corrente de Turbidez

A estrutura física de uma corrente de turbidez, usualmente apresenta três partes: cabeça, corpo e cauda, conforme figura 9. No entanto, as correntes de turbidez pulsantes podem apresentar uma estrutura simplificada em só cabeça ou cabeça e corpo, devido à natureza instantânea do mecanismo de iniciação.



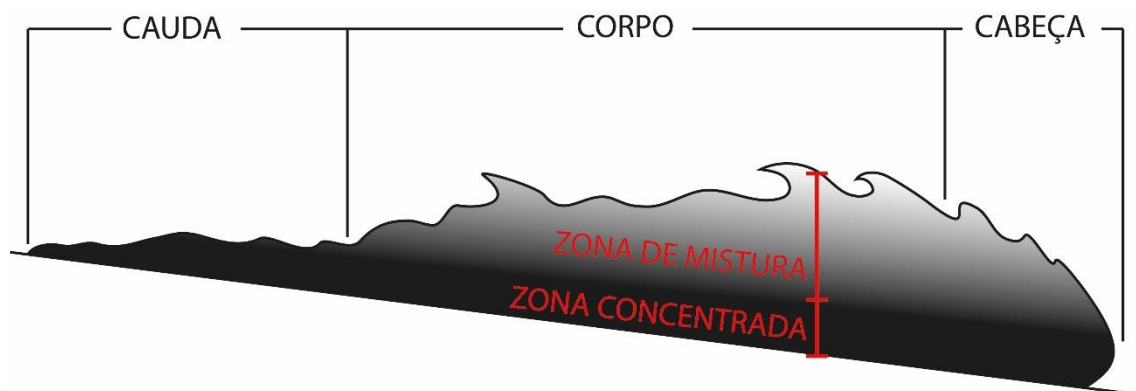


Figura 9 - Estrutura de uma corrente de turbidez (Fonte: o Autor).

Os processos hidrodinâmicos ocorrem com diferentes intensidades em cada um dos segmentos da corrente de turbidez. De acordo com Middleton e Hampton (1973), a cabeça é a parte da corrente de atuação predominante da turbulência se caracterizando por ser uma região que provoca erosão no substrato, incorporando material sedimentar para o seu interior. No corpo da corrente a deposição passa a superar a erosão, o que condiciona um comportamento mais permanente do fluxo. A cauda é a estrutura terminal da corrente de turbidez, na qual o fluxo está praticamente extinto, a deposição dos sedimentos é o mecanismo predominante e devido a isto a espessura nesta região é mínima.

Frequentemente, as correntes de turbidez possuem estrutura interna compartimentada em zona de mistura e zona concentrada, delimitadas em altura pela linha onde ocorre o seu pico de velocidades. Na zona de mistura o fluido ambiente é incorporado na corrente de turbidez, e nesta região prevalece o movimento de queda das partículas. A zona concentrada é a parte da corrente mais veloz, cujo gradiente de velocidade positivo garante o incremento de sedimento no sistema (KNELLER e BUCKEE, 2000).

Manica (2009) e Boffo et al. (2017) observaram que as variações na concentração volumétrica de sedimento do fluxo bem como mudanças na presença de grãos fração argila produzem uma resposta no comportamento hidrodinâmico do fluxo. Correntes de baixa concentração tendem a ser mais espessas, possuem menor velocidade de avanço, enquanto que correntes de turbidez de alta densidade ( $C_v \geq 10\%$ ) possuem uma geometria de fluxo tripartida, com uma camada basal junto ao fundo, uma camada intermediária de corrente e uma camada de mistura turbulenta no topo.

### 3.2.3. Hidrodinâmica da Corrente de Turbidez

Os principais parâmetros utilizados na caracterização dos fluxos gravitacionais de sedimentos são o perfil de velocidades e o perfil de concentrações, conforme é esquematizado na figura 10. A velocidade e a concentração da corrente são parâmetros que respondem às condições de escoamento e, portanto, expressam o comportamento hidrodinâmico nas correntes de turbidez ao longo do espaço e do tempo (MULDER e ALEXANDER, 2001a).

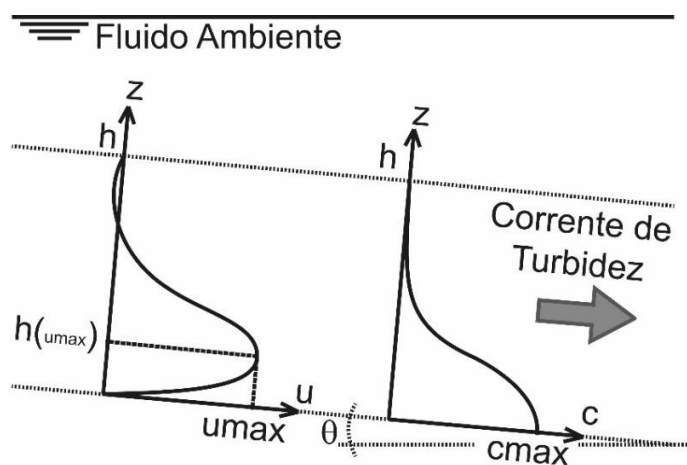


Figura 10 - Comportamento hidrodinâmico de uma corrente de turbidez através do seu perfil de velocidades e perfil de concentrações (Fonte: o Autor).

Um perfil de velocidade de uma corrente de turbidez pode ser separado em duas regiões limitadas pelo plano onde ocorre a velocidade máxima do perfil. Na região abaixo da velocidade máxima, o perfil tem um gradiente positivo e comportamento aproximadamente exponencial. Na região acima da velocidade máxima, o gradiente de velocidade é negativo e possui um comportamento aproximadamente logarítmico (ALTINAKAR et al. 1996; KNELLER e BUCKEE, 2000, MANICA, 2009).

Os perfis de concentração das correntes de turbidez expressam um valor máximo próximo ao fundo, seguido de uma redução gradual da concentração na coluna vertical do fluxo à medida que se aproxima da sua zona de mistura. Estes perfis vão se alterando significativamente ao longo do escoamento, uma vez que ocorre a deposição das partículas ao longo do escoamento, e, com isso, a

diferença de densidade entre corrente e fluido ambiente diminui ao longo do percurso do fluxo (BURSIK e WOODS, 2000; FELIX, 2002).

O perfil de velocidades e a turbulência das correntes de turbidez influenciam no ordenamento das partículas de sedimentos ao longo da vertical. Sequeiros et al. (2010) verificaram que na zona de mistura (acima da altura do pico de velocidade do perfil) ocorre a influência da tensão de cisalhamento entre o fluido ambiente e a corrente de turbidez, além disso, o número de Froude densimétrico (relação entre força inercial e força gravitacional de correntes de densidade) da corrente de turbidez possui relação proporcional direta com a taxa de mistura. Na zona concentrada a tensão de cisalhamento junto ao leito é a mais expressiva e gera um gradiente positivo da velocidade nesta região até atingir o pico de velocidades conforme sua influência diminui.

Felix (2002) observou que a turbulência, a velocidade e a concentração se relacionam espaço-temporalmente através da distribuição de sedimentos nas correntes de turbidez. Esta relação se estabelece da seguinte forma:

- a) A turbulência gera um impulso na mistura entre fluido ambiente e corrente de turbidez e atua diretamente nos grãos promovendo a mistura deles ao longo da estratificação do fluxo;
- b) A concentração de sedimentos condiciona a magnitude das velocidades ao longo da coluna da corrente de turbidez, e a estratificação dos grãos reduz a intensidade da turbulência;
- c) A velocidade produz tensão de cisalhamento que gera a turbulência do sistema.

Bolla Pitalluga e Imran (2014) verificaram que a inclusão da componente turbulência nos modelos matemáticos de predição de perfis de velocidade e de concentração de sedimentos resultou em ajuste satisfatório em relação a dados medidos de correntes de turbidez. Entender as relações entre turbulência, velocidade e concentração possibilita modelar processos hidrodinâmicos que governam as correntes de turbidez, aprimorando o entendimento da dinâmica deposicional destes fluxos gravitacionais.

#### 3.2.4. Deposição da Corrente de Turbidez

Um dos modelos de deposição sedimentar das correntes de turbidez no ambiente subaquático foi concebida como uma estrutura ordenada por Bouma

(1962). Esta interpretação, designada como Sequência de Bouma, generaliza uma sequência deposicional em camadas originadas de um evento hipotético de corrente de turbidez.

A Sequência de Bouma, conforme é apresentada na figura 11, estabelece que um depósito de corrente de turbidez deve ter uma combinação de cinco possíveis camadas deposicionais, seguindo a sequência nomeada de Ta (camada gradacional); Tb (camada inferior de sedimentação plano paralela); Tc (camada de sedimentação ondulada); Td (camada superior de sedimentação plano paralela); e Te (camada de sedimentação laminar, pelágica).

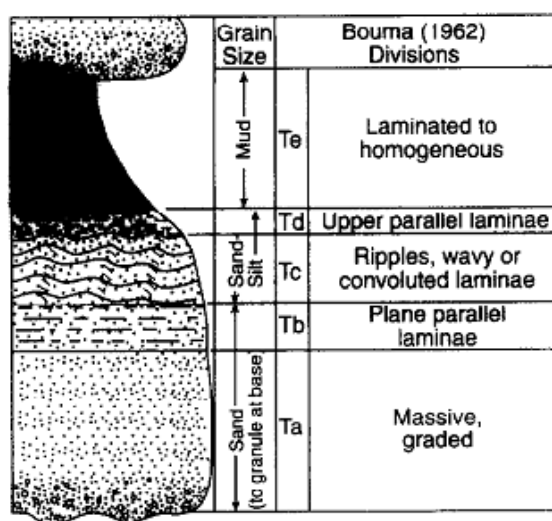


Figura 11 - Sequência de Bouma (Shanmugam, 1997).

O mecanismo de deposição das correntes de turbidez é governado pela concentração dos sedimentos em suspensão, ou seja, existe uma variação na intensidade da deposição no decorrer dos diferentes estágios de desenvolvimento de uma corrente de turbidez. Lowe (1982) formulou que a disposição das correntes de turbidez de alta densidade ocorre através de ondas deposicionais, havendo uma estratificação dos grãos depositados entre cada onda.

De acordo com Lowe (1982), os sedimentos mais grossos do fluxo tendem a se depositar devido ao efeito da tensão de cisalhamento junto ao fundo através do arraste de partículas no leito logo na primeira onda deposicional, na região proximal do depósito. Os grãos mais finos, da fase quase-permanente da corrente de turbidez, são depositados através dos mecanismos de sedimentação por queda de partícula, podendo ser intercalados por momentos de maior

intensidade da tensão de cisalhamento junto ao fundo. Ademais, Salaheldin et al. (2000) aponta que quanto maior a concentração de partículas finas, maior será a capacidade do fluxo em transportar partículas de tamanho areia para jusante do escoamento.

Deste modo, a fase terminal da corrente de turbidez (cauda) é depositada unicamente por decantação dos sedimentos em suspensão, camada “Te” no modelo deposicional proposto, conforme figura 12.

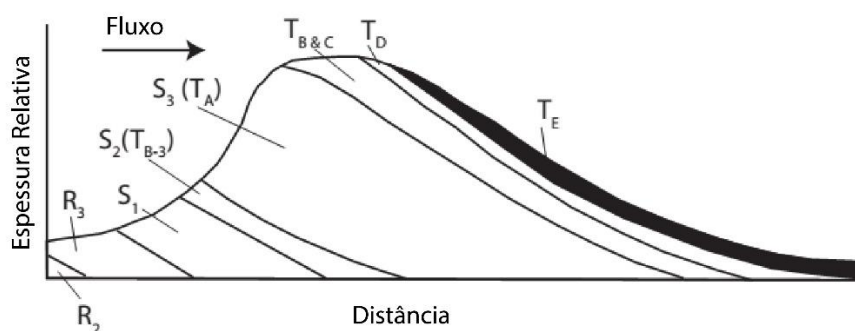


Figura 12 - Diagrama esquemática da organização das camadas deposicionais das correntes de turbidez proposta por Lowe (1982) a partir da Sequência de BOUMA (Modificado de: TALLING et al., 2012).

De acordo com Manica (2009) e Talling et al. (2012), os diferentes tipos de fluxos gravitacionais de sedimentos que podem se desenvolver no decorrer de um evento de escoamento se expressam através de distinções marcantes nos depósitos gerados. E devido a esta dinâmica entre os tipos de correntes de densidade, nem sempre existe um limite preciso entre os depósitos de cada tipo de fluxo de sedimento.

A figura 13 mostra um diagrama esquemático das camadas que podem aparecer em um turbidito.

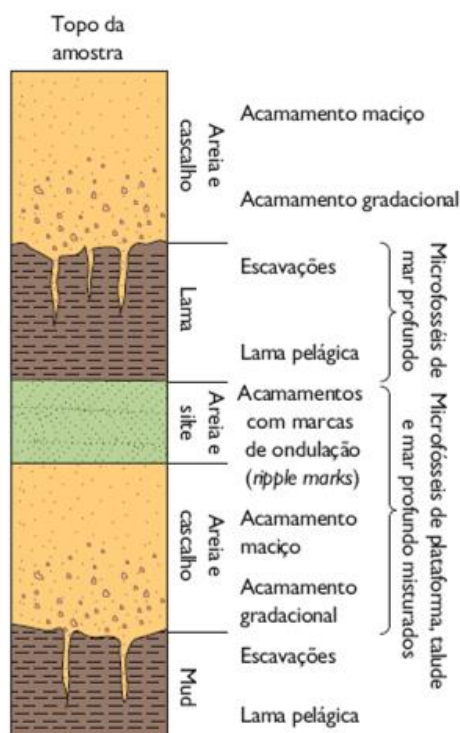


Figura 13 – Diagrama esquemático de um Turbidito (Adaptado de: PINET, 2017).

De acordo com Yang et al. (2019), os depósitos de fluxos gravitacionais de sedimentos são dependentes do suprimento de grãos, além de serem delimitados pela estrutura geomorfológica da bacia de deposição. A deposição sedimentar de fluxos de sedimentos originados de descarga sólida fluvial é dependente da paleotopografia da bacia e da magnitude da vazão. Enquanto que a deposição dos fluxos, cuja iniciação ocorre por instabilidade de taludes da plataforma continental é condicionada pelos mecanismos de iniciação e pelo ângulo de declividade do talude.

### 3.3. Efeitos de Topografia no Escoamento de Correntes de Turbidez

O escoamento de correntes de turbidez através de obstáculos é estudado para que se entenda o comportamento hidrodinâmico dos fluxos e a dinâmica deposicional. Ainda que a maioria dos estudos conduzidos represente obstáculos em geometrias genéricas, muitos avanços vêm sido alcançados no entendimento das condicionantes hidráulicas neste tipo de controle de correntes de turbidez em topografias representativas de relevos reais (MANICA et al., 2006; BUFFON; SILVA, 2014).

Além disso, as topografias dos leitos oceânicos podem configurar estruturas caracterizadas como minibacias de sedimentação, que podem estar inseridas no sistema de transporte de sedimentos cânion-bacia. Nestas estruturas, as minis bacias são regiões abrigadas pela topografia oceânica, as quais podem ser delimitadas por obstáculos topográficos (BRUNT, 2004; PETTINGA et al., 2018).

### 3.3.1. Efeitos de topografias no escoamento de correntes de turbidez nos ambientes naturais

A trajetória percorrida por uma corrente de turbidez subaquática nos ambientes naturais está condicionada pelas feições geomorfológicas e topográficas da superfície por onde escoa. Nestes ambientes, os fluxos gravitacionais de sedimentos interagem com cumes, depressões, barreiras, confinamentos, e as respostas hidrodinâmica destas relações se expressam nos depósitos turbidíticos, conforme figura 14 (KNELLER e BUCKEE, 2000; GEE et al., 2001).

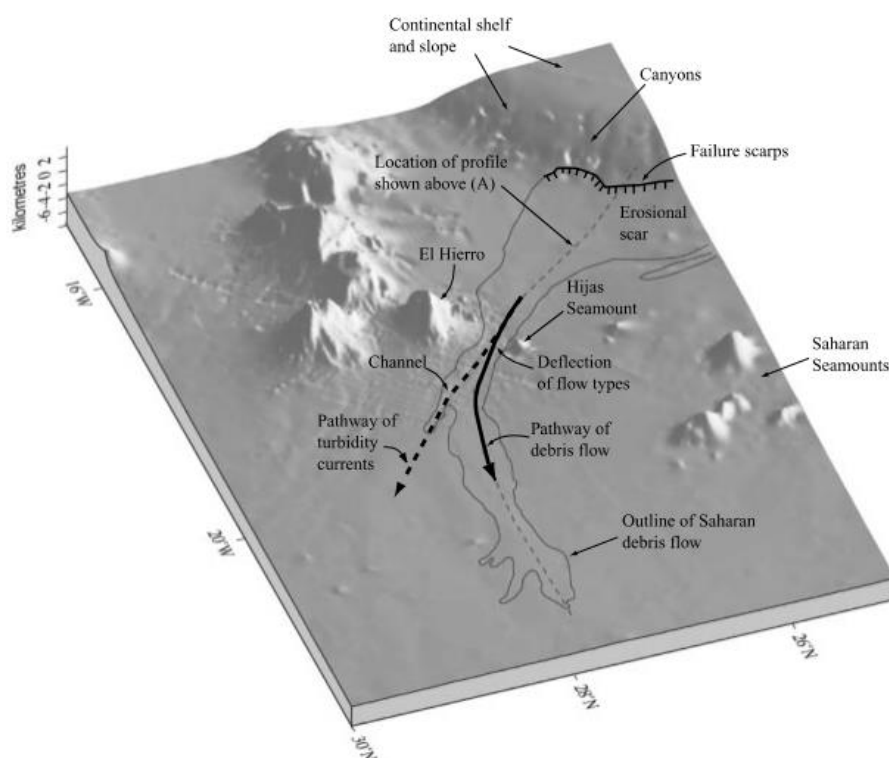


Figura 14 - Imageamento tridimensional do assoalho oceânico na margem continental de Saharan, nas Ilhas Canárias, e complexo de feições topográficas e de depósitos de fluxos gravitacionais de sedimentos (GEE et al., 2001).

De acordo com Gee et al. (2001), condições topográficas podem fazer com que diferentes tipos de correntes de densidade sigam trajetórias distintas ao longo da sua deposição. As correntes de turbidez (por serem menos concentradas e mais turbulentas) podem superar barreiras topográficas com mais facilidade que os fluxos de detritos, os quais costumam ser defletidos por cumes, dunas ou montes submarinos.

Entender a forma como os fluxos gravitacionais de sedimentos interagem com o assoalho oceânico ajuda a entender as regiões onde haverá deposição e retrabalhamento de substrato. Ainda que não seja possível obter informações como tensão de cisalhamento que atua na deformação da superfície de escoamento através dos turbiditos, neles é possível determinar um intervalo de velocidades e a densidade da corrente de turbidez originária (CLARK e STANBROOK, 2001).

### 3.3.2. Modelagem Física de Correntes de Turbidez Interagindo com Obstáculos

As feições topográficas são capazes de reter, barrar, desacelerar, acelerar e direcionar as correntes de turbidez, resultando no preenchimento de espaços no leito oceânico. Por outro lado, a hidrodinâmica da corrente de turbidez reage a esses gradientes topográficos para conseguir dissipar a energia do fluxo, e os efeitos desta interação resultam em seleção de partículas e redirecionamento do fluxo para depressões no relevo (BUFFON, 2014).

Para entender os efeitos dos obstáculos no escoamento de correntes de turbidez, utiliza-se principalmente a abordagem da modelagem física. Essa ferramenta permite que se estude a combinação de cada topografia e a relação hidráulica efetiva nestes escoamentos. O quadro 2 apresenta uma relação de trabalhos da literatura que utilizaram a modelagem física no estudo das correntes de turbidez com obstáculos.



Quadro 2 - Estudos dos efeitos da topografia no controle das correntes de turbidez através de modelagem física.

Autor	Material	Tipo de Fluxo	Cv	Topografia	Dimensões dos obstáculos
Garcia e Parker (1989)	Sal, sílica e microesfera de vidro	Contínuo	0,2 a 1,5 %	Rampa	4,6° (inclinação da rampa)
Kneller et al. (1991)	Sal	Pulso	67 a 178 kg/m <sup>3</sup>	Rampa diagonal ao sentido do fluxo	45° (inclinação da rampa)
Bursik e Woods (2000)	Sal	Contínuo	≤ 3,5 %	Cume, constrição, alargamento, depressão	2, 3,5 e 5 cm (altura de cumes)
Mulder e Alexander (2001b)	Carboneto de silício	Pulso	5 e 10%	Rampa	0, 3, 6, 9 e 12° (inclinação da rampa)
Kubo (2004)	Sedimentos siliciclásticos	Pulso	1, 2 e 3%	Rampa e cumes triangulares	1,2 e 3,6 cm (altura de cume); 1,9 e 5,7° (inclinação da rampa)
Baas et al. (2004)	Sílica e microesfera de vidro	Pulso	14, 21, 27, 29 e 35%	Rampa	3,7° (inclinação da rampa)
Manica et al. (2006)	Carvão	Contínuo	-	Relevo real representativo	Escala Horizontal 1:3000 e Vertical 1:1500
Asghari Pari et al. (2010)	Sal	Pulso	8,3 a 25 kg/m <sup>3</sup>	Cume trapezoidal	11, 16, 21, 31,3, 36 e 56 cm (altura)
Oshaghi et al. (2013)	Caulim	Contínuo	1,75, 4,2 e 11,75 kg/m <sup>3</sup>	Cume triangular	6, 10 e 15 cm (altura)
Silva (2014)	Carvão	Contínuo	10%	Relevo real representativo	Escala Horizontal 1:3000 e Vertical 1:1000
Buffon (2014)	Carvão	Contínuo	2 a 10%	Relevo real representativo	Escala Horizontal 1:3000 e Vertical 1:1000
Yaghoubi et al. (2017)	Caulim	Contínuo	1,75, 3,55 e 7 kg/m <sup>3</sup>	Cume triangular	15 cm (altura)
Farizan et a. (2019)	Caulim	Contínuo	1,75, 3,55 e 6,75 kg/m <sup>3</sup>	Cume triangular	6, 10 e 15 cm (altura)

### 3.3.3. Formação de Ressalto Hidráulico no escoamento de Correntes de Turbidez

A simulação física de corrente de turbidez escoando através de rampas condiciona um efeito singular na hidrodinâmica do fluxo quando há transição para um outro gradiente topográfico de menor intensidade. Esta descontinuidade no ângulo do leito se caracteriza por ser uma quebra de declividade. Este tipo de feição ocorre na transição entre canal-canal e canal-bacia na dissipação de

correntes de turbidez, nos ambientes naturais, e a resposta hidrodinâmica do fluxo pode ocorrer pelo desenvolvimento de um ressalto hidráulico.

De acordo com Tokyay et al. (2011); Oshaghi et al. (2013); Summer et al. (2013), existem alguns fatores que governam a formação de ressalto hidráulico no escoamento de correntes de turbidez, como, por exemplo, a existência de obstáculos geométricos no leito de escoamento a existência de uma descontinuidade na declividade do leito de escoamento (quebra de declividade, transição canal-bacia de dissipação). Garcia e Parker (1989) foram pioneiros em trabalhar nesta perspectiva da formação do ressalto hidráulico e identificaram alterações geométricas e hidrodinâmicas da corrente de turbidez em observações antes e após a quebra de declividade, conforme figura 15.

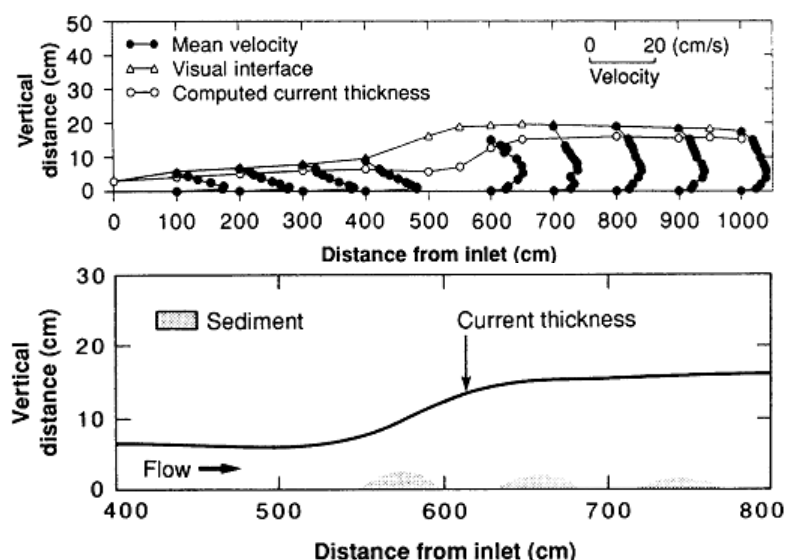


Figura 15 - Mudanças no comportamento hidrodinâmico de correntes de turbidez em quebra de declividade (Garcia e Parker, 1989).

As informações elencadas por Garcia e Parker (1989) que possibilitaram o entendimento do fenômeno foram perfis verticais de velocidade, altura das camadas do escoamento, velocidade média do escoamento e o número de Richardson da corrente (conforme é apresentado no item 3.3.2). A tensão de cisalhamento junto ao fundo sofre uma redução de intensidade ao longo do segmento subcrítico do ressalto hidráulico e aumenta a duração da corrente neste trecho.

A quebra de declividade corrobora para que haja incremento localizado na deposição de corrente de turbidez a jusante da rampa, principalmente nas

situações em que o ressalto hidráulico é bem desenvolvido, como pode ser visualizado na figura 16. A tensão de cisalhamento junto ao fundo é reduzida devido a formação de um ressalto hidráulico e também está associada a alterações na dinâmica deposicional da corrente devido à desaceleração do fluxo na região de troca de regime e provável recirculação de partículas (GARCIA e PARKER, 1989; KUBO, 2004)

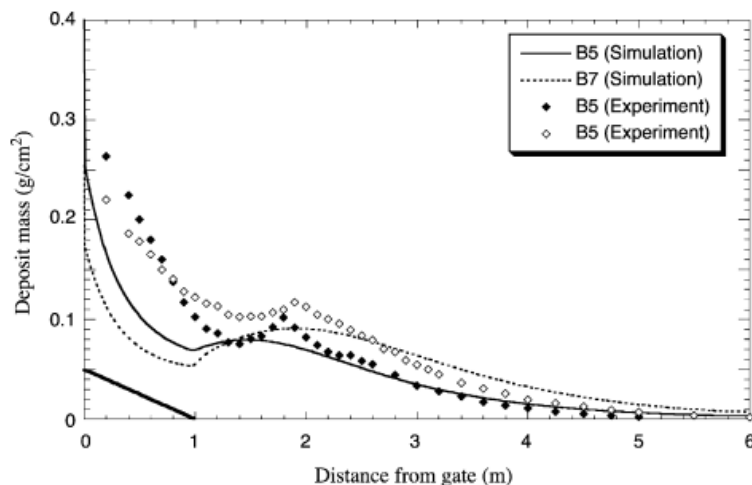


Figura 16 - Distribuição de densidade de depósito em um canal com quebra de declividade indicada pela linha inclinada entre as distâncias 0 e 1 m da entrada (KUBO, 2004).

Na região onde há a descontinuidade da declividade se desenvolve uma zona preferencial de deposição de sedimentos. O incremento na densidade de depósito é decorrência da diminuição da intensidade da turbulência e desaceleração do fluxo, resultando em depósitos característicos de quebra de declividade (MULDER e ALEXANDER, 2001b; KUBO, 2004).

O ressalto hidráulico condiciona um comportamento de menor erodibilidade à corrente de turbidez ao longo da sua estratificação, e isto influencia a deposição de sedimentos no segmento onde atua. E o processo de sedimentação passa a ser governado também pela espessura da corrente e pela velocidade de queda das partículas transportadas (MULDER e ALEXANDER, 2001b; BAAS et al., 2004).

### 3.3.4. Correntes de Turbidez Escoando Sobre Obstáculos

Para Kneller e Buckee (2000), a caracterização de correntes de turbidez através de parâmetros hidrodinâmicos como o perfil de velocidade e concentração, gradiente do número de Richardson e Froude densimétrico proporciona uma visão de causa e efeito entre a hidráulica do movimento e o processo deposicional. Partindo desta percepção, especialmente a turbulência e o perfil de velocidades são fundamentais para entender os efeitos da influência de obstáculos no escoamento.

A presença de obstáculos funciona com uma resistência ao escoamento de correntes de turbidez, atuando na desaceleração do fluxo, propiciando acúmulo de depósito na face de montante do obstáculo maior que na face de jusante. Estes efeitos se acentuam quando o obstáculo é alto suficiente, a concentração de partículas finas é expressiva, e ocorre uma corrente de retorno análogo a uma onda de translação. O resultado é o bloqueio parcial da corrente de turbidez, conforme é esquematizado na figura 17 (BURSIK e WOODS, 2000; KUBO, 2004).

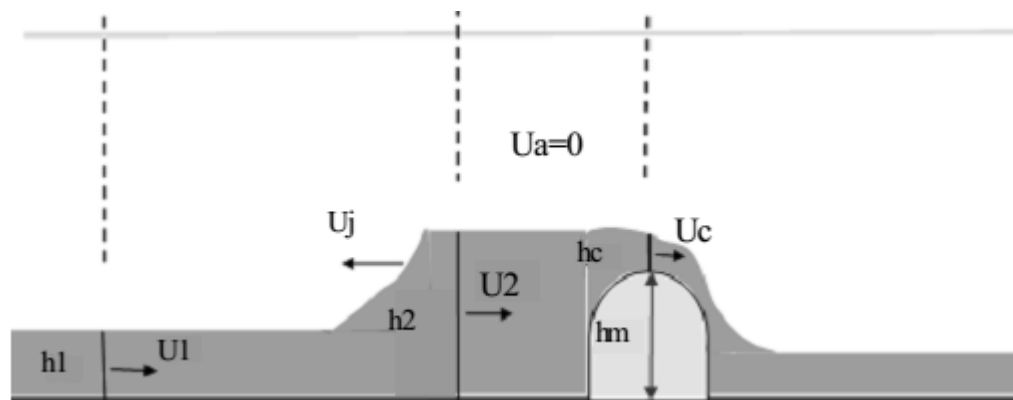


Figura 17 - Diagrama esquemático de uma corrente de turbidez escoando sobre um obstáculo (ASGHARI PARI et al., 2010).

Conforme a altura do obstáculo aumenta, menor é a espessura da corrente a jusante dele, este efeito é verificado pela redução da magnitude do perfil de velocidade e da velocidade de avanço. Enquanto a menor altura de obstáculos proporciona a passagem de um intervalo maior de tamanho de partículas para o lado de jusante (BRUNT et al., 2004).

A figura 18 mostra o controle topográfico do obstáculo na seleção dos grãos na deposição de uma corrente de turbidez nos experimentos de Brunt et al.

(2004). O comportamento dos grãos foi evidenciado a partir de relações adimensionais dentre diâmetro característico de 50% da amostra do fluxo e da mistura (eixo vertical) ao longo da distância (eixo horizontal), sendo comparados diferentes fluxos com relações de altura do obstáculo pela altura da corrente que vai de 0 a 2,3.

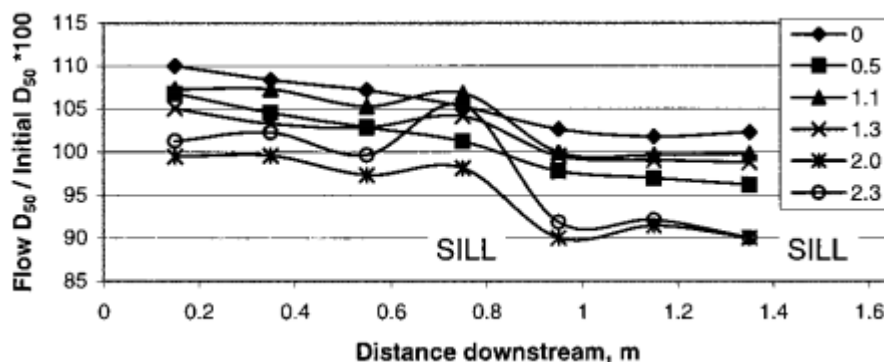


Figura 18 - Distribuição granulométrica ao longo da distância para diferentes alturas de obstáculos (BRUNT et al., 2004).

Os efeitos do número de Froude densimétrico da corrente de turbidez sobre obstáculos possui uma relação inversa com a altura do mesmo. Isso quer dizer que os efeitos do obstáculo são reduzidos conforme se aumenta o número de Froude densimétrico, uma vez que há energia inercial suficiente para ser transformada em energia potencial, isto é, para vencer os obstáculos. Enquanto que os escoamentos com número de Froude densimétrico menor que 1 (subcrítico) reagem com maior intensidade a presença de obstáculos por ser um fluxo de menor energia para superar esta resistência topográfica (KNELLER e BUCKEE, 2000; ASGHARI PARI et al., 2010; OSHAGHI et al., 2013).

A concentração volumétrica de sedimentos na corrente de turbidez influencia na capacidade de retenção do sedimento pelo obstáculo. Ou seja, quanto maior a concentração da corrente e menor a altura da corrente, o obstáculo terá mais aptidão para reter sedimentos. Por outro lado, quanto menor a concentração da corrente, maior será sua espessura e, portanto, mais turbulência e energia o fluxo terá para superar a resistência do obstáculo (ASGHARI PARI et al., 2010; YAGHOUBI et al., 2017; FARIZAN et al., 2019).

Asghari Pari et al. (2010) observaram que obstáculos com altura entre 2 e 2,75 vezes a altura da corrente de turbidez podem gerar o seu bloqueio total da

corrente. Os autores verificaram que na maioria das condições de escoamento a proporção de altura de obstáculo igual a 2,5 vezes a altura da corrente já causa o bloqueio total da corrente.

Uma condição hidrodinâmica que ocorre quando vários obstáculos estão dispostos em sequência ao longo do canal de escoamento da corrente de turbidez é a recirculação. Este fenômeno se desenvolve entre obstáculos de modo que, quando a corrente de turbidez vence a altura do primeiro obstáculo e escoar neste ambiente confinado, no instante em que o fluxo interage com o segundo obstáculo ocorre uma reflexão de parte da corrente. Esta reflexão se move para montante promovendo a recirculação do fluxo neste ambiente, conforme é mostrado na figura 19 (YAGHOUBI et al., 2017).

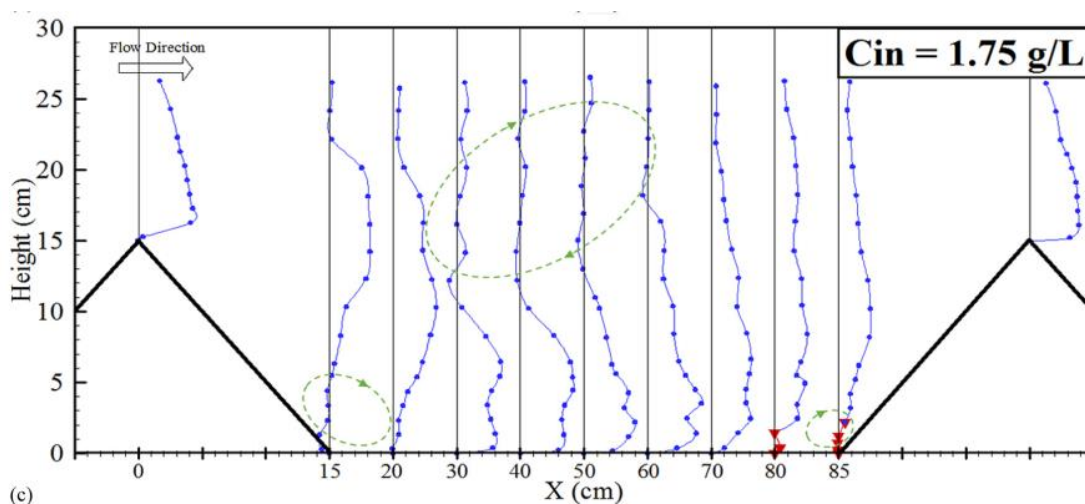


Figura 19 - Fenômeno da recirculação da corrente de turbidez identificada pelos perfis de velocidade (Adaptado de: Yaghoubi et al., 2017).

A recirculação pode ocorrer em diferentes pontos da região entre obstáculos, como, por exemplo, na extremidade de jusante do primeiro obstáculo, na extremidade de montante do segundo obstáculo da sequência e também da região compreendida pela parte superior da zona de mistura deste fluxo. Além disso, esta recirculação não apresenta ser um fenômeno estático e permanente, e é fortemente influenciada pela concentração de partículas do fluxo nesta interação (TOKYAY et al., 2011; YAGHOUBI et al. 2017).

### **3.4. Modelagem Física de Correntes de Turbidez**

#### **3.4.1. Teoria da Semelhança e Simulação Física em Modelos Reduzidos**

Estudos na área de engenharia se constituem por procurar conceber um entendimento detalhado sobre um determinado evento. Portanto, existem diferentes metodologias para que este conhecimento seja consolidado, dentre elas, destaca-se a modelagem de um sistema.

A modelagem física busca estabelecer previsões consistentes do comportamento de um fenômeno de interesse que discorre num sistema protótipo. O protótipo é um recorte espaço-temporal de eventos que ocorrem na natureza e sofre a influência de múltiplas variáveis, enquanto que o modelo físico é o sistema representativo do protótipo que opera em condições controladas, sob efeito de variáveis pré-definidas (MOTTA, 1972).

Modelos físicos serão eficazes em suas previsões se seus parâmetros de redução e controle respeitarem os princípios da Teoria da Semelhança. De acordo com Motta (1972), estes princípios fundamentam as analogias entre modelo e protótipo e definem o tipo de relação entre as grandezas que operam entre os sistemas.

A semelhança física de sistemas modelos e protótipos pode ser reproduzida a partir de análise dimensional, a qual é um instrumento que relaciona grandezas entre os dois sistemas. Esta metodologia visa comparar e relacionar grandezas de mesmas dimensões, podendo generalizar fenômenos físicos, transformar unidades de uma equação, prever a interação entre grandezas de um evento e delimita condições de semelhança (MOTTA, 1972; CARNEIRO, 1996).

#### **3.4.2. Análise Dimensional de Correntes de Turbidez**

Middleton (1966a) formulou uma série de parâmetros relevantes ao escoamento de correntes de turbidez em simulação física. Partindo de analogias do escoamento em superfícies livres, foi estabelecido que as correntes de turbidez dependem dos seguintes parâmetros: velocidade média da corrente ( $U$ ); gravidade reduzida ( $g'$ ); altura da corrente ( $h_c$ ); declividade da superfície de

escoamento ( $s$ ); fator de perda de carga junto ao fundo ( $f_o$ ) e na interface ( $f_i$ ); velocidade de queda de sedimento ( $\omega$ ) e fator de forma ( $\sigma$ ).

$$f(U/\sqrt{g'h_c}, s, f_i, f_o, \omega/U, \sigma) = 0 \quad \text{Equação 1}$$

O comportamento hidrodinâmico da corrente de turbidez no modelo reduzido pode ser equivalente a outra corrente no modelo protótipo se o número de Froude densimétrico for igual entre eles. Esta similaridade é um dos critérios para que seja possível fazer analogias entre fluxos, uma vez que as relações entre forças de inércia e forças gravitacionais possuem ordem de grandeza aproximada (MIDDLETON, 1966a).

$$Fr_D = \frac{U}{\sqrt{g'h_c}} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

$0 < Fr_D < 1$  , escoamento subcrítico;

$Fr_D = 1$ , escoamento crítico;

$Fr_D > 1$ , escoamento supercrítico.

Na equação 2,  $U$  é a velocidade média da corrente de turbidez em  $m.s^{-1}$ ;  $g'$  é a aceleração reduzida da gravidade em  $m.s^{-2}$ ;  $h_c$  é a altura da corrente de turbidez em  $m$ .

A aceleração da gravidade reduzida ( $g'$ ) é um produto da aceleração da gravidade com a densidade submersa de sedimentos e a concentração volumétrica de sedimentos na corrente de turbidez ( $C_v$ ), dada pela equação 3.

$$g' = g \left( \frac{\rho_c - \rho_A}{\rho_A} \right) = g \left( \frac{\rho_s - \rho_A}{\rho_A} \right) C_v \quad \text{Equação 3}$$

Em que  $\rho_c$  é a massa específica da corrente em  $kg.m^{-3}$ ;  $\rho_A$  é a massa específica do fluido ambiente em  $kg.m^{-3}$ ; e  $\rho_s$  é a massa específica dos sedimentos da corrente de turbidez em  $kg.m^{-3}$ .

O número de Richardson é um indicador da instabilidade dinâmica e da formação da turbulência em fluxos gravitacionais de sedimentos estratificados. Este parâmetro é representado pela razão entre forças de flutuabilidade e de inércia, ou seja, representa o consumo e produção de turbulência hidrostática pela produção de turbulência através da tensão de cisalhamento junto ao fundo, conforme equação 4 (KNELLER e BUCKEE, 2000; MEIBURG e KNELLER, 2009; SEQUEIROS et al., 2010).



$$Ri = \frac{-g(d\rho_c/dz)}{\rho_A(du/dz)} = \frac{-hg(\Delta\rho/\rho_A)}{U^2} = \frac{1}{Fr_d^2} \quad \text{Equação 4}$$

Onde os limites de Ri indicam:

Ri = 0, escoamento não estratificado;

Ri < 0,25, estratificação instável;

Ri = 0,25, estratificação crítica;

Ri > 0,25, estratificação estável;

Onde Ri é o número de Richardson adimensional;  $\rho_c$  e  $\rho_A$  é a massa específica da corrente de turbidez e do fluido ambiente, respectivamente;  $u$  é a velocidade no ponto  $z$ ;  $h$  é a altura da corrente;  $g$  é a aceleração da gravidade;  $\Delta\rho/\rho_A$  é a densidade submersa da corrente;  $U$  é a velocidade média da corrente.

As correntes de turbidez que escoam em regime supercrítico tendem a ter maior interação com o fluido ambiente na zona de mistura (região acima da velocidade máxima do perfil de velocidade), e, portanto, tendem a ter estratificação mais instável e valores de Ri abaixo de 0,25. Os fluxos que se desenvolvem no regime subcrítico possuem menos atividade na zona de mistura e possuem valores de estratificação mais estáveis, ou seja, acima do valor 0,25 (MIDDLETON, 1993; KNELLER e BUCKEE, 2000; MEIBURG e KNELLER, 2009; SEQUEIROS et al., 2010).

O fluxo sedimentar reduzido ( $q$ ) é um parâmetro de interesse nos escoamentos de correntes de turbidez, uma vez que denotam o a capacidade de conservação do fluxo ao longo do seu escoamento. Neste sentido, o fluxo sedimentar reduzido é resultado do produto entre a gravidade reduzida, velocidade média na seção transversal, altura total da corrente de turbidez, conforme equação 5 (MANICA, 2012).

$$q = g' * H_t * U_{méd} \quad \text{Equação 5}$$

Onde  $q$  é o fluxo de sedimentos dada em  $m^3.s^{-3}$ ;  $g'$  é a aceleração da gravidade reduzida dada em  $m.s^{-2}$ ;  $H_t$  a altura total da corrente de turbidez;  $U_{méd}$  é a velocidade média da corrente na seção transversal, dada em  $m.s^{-1}$ .

#### 3.4.2.1. Equações de Condições Médias de Escoamento de Correntes de Turbidez

Conhecer as condições médias de escoamento de correntes de turbidez possibilita a verificação de parâmetros adimensionais importantes para

generalizações e comparações entre fluxos. A altura média, velocidade média e concentração média são os principais parâmetros usados para relações adimensionais, conforme equações 6 a 8 (ELLISON e TURNER, 1959).

$$UH = \int_0^{\infty} u dz = \sum_{k=1}^{m-1} \frac{u_k + u_{k+1}}{2} (z_{k+1} - z_k) \quad \text{Equação 6}$$

$$U^2H = \int_0^{\infty} u^2 dz = \sum_{k=1}^{m-1} \frac{u_k^2 + u_{k+1}^2}{2} (z_{k+1} - z_k) \quad \text{Equação 7}$$

$$UCH = \int_0^{\infty} ucdz = \sum_{k=1}^{m-1} \frac{u_k c_k + u_{k+1} c_{k+1}}{2} (z_{k+1} - z_k) \quad \text{Equação 8}$$

Onde H é a altura média da corrente de turbidez; U é a velocidade média da corrente de turbidez; C é a concentração média da corrente de turbidez; u é a velocidade instantânea no ponto z; c é a concentração instantânea na altura z.

#### 3.4.2.2. Equações Relevantes de Correntes de Turbidez Escoando Sobre Obstáculos

Quando uma corrente de turbidez escoar sobre um obstáculo em ambiente subaquático ela sofre efeitos análogo ao do escoamento a superfície livre sobre obstáculos. Os escoamentos de superfície livre, quando interage com este tipo de resistência, uma parte da energia do fluxo é refletida, criando uma onda de retorno (onda de translação), concomitante a isto, o fluxo tende a ganhar energia até que supere o obstáculo, conforme é esquematizado na figura 20.

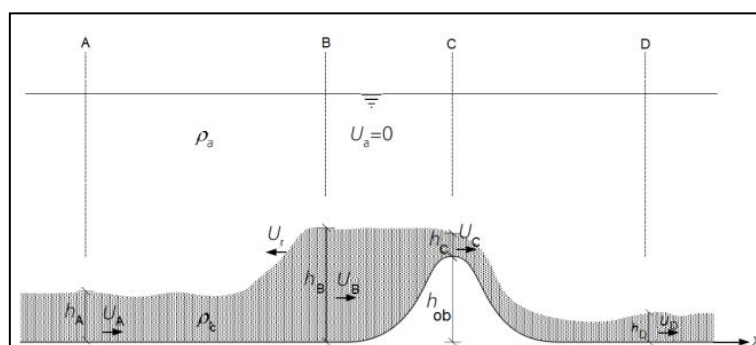


Figura 20 - Interação hidráulica entre uma corrente de turbidez e um obstáculo (CORREIA, 2012).

Para que ocorra um escoamento no regime crítico na crista do obstáculo, é necessário que se estabeleça uma relação entre o número de Froude

densimétrico da corrente ( $Fr_{d(A)}$ , conforme figura 21), altura de obstáculo ( $h_{ob}$ ) e altura da corrente de turbidez ( $H_t$ ), expressada pela equação 9 (OSHAGHI et al., 2013).

$$(H')_c = \frac{Fr_{d(A)}^2}{2} - \frac{3}{2}Fr_{d(A)}^{2/3} + 1 \quad \text{Equação 9}$$

$$H' = \frac{h_{ob}}{H_t} \quad \text{Equação 10}$$

Para diferentes regimes de escoamento expressos no número de Froude densimétrico no ponto A ( $Fr_{d(A)}$ ), ou seja, Froude densimétrico da corrente de turbidez, há uma interação específica com uma determinada altura de obstáculo que pode resultar em cinco comportamentos hidráulicos, os quais são:

- a) Para escoamentos subcríticos, a corrente de turbidez supera o obstáculo através de um estado permanente e sem mudança de regime entre as seções A e D da figura 20 (Região I da figura 21);
- b) A região IIa da figura 21 retrata um fluxo que troca de regime entre seção de montante e jusante do obstáculo. O ressalto hidráulico da face de montante do obstáculo move em direção a montante do escoamento, e o ressalto hidráulico de jusante do obstáculo é estacionário caso a escoamento seja permanente;
- c) A região IIb mostra um fluxo que também muda de regime de escoamento, no entanto, o ressalto hidráulico de jusante do obstáculo se move em direção de jusante do escoamento;
- d) Em um escoamento supercrítico, a corrente de turbidez supera o obstáculo facilmente, ocorrendo uma mudança na sua espessura e não há alteração do regime (Região III da figura 21);
- e) A última interação possível entre uma corrente de turbidez e um obstáculo é o bloqueio total da corrente, e todo o fluxo é interrompido.

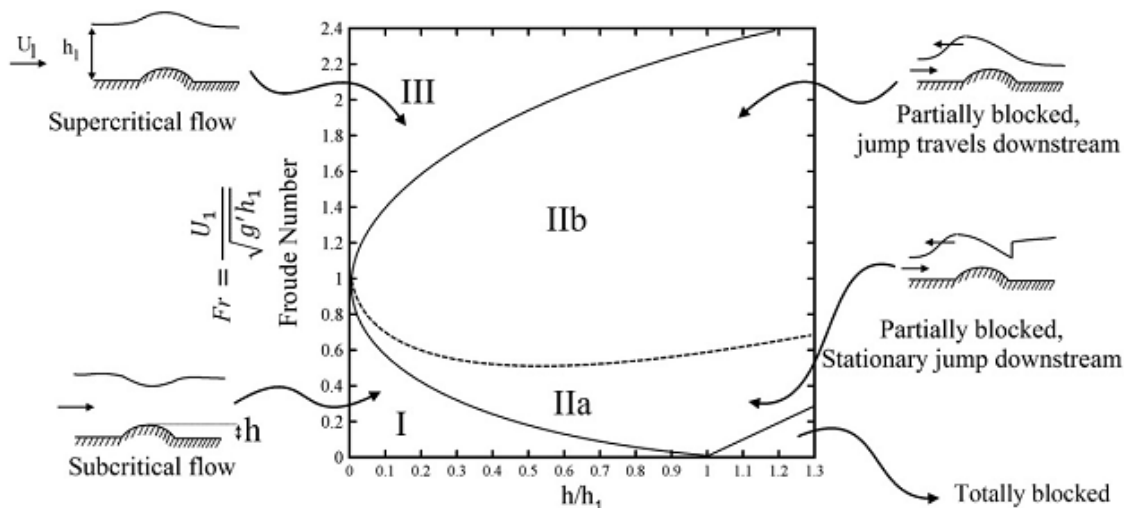


Figura 21 – Diferentes regimes de escoamento e sua interação com os obstáculos. Dada pela altura relativa do obstáculo ( $h$ ) pela altura da corrente ( $h_1$ ) e número de Froude densimétrico ( $Fr$ ) (OSHAGHI et al., 2013).

A altura necessária do obstáculo para que ocorra bloqueio total de uma corrente de turbidez pode ser obtida através da seguinte relação proposta por Baines (1996).

$$Fr_{d(A)}^2 = (H') \left( \frac{H' + 1}{2H'} \right) \quad \text{Equação 11}$$

A proporção de corrente que passa pelo obstáculo é expressa pela relação entre a vazão específica da corrente ( $q_A$ ) e a vazão específica da corrente que passa acima do obstáculo ( $q_{ob}$ ), conforme equação 12.

$$\eta = \frac{q_{ob}}{q_A} = \frac{\sqrt{g'h_{c(ob)}^3}}{U_A H_{t(A)}} = \frac{\sqrt{g'(H_{t(B)} - h_{ob})^3}}{U_A H_{t(A)}} \quad \text{Equação 12}$$

## **4. METODOLOGIA**

A execução dos ensaios experimentais de correntes de turbidez interagindo com obstáculos foi possibilitada pela estrutura física e pelo corpo técnico do Núcleo de Estudos de Correntes de Densidade (NECOD), vinculado ao Instituto de Pesquisas Hidráulica (IPH), da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

### **4.1. Fluxograma da pesquisa**

A figura 22 apresenta um fluxograma esquemático das etapas deste trabalho, cuja conclusão final era obter o entendimento dos efeitos hidrodinâmicos dos obstáculos no controle de corrente de turbidez. Desta forma, os ensaios foram planejados para simular, em modelo físico, a corrente de turbidez escoando por variações topográficas do leito do canal, e reproduzindo os processos de sedimentação que ocorrem no ambiente marinho profundo.

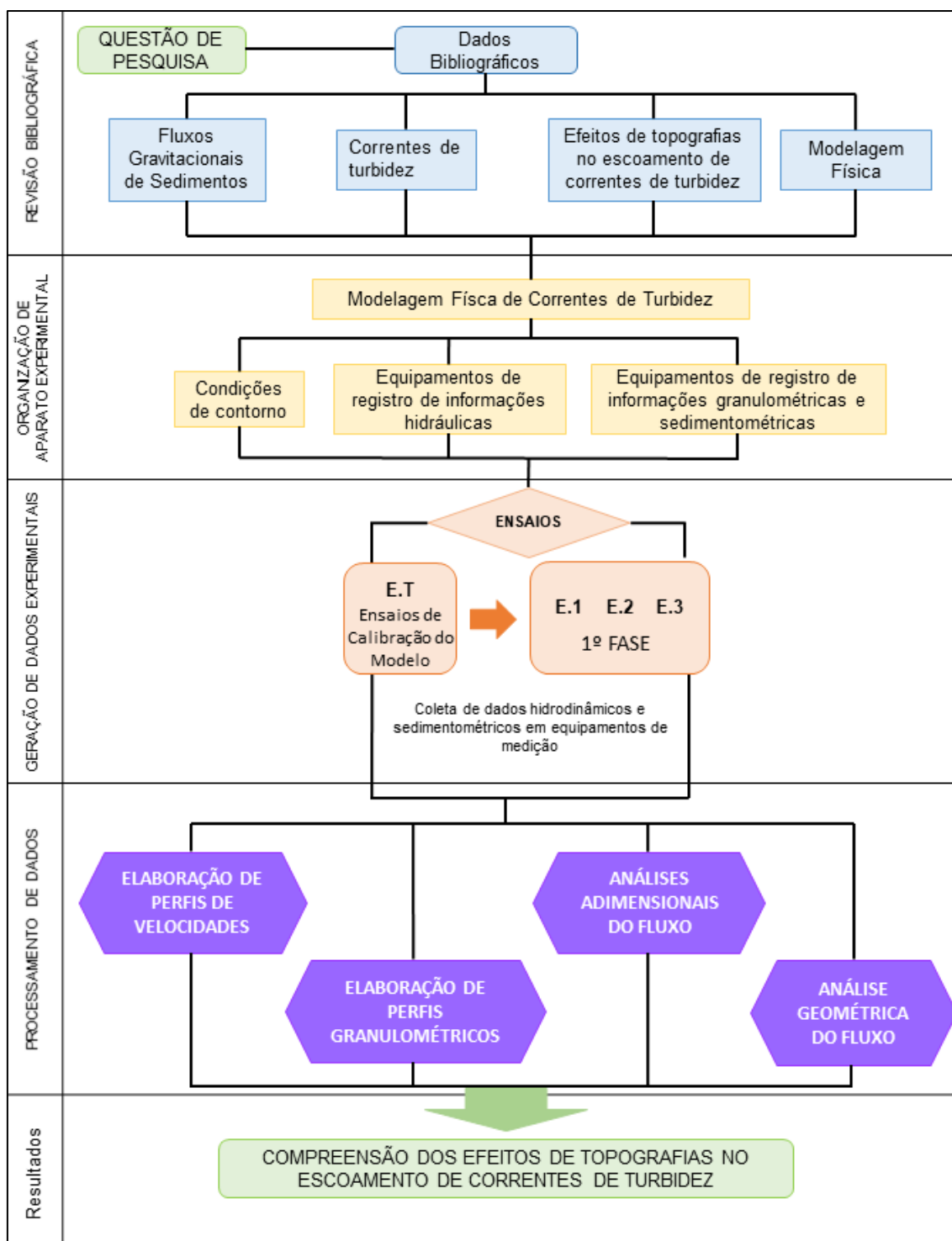


Figura 22 - Fluxograma da pesquisa.

#### 4.2. Aparato Experimental

As instalações físicas de realização dos ensaios compreendem um sistema de alimentação, composto por um reservatório de nível variável, o qual alimenta por gravidade um sistema de simulação, composto por tanque retangular de nível

constante e canal de acrílico de simulação. A disposição utilizada para realização dos experimentos consiste no canal de acrílico inserido em um tanque externo, conforme é apresentado na figura 23 e folha 6 do Anexo II.

Nestes componentes serão adicionados todos os equipamentos necessários para o registro das variáveis do escoamento das correntes de turbidez.

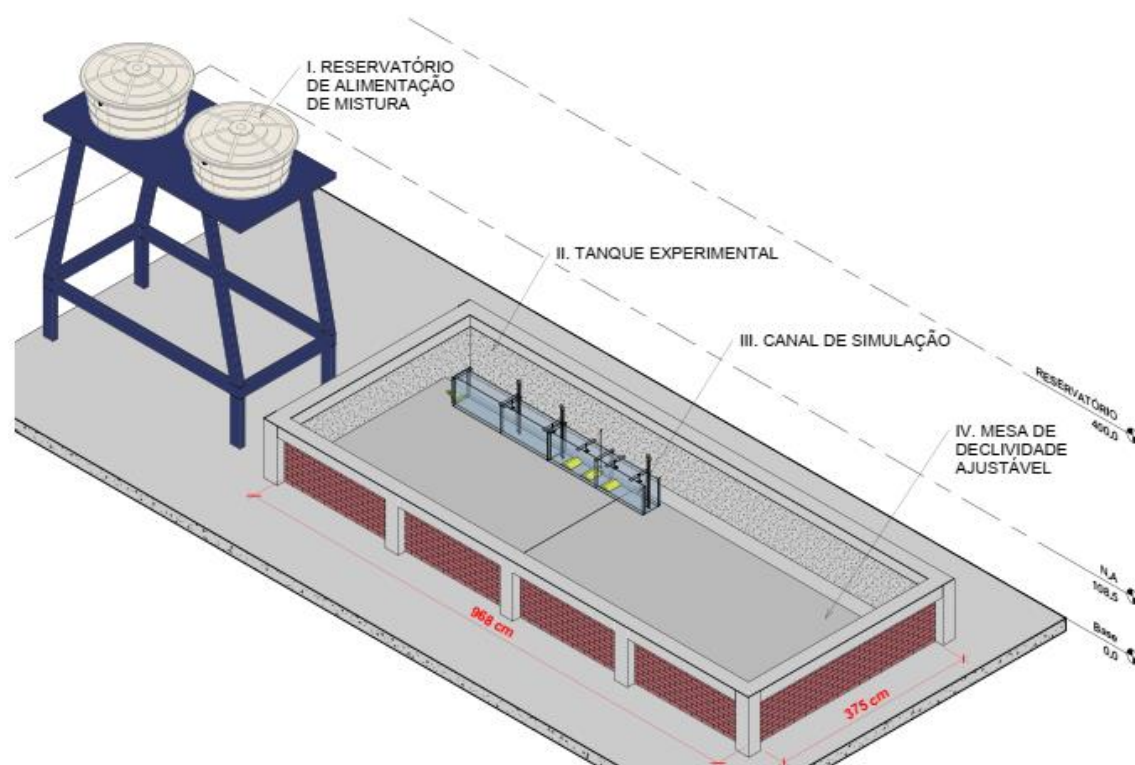


Figura 23 - Croqui do sistema de simulação de corrente de turbidez (folha 6 do Anexo II).

#### I. Reservatório de Alimentação de Mistura

O reservatório de condicionamento de mistura tem capacidade para 2000 litros, e está apoiado por uma plataforma de aço há 4,0 metros de altura do chão (plano de referência). No seu interior é colocado um misturador eletromecânico para que seja mantida a homogeneidade da mistura até o momento da injeção da corrente de turbidez no canal de acrílico.

O misturador é um equipamento cuja hélice gira promovendo a homogeneização da mistura água com sedimentos, fazendo com que haja menos deposição e garante suspensão através da agitação das partículas.

#### II. Tanque de Simulação Externo

O tanque externo de nível constante tem dimensões internas de 9,68 m de comprimento, 3,75 m de largura e, aproximadamente, 1,1 m de profundidade. No seu interior há uma plataforma de declividade ajustável em duas seções, sendo uma seção com dimensões 2,7 m de largura por 5,0 m de extensão e a segunda seção com 2,7 m de largura com 4,0 de comprimento.

O tanque é feito em alvenaria, construído com tijolos e concreto, enquanto a plataforma de declividade ajustável é feita de chapas de aço. O tanque possui uma seção vertente em uma das suas bordas para que não haja galgamento no restante da estrutura, garantindo também, a condição de nível constante.

O sistema de drenagem do tanque é composto por uma única tubulação de 32 mm de diâmetro controlado por um registro esfera.

### III. Canal de Acrílico

O canal experimental de acrílico instalado no interior do tanque externo apresenta dois módulos de dimensões 2,00 m de comprimento (L), 0,24 m de largura (B), 0,49 m de profundidade (p) e declividade (s) de  $0,0^\circ$ , como é apresentado na figura 24. O sistema é alimentado pelo reservatório de alimentação de mistura (figura 23 - Item I), sendo que a mistura é escoada por uma mangueira seguida de um medidor de vazão instalado em uma tubulação de 25 mm de diâmetro interno ( $d_i$ ), e que está ligada a um difusor posicionado na extremidade de montante do canal (ver figura 25).



Figura 24 - Canal de acrílico de simulação das correntes de turbidez.

A injeção da corrente de turbidez no canal de acrílico ocorre através de um difusor localizado na extremidade de montante do canal de acrílico. O objetivo



deste componente é diminuir os efeitos de injeção ocasionados por uma expansão abrupta do escoamento na transição entre a tubulação circular e o canal de simulação.

O difusor utilizado nesta pesquisa possui dimensões de 1,5 cm de altura (a), largura (b) de 17 cm, conforme figura 25. O objetivo deste difusor é diminuir os efeitos da injeção ocasionados pela expansão abrupta da corrente de turbidez na transição entre a tubulação circular e o canal de simulação. Dessa forma, ele garante a pressão do escoamento nesta transição, distribui uniformemente as velocidades ao longo de toda a largura e evita a formação de vórtices de recirculação do escoamento (IDEL'CHIK, 1966).

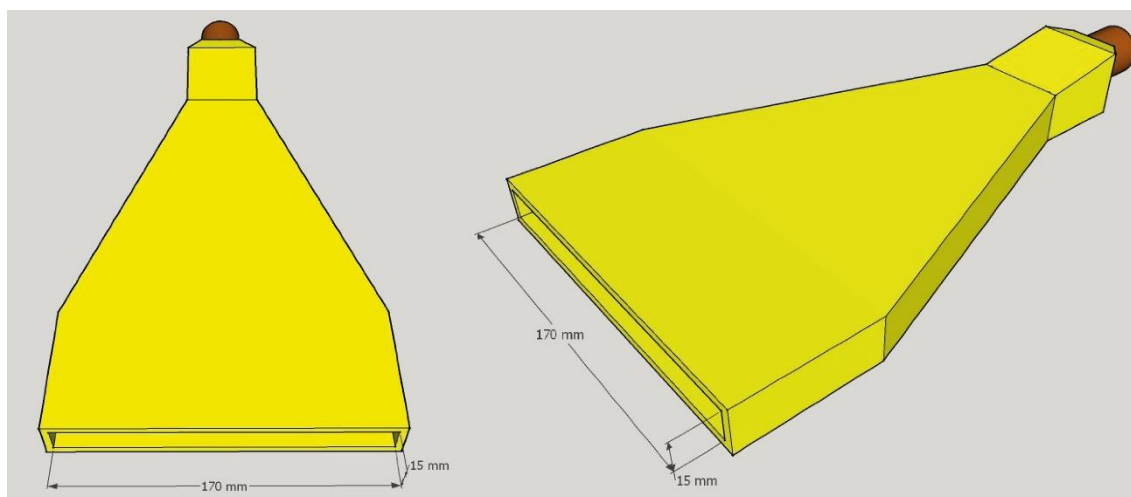


Figura 25 - Difusor utilizado na injeção da mistura (as medidas apresentadas estão em milímetros; desenho fora de escala).

#### 4.2.1. Equipamentos de Coleta e Processamento de Dados Hidrodinâmicos das Correntes de Turbidez

##### IV. Câmera digital de alta definição submersível GoPro Hero 7

A vídeo-câmera de gravação digital de alta definição *GoPro Hero 7 Black* é um recurso essencial para avaliar a estrutura da corrente de turbidez ao longo do tempo. Através da filmagem pode ser avaliada a velocidade de avanço da corrente, conforme figura 26.

A câmera possui resolução de filmagem em 4K, com 60 fotos por segundo e o registro de fotografia possui resolução de 12 megapixels. Além disso, a câmera pode ser submersa até uma carga hidráulica de 10 m de coluna de água e possui resistência à poeira.



Figura 26 - Câmera filmadora digital de alta definição.

V. Medidor de velocidade ultrassônico (*Ultrasonic Doppler Velocity Profile – UVP*)

O medidor de velocidade ultrassônico (UVP) é um equipamento de medição de velocidades por efeito Doppler (figura 27a), cuja característica é avaliar o seu valor ao longo de um perfil linear. O funcionamento do equipamento ocorre quando um feixe de pulso ultrassônico é emitido pelo transdutor (figura 27b) e uma massa fluida se movimenta através deste pulso. Desta interação resulta em um atraso no retorno do pulso ultrassônico emitido.

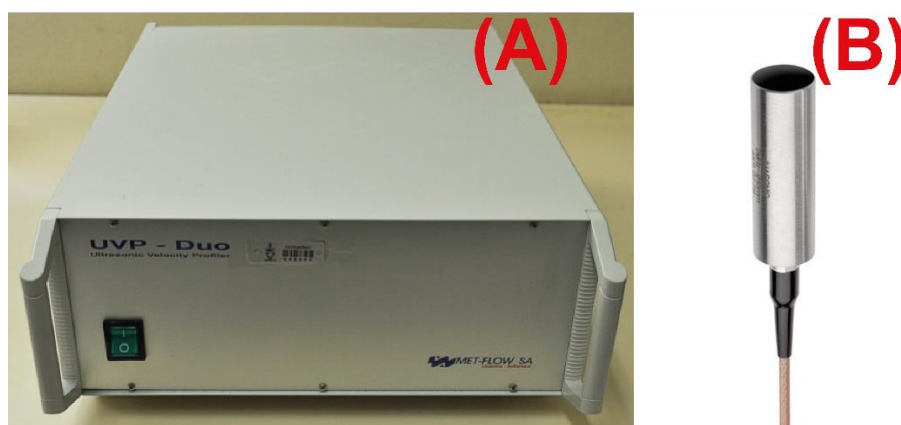


Figura 27 - Caixa de emissão e processamento de sinal ultrassônico (A) e transdutores emissores e receptores de sinal ultrassônico (B).

Então, o atraso na leitura da onda ultrassônica de retorno é convertido em velocidade da massa fluida naquele instante. Os transdutores utilizados eram de comprimento de onda de 2 MHz, e foram utilizadas seis sondas espaçadas e anguladas em 45° em relação ao fundo para se obter seis perfis de velocidade ao longo do canal, conforme figura 28.

Este ângulo de posicionamento da sonda em 45° possibilita a medição das velocidades que diferentes alturas da corrente de turbidez. A angulação permite que diferentes faixas de alturas da corrente interrompam a emissão do feixe ultrassônico e reflitam de volta para a sonda.

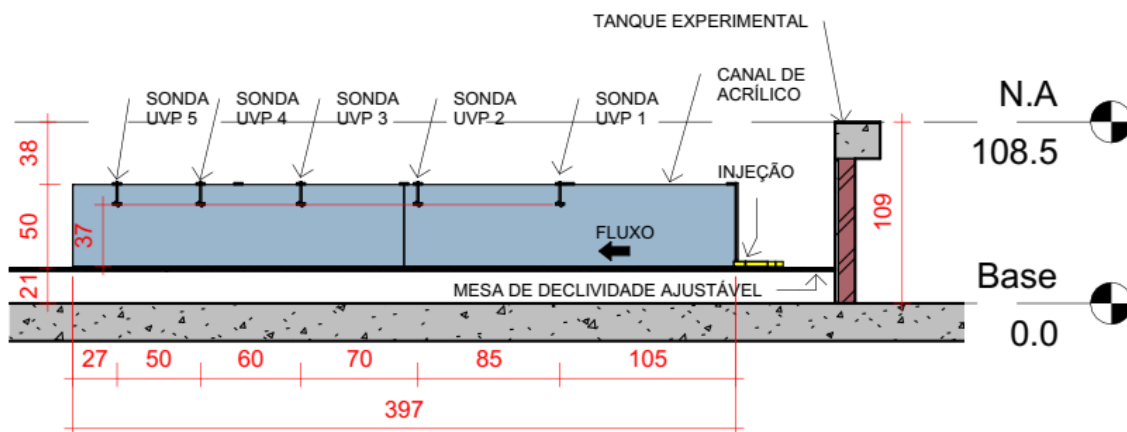


Figura 28 - Croquí do posicionamento das sondas de UVP ao longo do canal de simulação (medidas em centímetros; Anexo II).

#### VI. Medidor de Vazão Eletromagnético

O medidor de vazão eletromagnético fabricado pela Siemens, modelo FM MAG 6000, é instalado na tubulação de injeção para que haja controle preciso da vazão e do volume de mistura injetado no canal. Enquanto a água passa pelo equipamento, mudanças no campo eletromagnético são registradas em uma frequência de 4 Hz e convertida para a vazão em  $L \cdot s^{-1}$ , os dados podem ser visualizados através do aplicativo *MyPCLab*®.

A figura 29 apresenta modelo esquemático da linha de instalação hidráulica de injeção da corrente de turbidez com a respectiva posição do medidor de vazão.

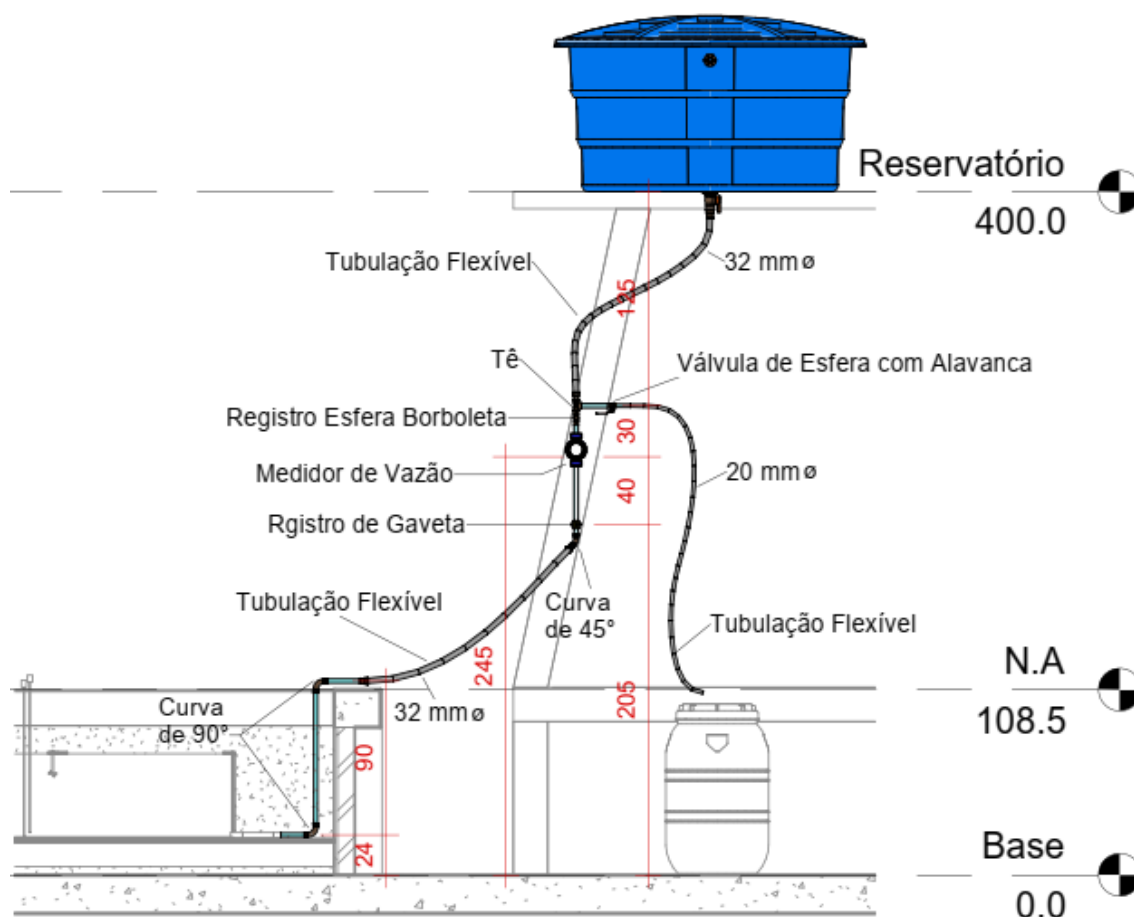


Figura 29 – Croqui esquemático do sistema de injeção e da posição do medidor de vazão eletromagnético (as medidas apresentadas estão em centímetros; desenho fora de escala; Anexo II).

#### 4.2.2. Equipamentos de Coleta e Análise de Sedimentos

##### VII. Analisador de Partículas a Laser

A análise granulométrica das partículas da corrente de turbidez é feita utilizando um equipamento a laser, modelo Cilas 1180, conforme é apresentado na figura 30. O funcionamento da medição das partículas consiste em um circuito de recirculação da mistura, o qual a conduz através de um prisma causando a difração dos feixes de laser. A intensidade da difração e dispersão dos feixes do laser é proporcional ao tamanho do grão.



Figura 30 - Analisador de partículas a laser da marca Cilas 1180.

O equipamento tem capacidade de medição de tamanho de grãos no intervalo entre 0,04 e 2500  $\mu\text{m}$ . O aplicativo de processamento dos dados gerados atribui a cada mistura analisada uma curva granulométrica acumulada, um histograma de frequências, o tamanho dos diâmetros característicos ( $D_{10}$ ,  $D_{50}$ ,  $D_{90}$ ,  $D_{\text{médio}}$ , que são os tamanhos de grãos iguais ou inferiores a 10, 50 e 90% da amostra e o tamanho médio, respectivamente); e o percentual de argila, silte muito fino, silte fino, silte médio, silte grosso, areia muito fina, areia fina, areia média, areia grossa, areia muito grossa.

#### 4.2.3. Outros Equipamentos

Além dos equipamentos descritos detalhadamente nos itens 4.2.1 e 4.2.2, foram utilizados outros equipamentos de suporte técnico, medição e análise das informações geradas dos ensaios experimentais, são eles:

- a) Estufa: utilizada para secar as amostras coletadas das correntes de turbidez. A secagem retirava toda a água das amostras de mistura após um período submetidas a temperatura de 95° C. Sabendo a massa do béquer, da amostra de mistura e da amostra seca, ou seja, só dos sedimentos, obtinha-se a concentração percentual presente em cada coleta;
- b) Béqueres: utilizado para coletar amostras de sedimento, das misturas e do depósito das correntes de turbidez. Foram utilizados béqueres de 200 e 1000 mL;
- c) Balança Digital de Precisão: utilizada para que fosse verificada a massa das amostras coletadas de mistura de correntes de turbidez;
- d) Holofotes: eram fundamentais para o controle visual da corrente de turbidez durante seu escoamento no canal de simulação. Dispondo de

iluminação suficiente, garantia-se o registro visual através de câmeras de alta definição para observar o desenvolvimento da corrente de turbidez;

e) Computador Portátil: foram utilizados para armazenar e processar informações coletadas por diferentes equipamentos. Foram utilizados no total dois computadores portáteis, sendo um para o medidor de velocidade ultrassônico doppler, um para o medidor de vazão.

#### 4.2.4. Disposição Geral do Aparato Experimental

As figuras 31 e 32 esquematizam, através de croquis representativos em seção e em planta, o aparato experimental de simulação de correntes de turbidez utilizadas nesse trabalho.

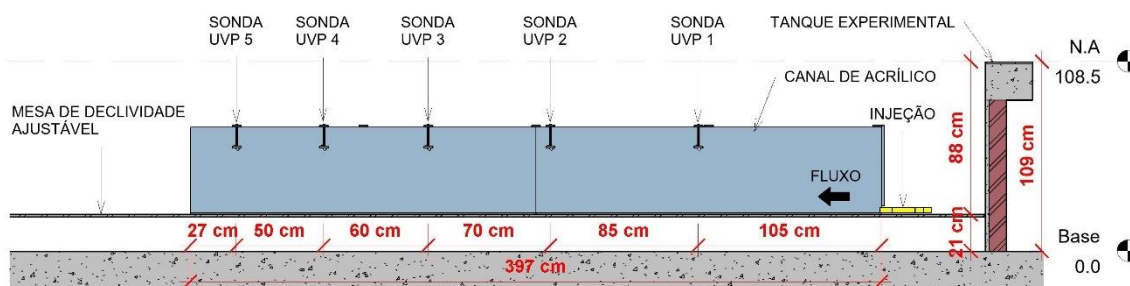


Figura 31 - Diagrama esquemático dos equipamentos utilizados na realização dos ensaios de controle.

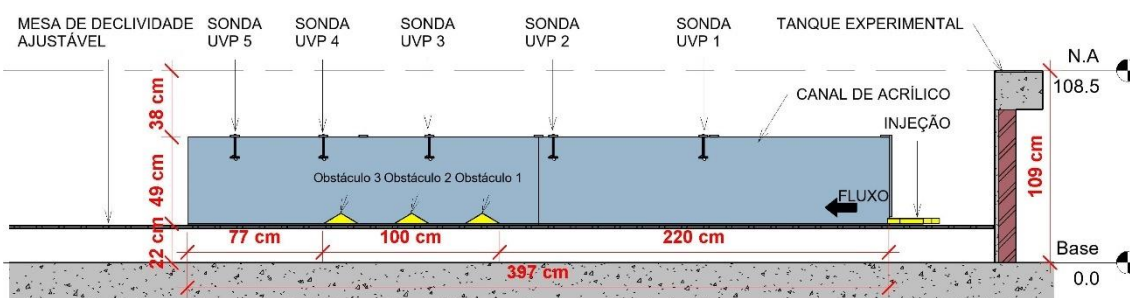


Figura 32 - Diagrama esquemático dos equipamentos utilizados na realização dos ensaios com obstáculos.

Os espaçamentos entre as sondas de UVP e entre os obstáculos foram estabelecidos para possibilitar o registro de velocidades em regiões de interesse. As quais são antes, entre e depois dos obstáculos.

#### 4.2.5. Caracterização Granulométrica do Sedimento de Mistura

O carvão mineral 205 utilizado nesta pesquisa apresenta como valores de diâmetros característicos  $D_{10}$ ,  $D_{50}$  e  $D_{90}$  os tamanhos 4, 47 e 260  $\mu\text{m}$ , o que garante um sedimento com grau de seleção,  $\sigma(\phi)$ , de 2,35 e caracteriza um sedimento muito pobremente selecionado conforme escala de Folk e Ward (1957).

A curva granulométrica do carvão 205, apresentada pela figura 33, mostra um material que abrange uma ampla faixa granulométrica variando entre argila e areia grossa.

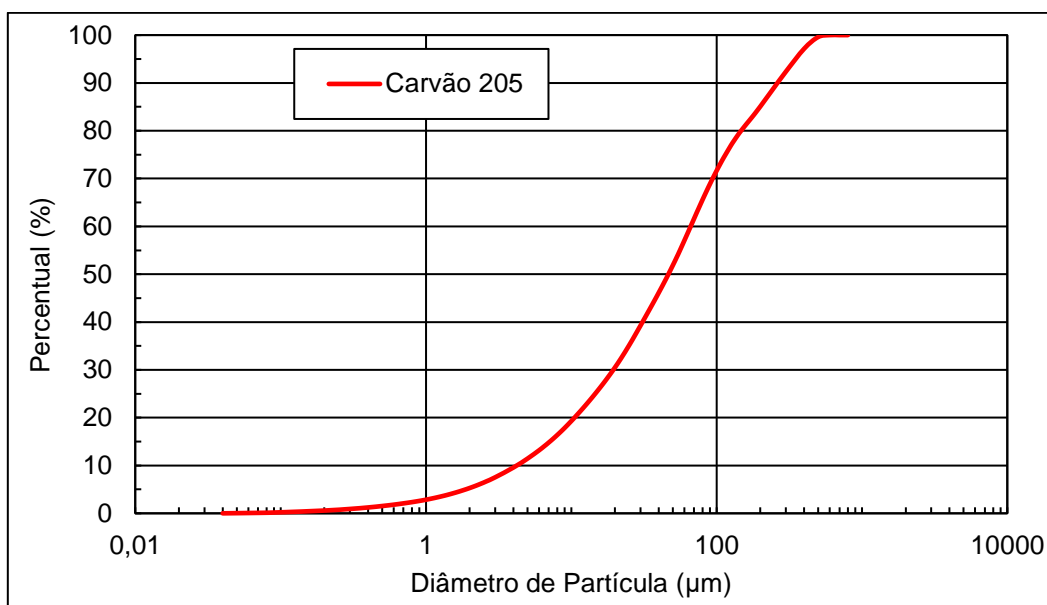


Figura 33 - Curva granulométrica do Carvão 205 utilizado nesta pesquisa (Adaptado de: KOLLER, 2016)

A proporção de cada tamanho de grão indica que o carvão 205 possui 9,6% das partículas do tamanho argila, 48,9% tamanho silte, 41,5% tamanho areia, conforme tabela 1. Esta distribuição granulométrica confere ao material uma má seleção de grãos, o que pode ter uma influência de interesse na interação com os obstáculos para a observação do controle dos obstáculos na distribuição dos grãos.

Tabela 1 – Percentual de classes granulométricas do Carvão 205 utilizado nesta pesquisa (Adaptado de: KOLLER, 2016).

<b>Tamanho de Grão</b>	<b>Percentual (%)</b>
Argila	9,6
Silte Muito Fino	6,8
Silte Fino	10,2
Silte Médio	14,3
Silte Grosso	17,7
Areia Muito Fina	18,4
Areia Fina	12,3
Areia Média	10,5
Areia Grossa	0,4
Areia Muito Grossa	0,0
<b>Total</b>	<b>100,0</b>

A densidade do carvão 205 obtida através de técnica de picnometria de 3 amostras é de 1,44, e uma massa específica de sedimento ( $\rho_s$ ) de 1438 kg.m<sup>-3</sup> (KOLLER, 2016). Esta massa específica garante a geração de um fluxo de densidade superior ao do fluido ambiente de simulação, o qual nesta pesquisa será a água, cuja massa específica a temperatura de 20°C é, aproximadamente, 998 kg.m<sup>-3</sup>.

#### 4.2.6. Análise a partir do diâmetro médio adimensional dos sedimentos de simulação

Para analisar a distribuição média dos grãos dos depósitos das correntes de turbidez, buscou-se utilizar o diâmetro médio ( $D_{\text{médio}}$ ) adimensionalizado, devido ao fato deste agregar informações acerca de outros percentis da distribuição granulométrica. Neste processo, a decisão é segmentar o canal em três trechos: antes dos obstáculos, entre os obstáculos e após os obstáculos.

As equações 13, 14, 15 e 16 apresentam as relações adimensionais do  $D_{\text{médio}}$  entre os segmentos estabelecidos do canal.

$$\frac{D_{\text{médio antes}}}{D_{\text{médio depois}}} \quad \text{Equação 13}$$

$$\frac{D_{\text{médio antes}}}{D_{\text{médio entre}}} \quad \text{Equação 14}$$

$$\frac{D_{\text{médio entre}}}{D_{\text{médio depois}}} \quad \text{Equação 15}$$



$$\frac{(D_{\text{médio antes}} - D_{\text{médio depois}})}{D_{\text{médio entre}}} \quad \text{Equação 16}$$

Sendo  $D_{\text{médio antes}}$  relativo ao trecho a montante dos obstáculos;  $D_{\text{médio entre}}$  relativo ao trecho compreendido pelos obstáculos; e  $D_{\text{médio depois}}$  relativo ao trecho a jusante dos obstáculos.

### 4.3. Procedimento Experimental

Os ensaios experimentais deste trabalho foram estabelecidos a partir da definição dos parâmetros de simulação, a saber: a concentração volumétrica, vazões de injeção e as topografias (obstáculos) a serem utilizadas.

#### 4.3.1. Concentração Volumétrica da Mistura de Simulação

A concentração volumétrica ( $C_v$ ) da mistura definida para a realização dos experimentos buscou simular correntes de turbidez de baixa concentração (ver item 3.1.2). Portanto, para que fosse garantida a predominância das forças inerciais pela turbulência do escoamento, a concentração volumétrica definida pela equação 17 para todos os ensaios foi de 5%.

$$C_v(\%) = \frac{V_s}{V_m} * 100 \quad \text{Equação 17}$$

Onde  $C_v$  é a concentração volumétrica (%);  $V_s$  é o volume de sedimento em litros;  $V_m$  é o volume de mistura em litros. Nos experimentos, um volume de 1000 litros de água era inserido no reservatório de alimentação. Para alcançar 5% de concentração volumétrica, foi inserido a massa ( $M_s$ ) de 76 kg de carvão 205. A transformação de massa de sedimento em volume de sedimentos se dá pela divisão pela massa específica do sedimento ( $\rho_s$  em  $\text{kg.m}^{-3}$ ).

#### 4.3.2. Vazões de Injeção

Para analisar os efeitos hidrodinâmicos de obstáculos no escoamento de correntes de turbidez, foram estabelecidas três vazões de ordem de grandeza crescente. As vazões foram escolhidas de forma a respeitar uma semelhança dinâmica (Froude densimétrico) na injeção, com um projeto de pesquisa em paralelo a essa pesquisa, intitulado (projeto Processos II).

Dessa forma, os resultados podem ser balizados e comparados, se necessário. Assim, para garantir o mesmo número de Froude densimétrico na

injeção, a vazão calculada nos experimentos foi de  $5 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ , conforme tabela 2. Além disso, são apresentadas as outras condições de injeção para vazões maiores ( $10$  e  $25 \text{ L}\cdot\text{m}^{-1}$ ) para estudos de efeito hidrodinâmico nas correntes de turbidez.

Tabela 2 - Semelhança hidráulica de injeção entre ensaios do Processos II e condições de injeção para esta pesquisa.

Dados	Referência Processos II	Condições de Injeção		
		$Q_1$	$Q_2$	$Q_3$
$C_v$ (%)	5	5	5	5
$Q$ (L/min)	50	5	10	25
$A_{\text{DIFUSOR}}$ ( $\text{m}^2$ )	0,016	0,0026	0,0026	0,0026
$U$ injeção (m/s)	0,052	0,032	0,065	0,163
$\rho_a$ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	998	998	998	998
$\rho_s$ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	1440	1440	1440	1440
$g$ ( $\text{m}/\text{s}^2$ )	9,807	9,807	9,807	9,807
$g'$ ( $\text{m}/\text{s}^2$ )	4,315	4,315	4,315	4,315
$Fr_d$ injeção	0,56	0,56	1,1	2,9
$Ri$ injeção	3,181	3,177	0,758	0,121

#### 4.3.3. Topografia Seleccionada

Os obstáculos que serão utilizados nos experimentos não representarão feições de relevo reais existentes nos leitos submarinos, mas sim, serão representações topográficas genéricas de elevações. Para representar os altos e baixos topográficos serão utilizados triângulo isósceles, cuja base será a maior aresta, conforme é apresentado na figura 34.

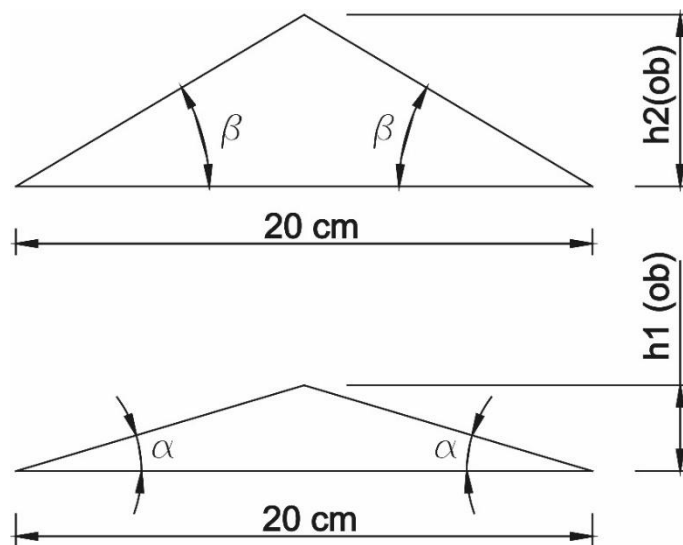


Figura 34 - Modelo de obstáculos que serão utilizados.

As alturas dos obstáculos foram definidas em 3 cm ( $h_1$ ) e 6 cm ( $h_2$ ). O primeiro buscava representar a ocorrência de escoamento crítico na crista do obstáculo (equação 9) e o segundo uma condição mais desfavorável para a corrente, a qual poderia chegar até o seu bloqueio total.

Os cálculos desta etapa foram realizados a partir dos ensaios de calibração do modelo (série ET), conforme plano de dissertação e tabela 3.

Tabela 3 - Alturas calculadas dos obstáculos para experimentos da série ET.

<b>Ensaio</b>	<b>h (m)</b>	<b>Frd</b>	<b>H' crítica</b>	<b>H' bloqueio</b>	<b><math>h_{(ob)}</math> para que haja escoamento crítico (mm)</b>	<b><math>h_{(ob)}</math> para bloqueio total (mm)</b>
ET.1	0,07	1,44	0,12	2,07	8	220
ET.2	0,05	1,89	0,5	3,6	25	310
ET.3	0,045	1,60	0,23	2,6	10	189

Os resultados dos cálculos indicaram que a altura de obstáculo para ocorrer escoamento crítico em sua crista variou entre 8 e 25 mm. Enquanto que as alturas de obstáculos para ocorrer o bloqueio total da corrente de turbidez variou entre 189 e 310 mm. Neste contexto, visando a aplicação de uma condição de interação entre corrente de turbidez e obstáculos que resulte no bloqueio parcial da corrente de turbidez (conforme diagrama de Oshaghi et al. (2013)), as alturas escolhidas para compor os obstáculos deste trabalho são 30 e 60 mm.

#### 4.3.4. Planejamento de Ensaios

A realização dos experimentos deste trabalho foi dividida em duas etapas: uma etapa de ensaios testes e; posteriormente três series de ensaios com três experimentos de vazões injetadas definidas  $Q_1$ ,  $Q_2$  e  $Q_3$  em cada, as quais serão detalhadas a seguir (tabela 4).

A primeira etapa de ensaios, denominado ensaios testes ("ET"), teve como objetivo implantar uma metodologia experimental, sendo eles necessários para a testagem de equipamentos, treinamento de metodologias de coletas de dados e também organização do escopo experimental.

Já na etapa seguinte os experimentos foram agrupados em combinações sem feições topográficas denominada superfície plana (série 1 de controle) e

com feições topográficas (séries 2 e 3 com obstáculos com dois tipos de altura  $h_1$  e  $h_2$ , respectivamente). Estas últimas estão destacadas na figura 35.

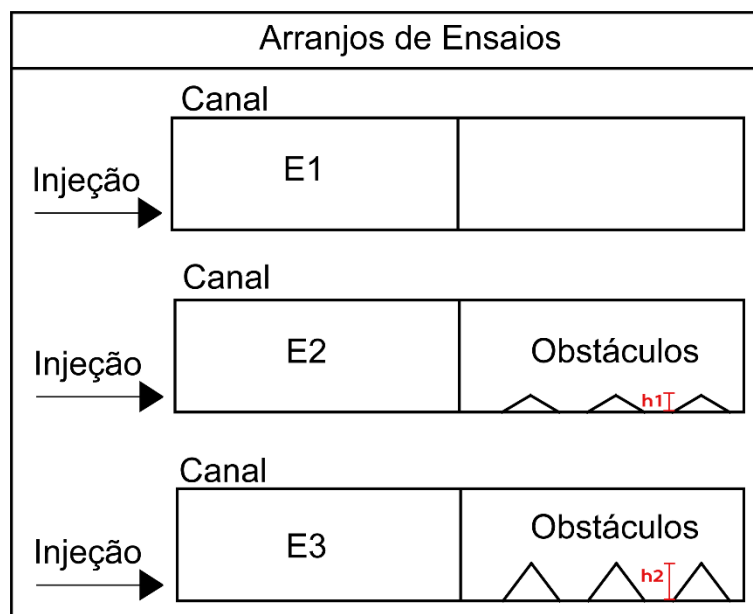


Figura 35 – Diagrama de arranjos topográficos dos ensaios realizados (fora de escala).

Os ensaios estão separados em três fases com layouts topográficos com e sem obstáculos a jusante, conforme figura 35 e tabela 4.

Tabela 4 - Arranjo de ensaios realizados.

Ensaio	Q injeção (l/min)	Volume (L)	T (min)	Material	Cv (%)	Feições Topográficas	
						Obstáculos (h1)	Obstáculos (h2)
ET.1	5	25		Carvão 205	5	-	-
ET.2	5	25				-	-
ET.3	5	25				-	-
E1.1	5	100		Carvão 205	5	-	-
E1.2	10					-	-
E1.3	25					-	-
E2.1	5	100		Carvão 205	5	Sim	-
E2.2	10					Sim	-
E2.3	25					Sim	-
E3.1	5	100		Carvão 205	5	-	Sim
E3.2	10					-	Sim
E3.3	25					-	Sim

#### 4.3.5. Preparos Iniciais, Finalização e Aquisição dos Dados dos Ensaio

Os preparos iniciais para a realização dos ensaios consistiam na instalação dos equipamentos de medição hidrodinâmica da corrente de turbidez no canal de simulação. Esta etapa ocorria no dia anterior ao do ensaio agendado, para que o tanque experimental fosse preenchido já com as sondas e dispositivos posicionados.

A aquisição dos dados hidrodinâmicos ocorria durante a realização dos ensaios, e posteriormente os tratamentos necessários em *software* de planilha eletrônica para obter as informações de interesse. Enquanto que a aquisição de informações granulométricas dos depósitos só poderia ocorrer após a drenagem do tanque experimental. Processo que começava uma hora após o fim do mesmo, com uma vazão lenta (~14 l/min) e demandava em torno de 48 horas para não causar interferência devido ao rebaixamento do nível d'água no respectivo depósito resultante.

A interpretação dos depósitos considerou aspectos granulométricos e geométricos, visando compreender a forma como o fluxo sustentou as partículas ao longo do canal de simulação, e como houve o controle e seleção dos grãos devido a influência dos obstáculos. A ordem da análise prosseguiu com a aquisição das espessuras dos depósitos (levantamento topográfico do depósito), coleta de amostras do depósito de jusante para montante e espaçadas em 20 cm, e em seguida a interpretação granulométrica do mesmo.

O levantamento batimétrico foi realizado, com o tanque drenado, utilizando um medidor a laser para obter as alturas do depósito em seções transversais do canal espaçadas 20 cm entre si. Após este procedimento ocorria a coleta de amostras do depósito nestes mesmos segmentos ao longo do canal, as quais eram submetidas ao processo de análise granulométrica de partículas a laser.

Deste procedimento descrito acima, se obteve a distribuição espacial do tamanho dos grãos ao longo do canal, aqui representados pelo valor da mediana (diâmetro característico  $D_{50}$ ) e também, as proporções de argila, silte, areia presentes no depósito.

#### 4.3.6. Cálculo do Grau de Seleção do Sedimento dos Depósitos

Através da metodologia de Folk e Ward (1957), é possível obter o grau de seleção dos sedimentos indica o quanto o tamanho dos grãos da amostra varia em torno do valor da mediana do diâmetro ( $D_{50}$ ), conforme equação 18 e 19 e tabela 5.

$$\sigma_{\phi} = \left( \frac{\phi_{84} - \phi_{16}}{4} \right) + \left( \frac{\phi_{95} - \phi_5}{6,6} \right), \quad \text{Equação 18}$$

$$\phi = -\log_2(D_{\%}) \quad \text{Equação 19}$$

Onde  $\sigma_{\phi}$  é o grau de seleção de sedimentos adimensional;  $\phi$  é o parâmetro logarítmico em função do diâmetro;  $D_{\%}$  é o diâmetro característico, em  $\mu\text{m}$ , da amostra correspondente aos percentis de 5, 16, 84 e 95%.

A tabela 5 mostra a escala do grau de seleção dos sedimentos proposta por Folk e Ward (1957), a qual varia de “extremamente selecionado” a “muito pobremente selecionado”.

Tabela 5 - Escala de grau de seleção de grão (FOLK e WARD, 1957).

$\sigma (\phi)$	<b>Grau de Seleção</b>
< 0,35	Muito bem selecionado
0,35 a 0,5	Bem selecionado
0,5 a 1,0	Moderadamente selecionado
1,0 a 2,0	Pobremente selecionado
2,0 a 4,0	Muito pobremente selecionado
> 4,0	Extremamente pobremente selecionado

## 5. RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados obtidos nos experimentos das correntes de turbidez escoando sobre obstáculos, sendo caracterizadas pela análise da velocidade da corrente, bem como os parâmetros geométricos, e também a caracterização do depósito formado em cada série de experimentos. Ademais, esses resultados servirão de embasamento para as discussões que serão levantadas para responder aos objetivos deste trabalho, os quais serão apresentados no próximo capítulo (item. 6).

### 5.1. Dados de Velocidade das Correntes de Turbidez

#### 5.1.1. Velocidade Média da Corrente de Turbidez ao Longo do Canal

A velocidade média em cada seção de controle é um indicador do desenvolvimento do fluxo ao longo do seu percurso. A importância desse parâmetro consiste na possibilidade de se obter uma propriedade média do fluxo, na capacidade de controle de comportamento evolutivo da corrente e possibilidade de se obter parâmetros adimensionais como, por exemplo, o número de Froude densimétrico ( $F_{rd}$ ) (KNELLER e BUCKEE, 2000)

A figura 36 apresenta a velocidades médias das correntes ao longo do canal (nos cinco pontos de medida de velocidade).

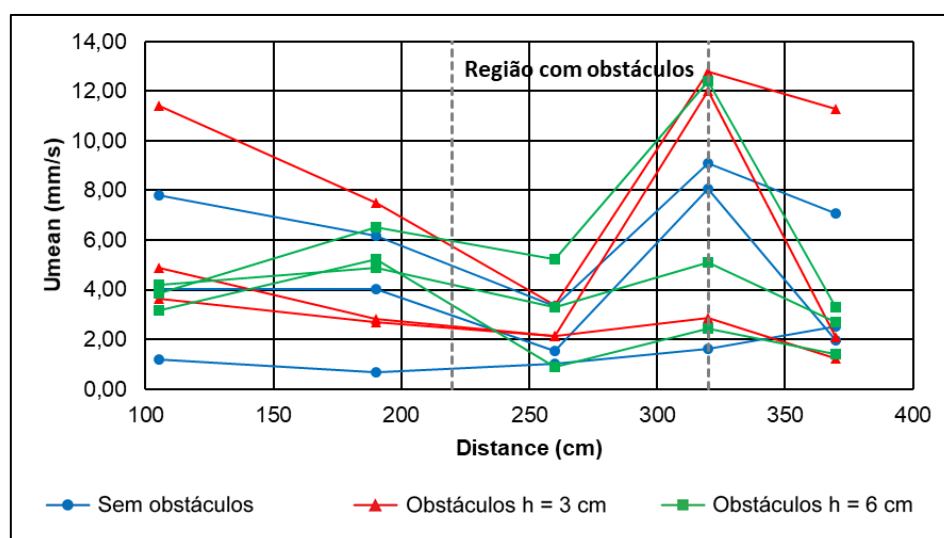


Figura 36 – Diagrama de velocidade média pela distância do canal.

O desenvolvimento da velocidade média das correntes de turbidez ao longo do comprimento do canal apresenta uma desaceleração inicial após a injeção e

uma tendência de aceleração da mesma na região distal da injeção, independente da presença de obstáculos ou não. No entanto, se torna mais intenso nos grupos de ensaios com obstáculos e vazões de 10 e 25 l.min<sup>-1</sup> (Q<sub>2</sub> e Q<sub>3</sub>, respectivamente).

O aumento dessa velocidade do fluxo pode estar relacionado a um ajuste interno do fluxo após a sua entrada no canal, ou ainda um efeito devido a condição de contorno final do canal de acrílico (4 m) e posterior desconfinamento da corrente na bacia (BAAS et al., 2004).

### 5.1.2. Perfis verticais médios de velocidade das correntes de turbidez

O perfil de velocidade de uma corrente de turbidez indica a variação de deslocamento das partículas em relação ao tempo e em cada altura do fluxo. Portanto, o perfil de velocidade contém a capacidade de consolidar informações hidrodinâmicas, geométricas e sedimentométricas da corrente de turbidez (MANICA, 2012).

A figura 37 apresenta os perfis verticais médios de velocidades das correntes de turbidez da série 1 de ensaios (série de ensaios de controle sem a existência de obstáculos no leito de escoamento). Estes perfis e os subsequentes das figuras 38 e 39 são dimensionais, com altura (z) em mm e (u) velocidades em mm.s<sup>-1</sup>.

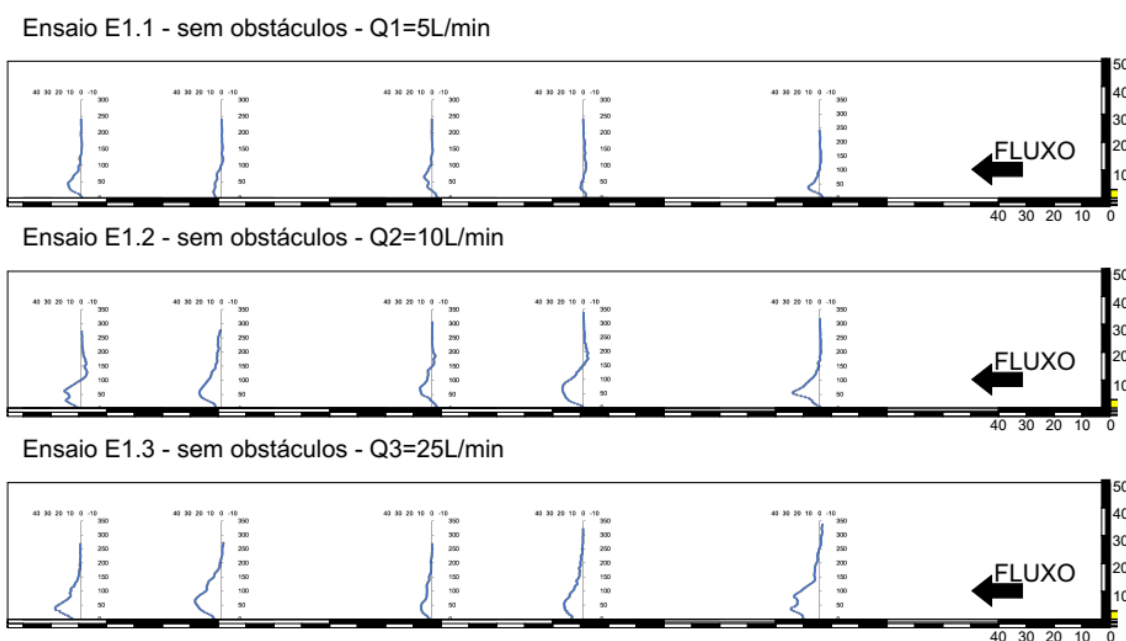


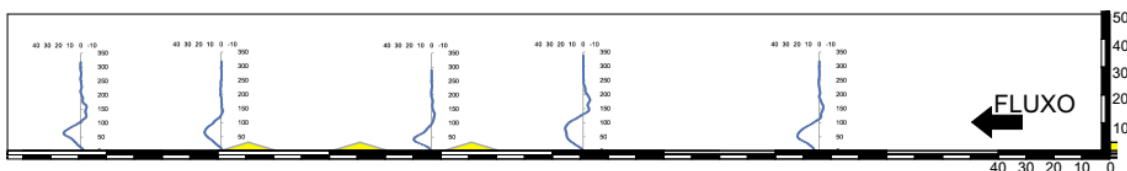
Figura 37 - Perfis médios de velocidade da série 1, sem obstáculos, distribuídos ao longo do canal.



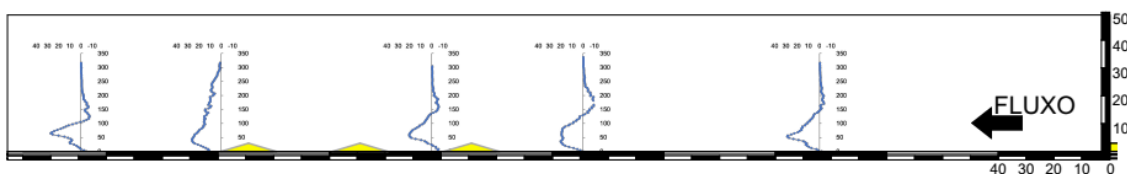
A figura 37 mostra o desenvolvimento do perfil vertical de velocidade da corrente de turbidez ao longo do canal, nas posições em que ocorria as medições de velocidade e para as diferentes vazões de injeção. De uma maneira geral, é possível observar o desenvolvimento de um perfil característico de velocidade para as correntes de turbidez diluídas, com uma tendência do perfil de velocidade estar mais acelerado nas regiões proximais e distais da injeção, e uma redução de valores do perfil de velocidade na região central do canal.

As figuras 38 e 39 apresentam o desenvolvimento dos perfis de velocidades dos ensaios das séries de experimentos com a presença de obstáculos, no caso a series 2 e 3, respectivamente.

Ensaio E2.1 - obstáculos  $h=3\text{cm}$  -  $Q_1=5\text{L/min}$



Ensaio E2.2 - obstáculos  $h=3\text{cm}$  -  $Q_2=10\text{L/min}$



Ensaio E2.3 - obstáculos  $h=3\text{cm}$  -  $Q_3=25\text{L/min}$

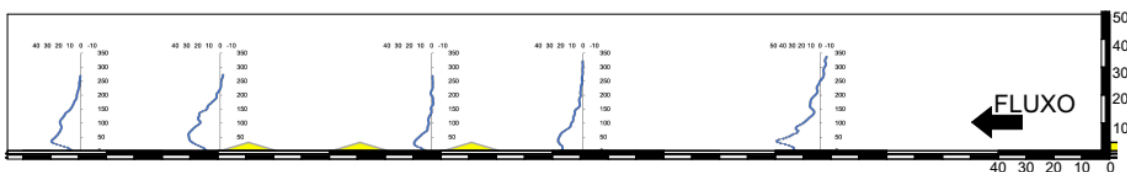


Figura 38 – Perfis médios de velocidade da série 2, com obstáculos de 3 cm de altura (geometria em amarelo na figura), distribuídos ao longo do canal.

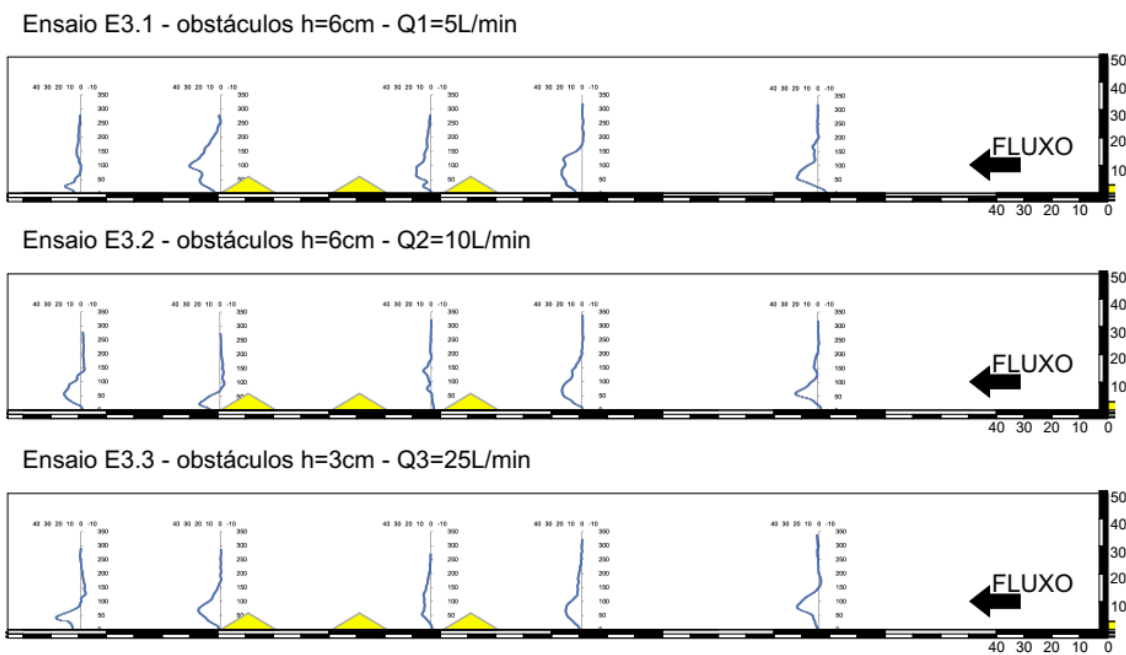


Figura 39 - Perfis médios de velocidade da série 3, com obstáculos de 6 cm de altura (geometria em amarelo na figura), distribuídos ao longo do canal.

Os perfis de velocidade antes a após a presença de obstáculos é bem típica de correntes de turbidez (p. ex. Kneller & Buckee, 2000). No entanto, conforme resultados encontrados por Rossato e Alves (2011), os perfis de velocidade de uma corrente de turbidez, após interagir com obstáculos no leito de escoamento sofrem deformações, mas tendem a se regenerar em relação a sua forma e magnitude desenvolvidas antes da interação.

Uma outra maneira de analisar esses dados de perfis verticais de velocidade é adimensionalizá-los. Já que perfis adimensionais demonstram o comportamento de diferentes correntes de turbidez relativamente a um denominador comum, que deve ser um parâmetro presente entre todos os experimentos, além de minimizar os efeitos da escala do experimento.

Os parâmetros adimensionais utilizados para trazer os perfis de velocidade para uma escala comparável entre si foram: a altura adimensionalizada pela altura total do fluxo ( $z/H_t$ ) e a velocidade medida adimensionalizada pela velocidade de avanço da cabeça da corrente ( $u/U_c$ ). A tabela 6 apresenta esses parâmetros médios calculados em cada corrente. Com essa adimensionalização, espera-se realçar as alterações na hidrodinâmica da corrente comparando escoamentos controle (sem obstáculos) com os escoamentos com obstáculos

Tabela 6 - Parâmetros medidos nos ensaios e utilizados na adimensionalização dos perfis de velocidades.

<b>Corrente</b>	<b>Q (L.min<sup>-1</sup>)</b>	<b>U<sub>c</sub> (mm.s<sup>-1</sup>)</b>	<b>H<sub>t</sub> (mm)</b>
E1.1	5	18,18	55
E1.2	10	26,67	85
E1.3	25	50,00	120
E2.1	5	22,20	50
E2.2	10	28,57	90
E2.3	25	50,00	130
E3.1	5	22,22	60
E3.2	10	25,00	90
E3.3	25	44,44	150

A figura 40 apresenta os perfis verticais adimensionais de velocidades dos experimentos agrupados por ensaio e sobrepostos, sendo cada diagrama comparando as diferentes feições topográficas e vazões.

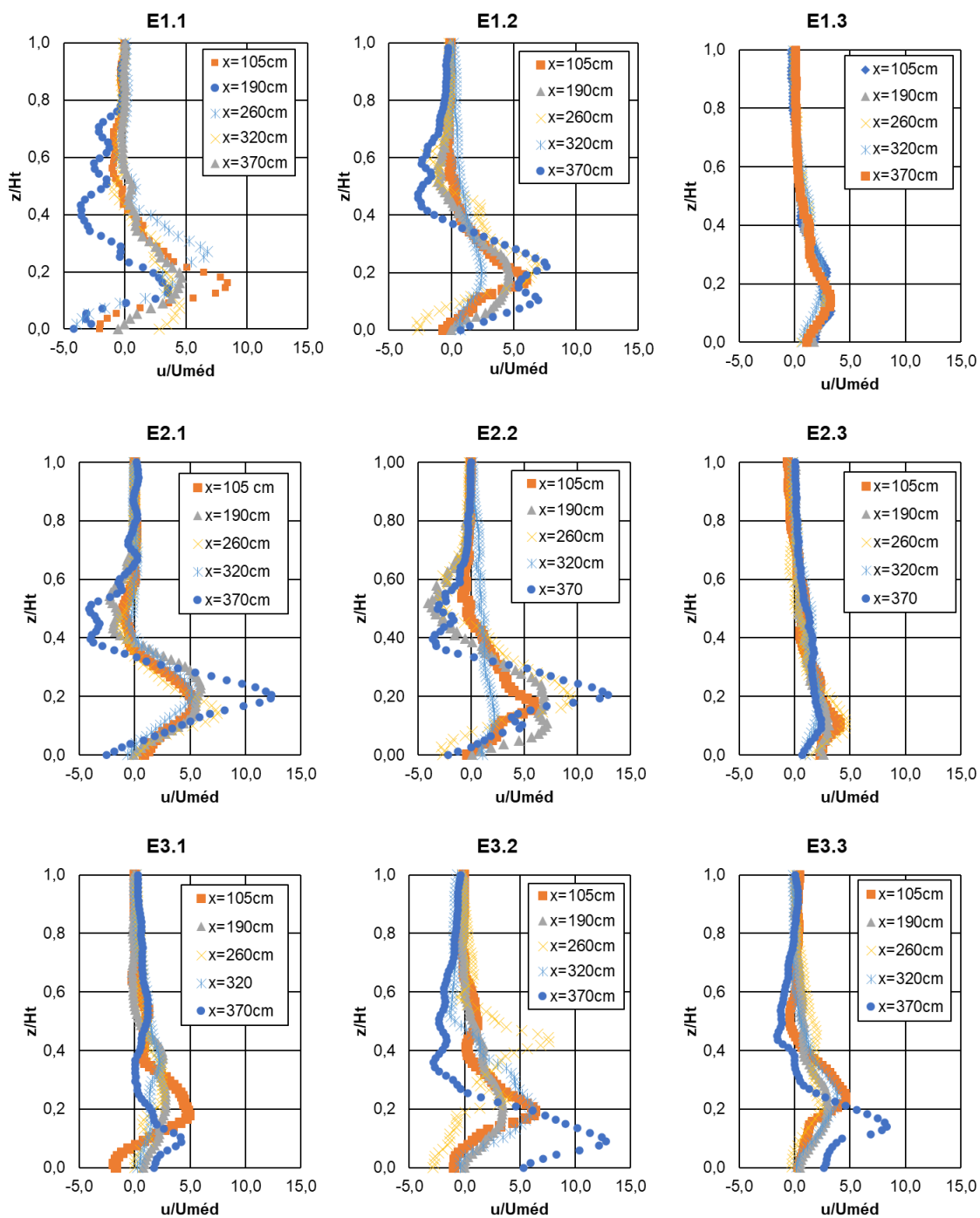


Figura 40 - Perfis verticais médios adimensionais de velocidades dos ensaios das séries 1 (E1, sem obstáculos), série 2 (E2, com obstáculos de 3 cm de altura), série 3 (E3, com obstáculos de 6 cm de altura).

Os perfis de velocidade adimensionalizados mostram o desenvolvimento característico da corrente de turbidez para todos os ensaios da série de controle e da série com obstáculos de 3 cm, sendo, respectivamente, a série 1 (E1.1, E1.2. e E1.3) e a série 2 (E2.1, E2.2 e E2.3). Sendo possível observar que para os fluxos testados os obstáculos de 3 cm não causaram efeitos significativos na estrutura do perfil de velocidades.

Para comprovar esse comportamento, a tabela 7 apresenta os valores do erro relativo calculado entre os valores dos perfis adimensionalizados de todas series de ensaio, onde mostram que a diferença entre esses valores das duas primeiras series (1 e 2) é significativamente menor (~ 1/3 menor) quando comparado com a série 3.

Tabela 7 - Erro relativo entre os ensaios da série com obstáculos em relação aos ensaios da série sem obstáculos.

x (cm)	E1.1	E2.1	E3.1	Erro (E2- E1/E1) (%)	Erro (E3- E1/E1) (%)
	Uméd/Uc	Uméd/Uc	Uméd/Uc		
105	0,022	0,16	0,17	6,27	6,73
190	0,012	0,12	0,29	9,00	23,17
260	0,019	0,1	0,23	4,26	11,11
320	0,029	0,13	0,56	3,48	18,31
370	0,046	0,06	0,15	0,30	2,26
<b>Média</b>	<b>0,03</b>	<b>0,11</b>	<b>0,28</b>	<b>4,66</b>	<b>12,31</b>

Para os ensaios da série 3 (com obstáculos de 6 cm de altura) ocorre que a estrutura do perfil vertical de velocidades foi desconfigurada na posição do canal equivalente a 260 cm distante da injeção, localizado entre obstáculos. Além disso, esta série de experimentos apresenta valores de velocidade adimensionalizada menores (linha azul deslocada a esquerda em relação aos ensaios da série 1 e 2).

No entanto, esta estrutura de perfil vertical se recompõe ao comportamento característico imediatamente após a zona com obstáculos, na posição 320 cm da injeção. Podendo sugerir que as correntes da série 2 assumiram um comportamento com menor obstrução do fluxo que as correntes da série 3, visto que a recirculação (o fenômeno que causa a deformação do perfil de velocidade) tende a ocorrer em um ambiente mais confinado entre obstáculos de maior altura (TOKYAY et al., 2011; YAGHOUBI et al., 2017; FARIZAN et al., 2019)

## 5.2. Parâmetros Geométricos das Correntes de Turbidez

Ao se desenvolverem, as correntes de turbidez apresentam alguns parâmetros geométricos característicos de serem medidos, especialmente em simulações físicas como, por exemplo, o seu formato (interface) ou ainda espessura da sua cabeça, corpo e da sua cauda. Esse acompanhamento pode ser em um ponto do canal ao longo do tempo (série temporal) ou com uma imagem ao longo de todo o comprimento (série espacial).

Este controle de geometria se assemelharia ao acompanhamento da linha da água em escoamentos a superfície livre. Nos experimentos realizados neste trabalho, a partir de registros fotográficos realizados, foi possível ter imagens da passagem da corrente em um ponto localizado entre 200 cm e 240 cm da injeção (incluindo o obstáculo de montante).

As figuras 41, 42 e 43 apresentam os registros fotográficos das correntes de turbidez espaçados em 5 segundos.

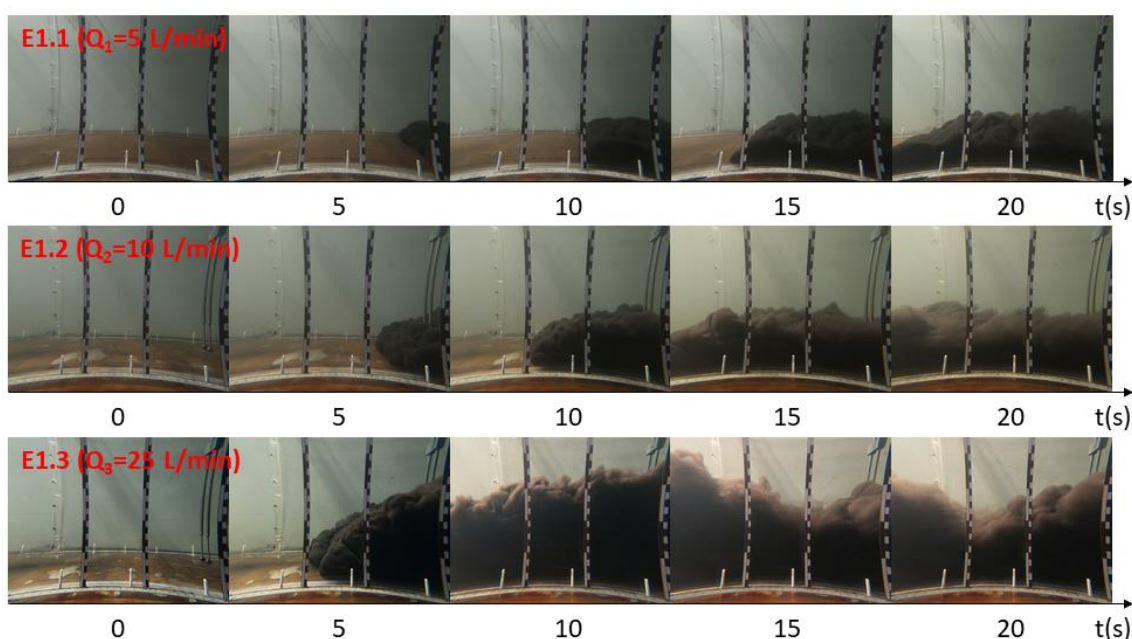


Figura 41 - Registro fotográfico das correntes de turbidez da série 1 (sem obstáculos) compreendendo o um trecho de 40 cm do canal, na posição de 200 cm a 240 cm da injeção.

As correntes de turbidez da série 1 (sem obstáculos) tiveram o comportamento condicionado principalmente pela vazão de injeção. Portanto, quanto maior a vazão maior era a sua espessura do fluxo, visto que o incremento da energia cinética das partículas do fluxo aumenta a turbulência e a troca com

o fluido ambiente, tornando a zona de mistura da corrente (superior) mais espessa no ensaio E1.3 (KAHVASI et al., 2011; NOURMOHAMMADI et al., 2011; MANICA, 2009).

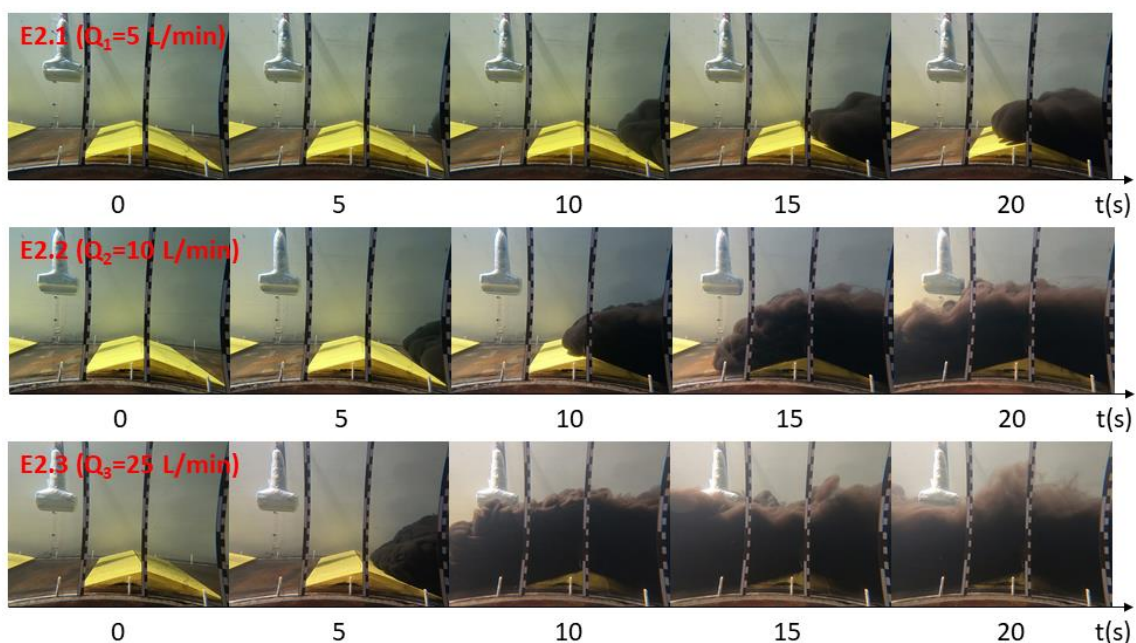


Figura 42 - Registro fotográfico das correntes de turbidez da série 2 (obstáculo  $h = 3$  cm) compreendendo o um trecho de 40 cm do canal, na posição de 200 cm a 240 cm da injeção.

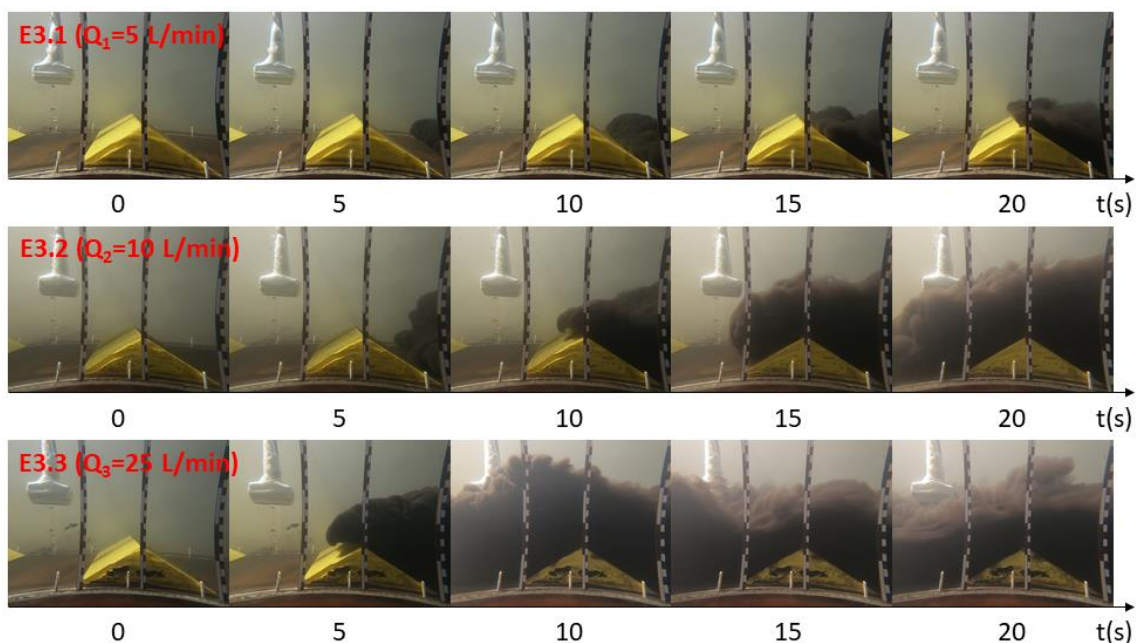


Figura 43 - Registro fotográfico das correntes de turbidez da série 3 (obstáculo  $h = 6$  cm) compreendendo o um trecho de 40 cm do canal, na posição de 200 cm a 240 cm da injeção.

Já as correntes de turbidez das séries 2 e 3 (com obstáculos de 3 e 6 cm, respectivamente) se desenvolveram e superaram os três obstáculos ao longo do comprimento do canal. No entanto, modificações hidrodinâmicas de velocidade (ver figura 40) e na geometria da corrente pode ser verificada nas imagens, sendo mais significativas nos ensaios da série 3 (figura 43).

Além da visualização qualitativa do registro fotográfico da corrente (sobre o obstáculo a 220 cm), no qual se verifica o aumento da espessura com a vazão, os dados da tabela 6 foram rearranjados e separados por grupos de vazão (tabela 8). Deste processo foi calculada a média da altura total para cada grupo de vazão ensaiados para visualização do entendimento de que a vazão é determinante no desenvolvimento da espessura da corrente de turbidez, conforme tabela 8 e figura 44.

Tabela 8 - Variação da espessura da corrente ( $H_t$ ), velocidade da cabeça ( $U_{cab}$ ) e vazão de injeção ( $Q$ ).

Corrente	Q (L.min <sup>-1</sup> )	$U_c$ (mm.s <sup>-1</sup> )	$H_t$ (mm)	Ht médio (mm)
E1.1	5	18,18	55	55,0
E2.1	5	22,2	50	
E3.1	5	22,22	60	
E1.2	10	26,67	85	88,3
E2.2	10	28,57	90	
E3.2	10	25	90	
E1.3	25	50	120	133,3
E2.3	25	50	130	
E3.3	25	44,44	150	



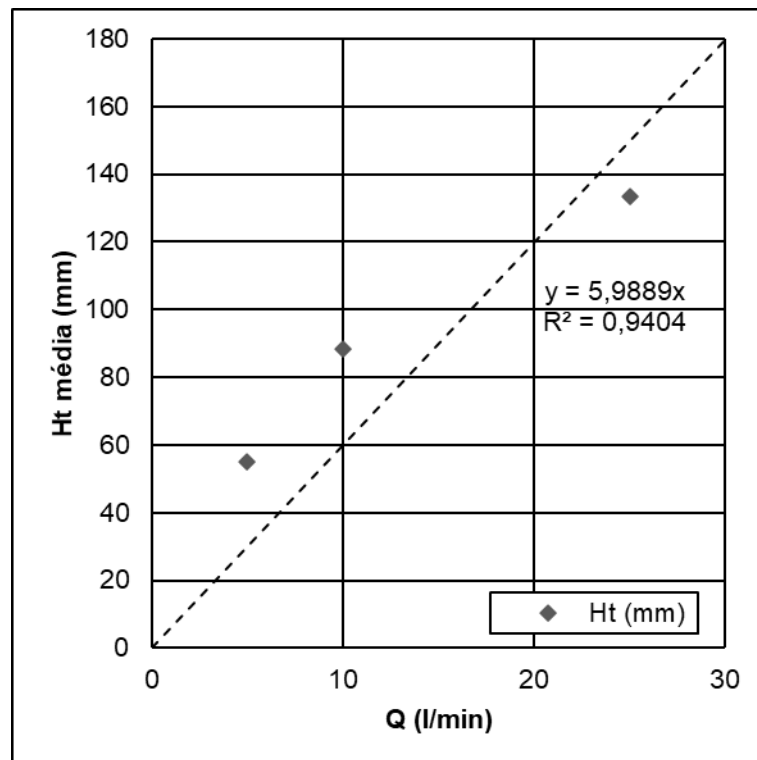


Figura 44 - Gráfico de tendência do comportamento da espessura da corrente.

Pelos dados da tabela 8 e pela figura 44, verifica-se uma tendência de crescimento entre a média das alturas totais e a vazão de injeção. Esta tendência é praticamente linear ( $R^2 = 0,96$ ) e crescente, passando de 55 mm para 133 mm em média.

### 5.3. Depósitos de Correntes de Turbidez

Os depósitos formados pelas correntes de turbidez nos ensaios das séries 1, 2 e 3 foram caracterizados através de parâmetros geométricos (espessura) e parâmetros estatísticos oriundos da análise granulométrica dos grãos, tais como: distribuição de tamanho de grãos, variação do  $D_{50}$  e  $D_{médio}$ , e a análise granulométrica dos depósitos.

#### 5.3.1. Espessura dos Depósitos de Correntes de Turbidez

A figura 45 apresenta o diagrama esquemático da espessura dos depósitos gerados das correntes de turbidez das séries 1, 2 e 3 de experimentos.

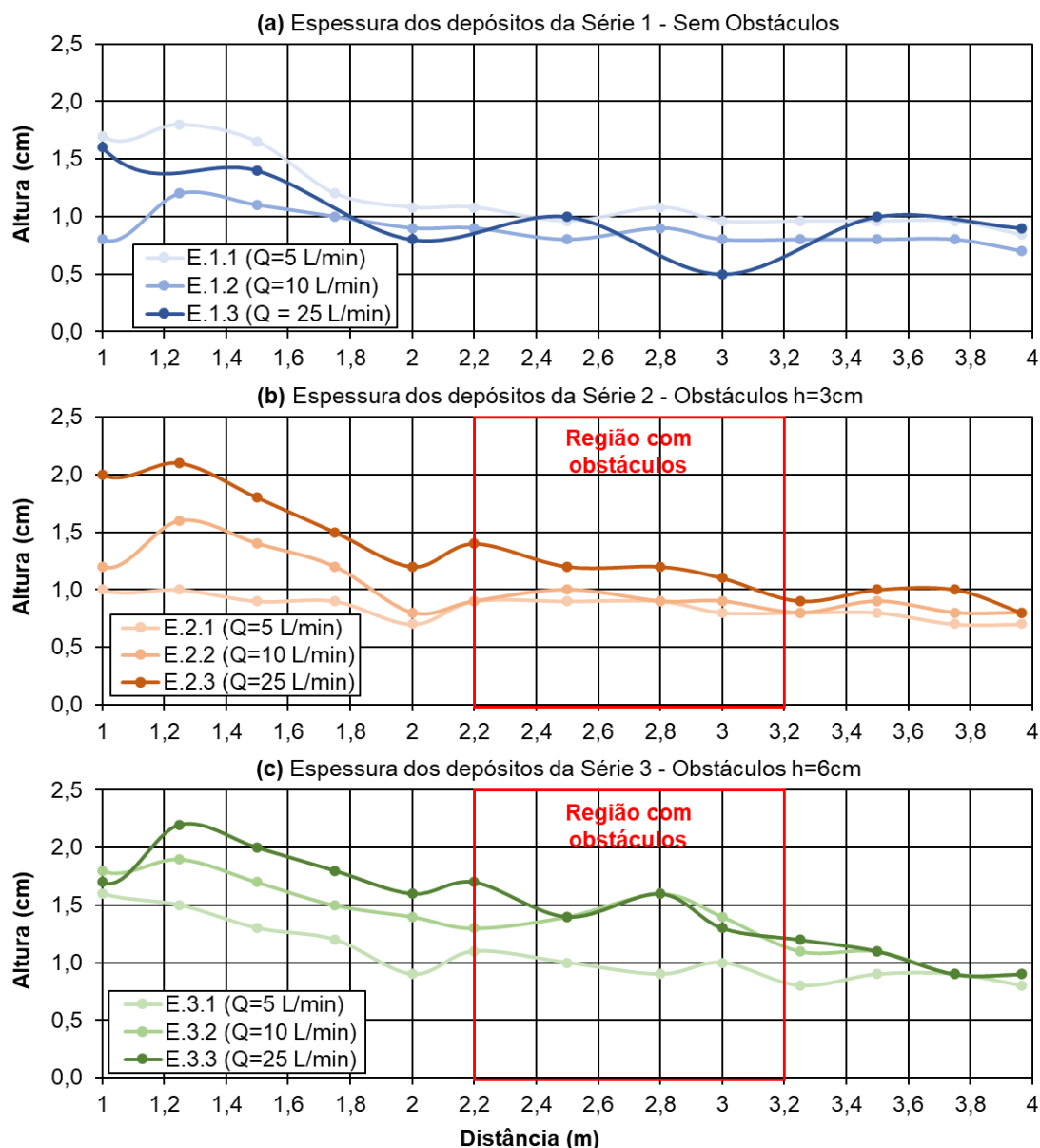


Figura 45 - Espessuras de depósito de experimentos da série 1 sem obstáculos (a); série 2 com obstáculos de 3 cm de altura (b); e série 3 com obstáculos de 6 cm de altura (c).

Através da análise da figura 45, verificou-se que os ensaios da série 1, sem a presença de obstáculos, apresentam um decréscimo de sua espessura ao longo do comprimento. Algumas variações são observadas ao longo do espaço e também não houve a indicação que a vazão controle esse parâmetro significativamente.

Esperava-se que com uma menor vazão, houvesse um maior acúmulo de grãos a montante do canal, o que de fato não ficou totalmente evidenciado nos perfis de espessura das séries 1, 2 e 3. O perfil do depósito do ensaio com maior

vazão (E1.3) desenvolveu uma espessura intermediária comparando com os experimentos de menor vazão (E1.1 e E1.2).

Já nos depósitos formados nos ensaios com obstáculos (séries 2 e 3), também se verificou um decréscimo de espessura de depósito ao longo do comprimento, mas com valores de espessuras maiores a montante (maior acúmulo de sedimentos depositados, conforme a vazão de injeção foi aumentando (Figura 45 (b) e (c)). Além disso, os obstáculos contribuíram para a retenção de grãos ao longo do comprimento, já que eles podem ter atuado como uma barreira de sedimentos a jusante.

Este comportamento pode ser verificado ao se analisar os resultados da série 2 de ensaios, com obstáculos de 3 cm de altura, a qual apresenta espessuras intermediárias entre os ensaios da série 1 (sem obstáculo) e série 3 (maior obstáculo).

#### 5.3.2. Variação do $D_{50}$ e do $D_{\text{médio}}$ dos depósitos das correntes de turbidez

A variação da mediana ( $D_{50}$ ) indica a capacidade que o escoamento tem de transportar os grãos a jusante e também a sua competência do escoamento. Neste sentido, o  $D_{50}$  será influenciado pelas condições de escoamento. Sendo possível observar efeitos tanto da vazão sobre estes parâmetros quanto dos próprios obstáculos sobre os mesmos.

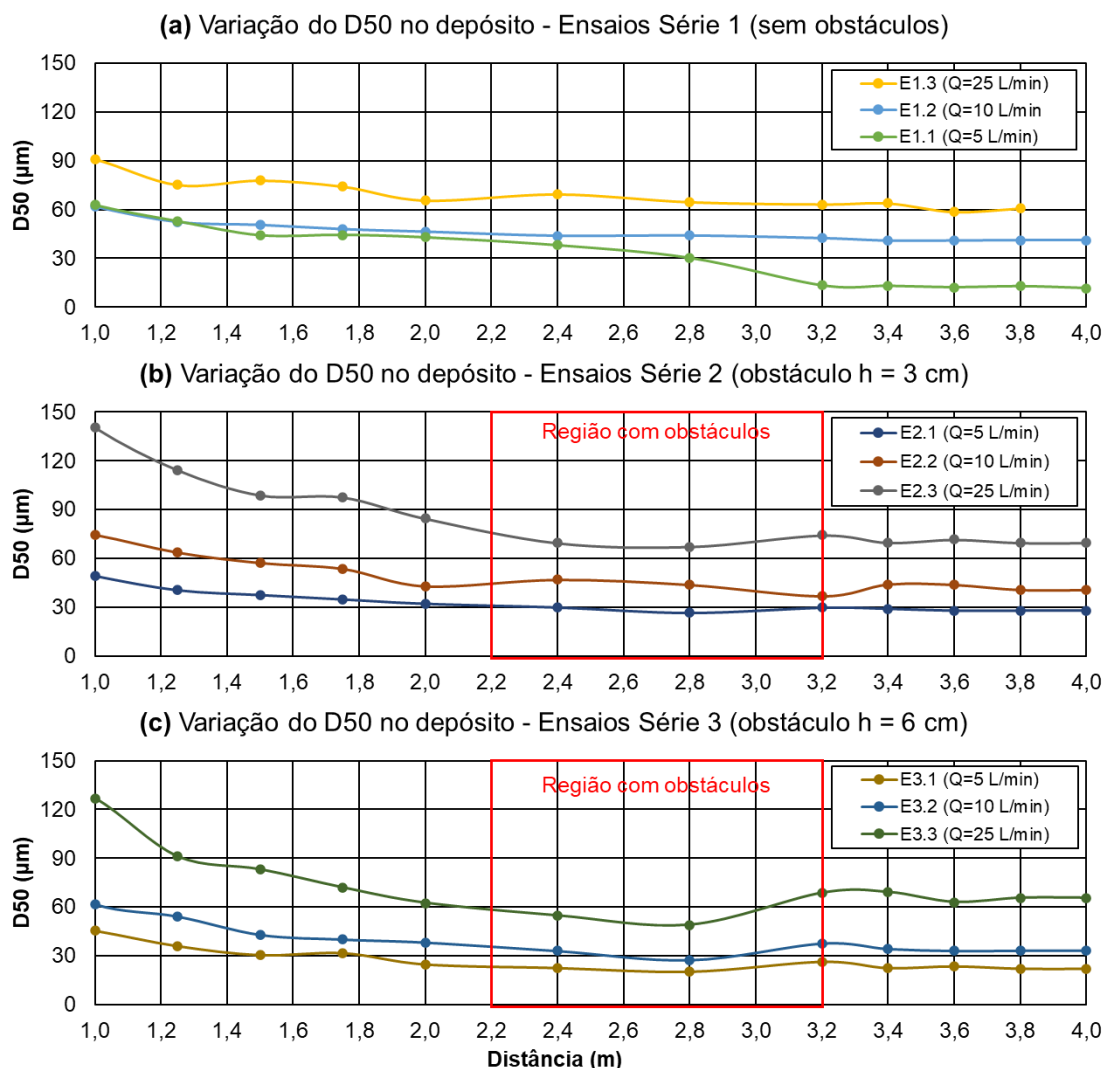


Figura 46 - Variação do D<sub>50</sub> para os ensaios com vazões sem obstáculos, com obstáculos de 3 cm e 6 cm, respectivamente (a), (b) e (c).

Na figura 46, comparando vazões para uma mesma condição de superfície topográfica, é possível notar o afinamento das partículas do depósito conforme a vazão diminui. Os depósitos formados pelas vazões de 5 L.min<sup>-1</sup> foram mais finos do que os depósitos formados pelas vazões de 10 e 25 L.min<sup>-1</sup>, sendo este último o depósito com grãos mais grossos. Esta seleção devido a vazão tem relação com o fato de fluxos de maior energia tendem a carregar partículas maiores e mais pesadas (maior competência) com mais eficiência do que fluxos de menor energia.

O diâmetro médio do depósito de corrente de turbidez ( $D_{\text{médio}}$ ) busca representar um pouco melhor a distribuição de grãos no depósito, uma vez que considera mais parâmetros que somente a mediana ( $D_{50}$ ) ao longo de seções

transversais na distância do canal. Portanto, possibilitar a visualizar as alterações que diferentes configurações de leito condicionam na formação do depósito. Estas alterações da deposição ocorrem de acordo com as condições de escoamento e de leito, ou seja, vazão de injeção, existência de obstáculos, isolado ou em associação com outros.

A figura 47 apresenta a variação do  $D_{\text{médio}}$  ao longo da distância do canal, abrangendo todo o depósito das correntes de turbidez testadas, em diferentes condições topográficas.

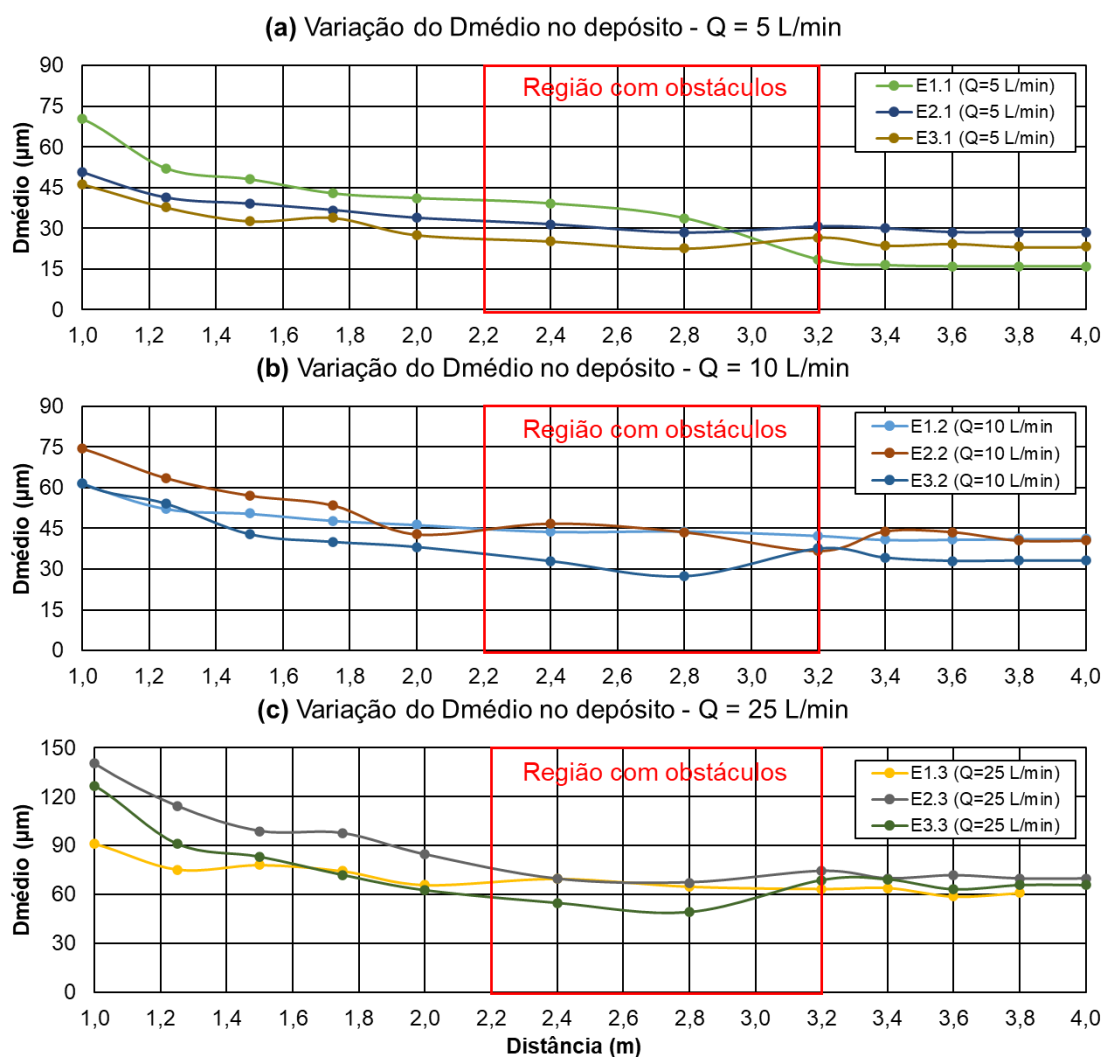


Figura 47 - Variação do  $D_{\text{médio}}$  para os ensaios com vazões de 5, 10 e 25  $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ , respectivamente (a), (b) e (c).

Os efeitos dos obstáculos na granulometria  $D_{\text{médio}}$  no depósito pode ser observado na figura 47. Os experimentos da série 3 (E3.1 a E3.3), que ocorreram com os obstáculos de 6 cm de altura, apresentaram o maior afinamento de grãos

do depósito no entorno dos obstáculos (região entre 2,20 m e 3,20 m). Os depósitos formados pelas correntes de turbidez da série 2 (E2.1 a E2.3), com obstáculos de 3 cm de altura, também apresentaram afinamento de grãos na mesma região compreendida entre 2,20 e 3,20 m.

Conforme as vazões aumentam, os efeitos dos obstáculos na deposição de correntes de turbidez demonstram uma tendência de aumento do  $D_{\text{médio}}$  nas regiões proximais da injeção, sugerindo haver uma maior retenção de grãos maiores antes dos obstáculos, elevando a média dos diâmetros nestas seções. No entanto, para região após os obstáculos o  $D_{\text{médio}}$  teve maior redução quando os obstáculos tinham 6 cm de altura relativamente aos depósitos formados com leitos de obstáculos de 3 cm de altura.

#### 5.4. Análise Granulométrica dos Depósitos

A análise granulométrica dos depósitos ocorreu através da classificação adaptada de tamanho de grãos com base em Udden (1914) e Wentworth (1922). Estas classes estão representadas por diferentes cores para facilitar a visualização dos resultados (quadro 3).

A partir da coleta dos depósitos coletados nas sessões transversais ao longo do comprimento do canal, e o posterior processamento dos resultados no analisador de partículas a laser, foi possível agrupar os resultados em mapas granulométricos de cada classe de tamanho de grão os depósitos gerados nos experimentos, onde no eixo das abscissas está a distância do canal (x) em metros e a proporção de cada classe de tamanho de grão no eixo das ordenadas.

Quadro 3 - Cores de referência para representação gráfica de tamanhos de sedimentos (Adaptado de: Udden (1914) e Wentworth (1922)).

Tamanho de Grão	RGB	Micron ( $\mu\text{m}$ )
Argila	204/255/204	0,24 3,9
Silte	0/128/0	3,9 62,5
Areia Fina	255/255/153	62,5 250
Areia Média	255/255/0	250 500
Areia Grossa	255/204/0	500 1000
Areia Muito Grossa	255/153/0	1000 <

A figura 48 apresenta o mapeamento da proporção de cada classe de tamanho de grão depositados nos ensaios da série 1 de experimentos, sem a presença de obstáculos.

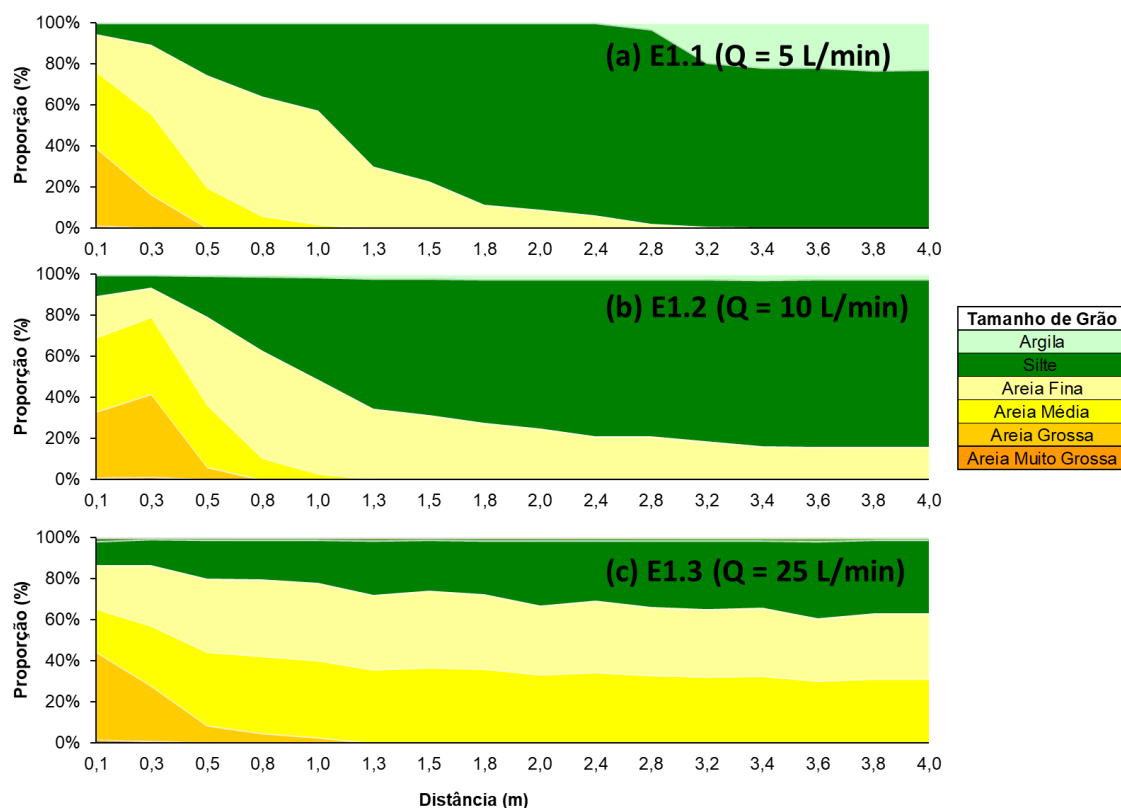


Figura 48 – Mapa granulométrico dos depósitos da série 1 de experimentos, sem obstáculos, sendo as vazões (Q) de (a)  $Q_1$  de 5 L.min<sup>-1</sup>; (b)  $Q_2$  de 10 L.min<sup>-1</sup>; e (c)  $Q_3$  de 25 L.min<sup>-1</sup>.

O comportamento da distribuição granulométrica dos depósitos dos experimentos da série 1 ocorre de forma análoga ao comportamento do  $D_{50}$  e  $D_{médio}$ , ou seja, há uma melhor eficiência de carregamento de partículas mais grossas para regiões distais da injeção conforme aumenta a vazão. Neste cenário, para a corrente de turbidez injetada (E1.1) com a  $Q_1$ , as partículas mais finas de silte e argila são predominantes a partir da posição 1,3 m de distância da entrada e as partículas do tamanho areia fina alcançam até a posição 3,2 m.

Enquanto que o fluxo do experimento E1.3, com  $Q_3$  de 25 L.min<sup>-1</sup>, foi capaz de transportar as partículas de areia fina e média até o fim do canal, indicando uma maior competência desse escoamento no transporte de sedimentos. Nesta condição, ocorre a formação de um depósito de maior proporção arenosa, diferente das correntes de turbidez E1.1 e E1.2 com vazões de injeção menores.

A figura 49 apresenta o mapeamento da proporção granulométrica dos depósitos dos ensaios da série 2 de experimentos, com obstáculos de 3 cm de altura.

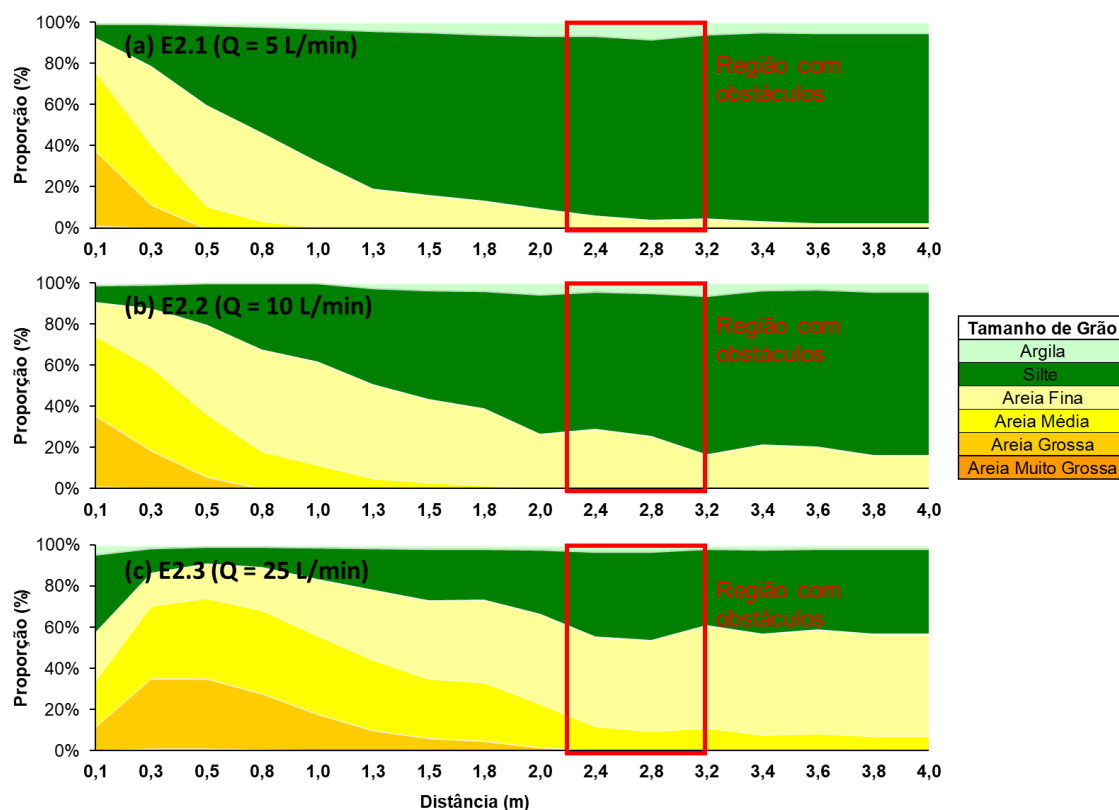


Figura 49 - Mapa granulométrico dos depósitos da série 2 de experimentos, com obstáculos de 3 cm de altura, sendo as vazões (Q) de (a)  $Q_1$  de 5 L.min<sup>-1</sup>; (b)  $Q_2$  de 10 L.min<sup>-1</sup>; e (c)  $Q_3$  de 25 L.min<sup>-1</sup>.

A série 2 de ensaios com obstáculos de 3 cm de altura distribuiu os sedimentos de forma que as partículas do tamanho argila se depositassem ao longo de todo o canal de escoamento. Diferente da série 1, em que as partículas do tamanho argila se depositaram preferencialmente em regiões distais, para a corrente E2.1 com vazão  $Q_1$  o obstáculo fez com que a deposição de argila ocorresse em todo o canal.

Ademais, a proporção de areia fina e média nas regiões distais do canal foram sensivelmente alteradas nas correntes de turbidez E2.2 (10 L min<sup>-1</sup>) e E2.3 (25 L min<sup>-1</sup>) em relação às correntes E1.2 e E1.3. Na região do canal anterior aos obstáculos (distância < 2,2 m) ocorre a interceptação de partículas do tamanho areia, estabelecendo uma descontinuidade na acomodação das partículas na região com obstáculos.



A figura 50 apresenta o mapeamento da proporção granulométrica das correntes de turbidez dos ensaios da série 3 de experimentos com obstáculos de 6 cm de altura.

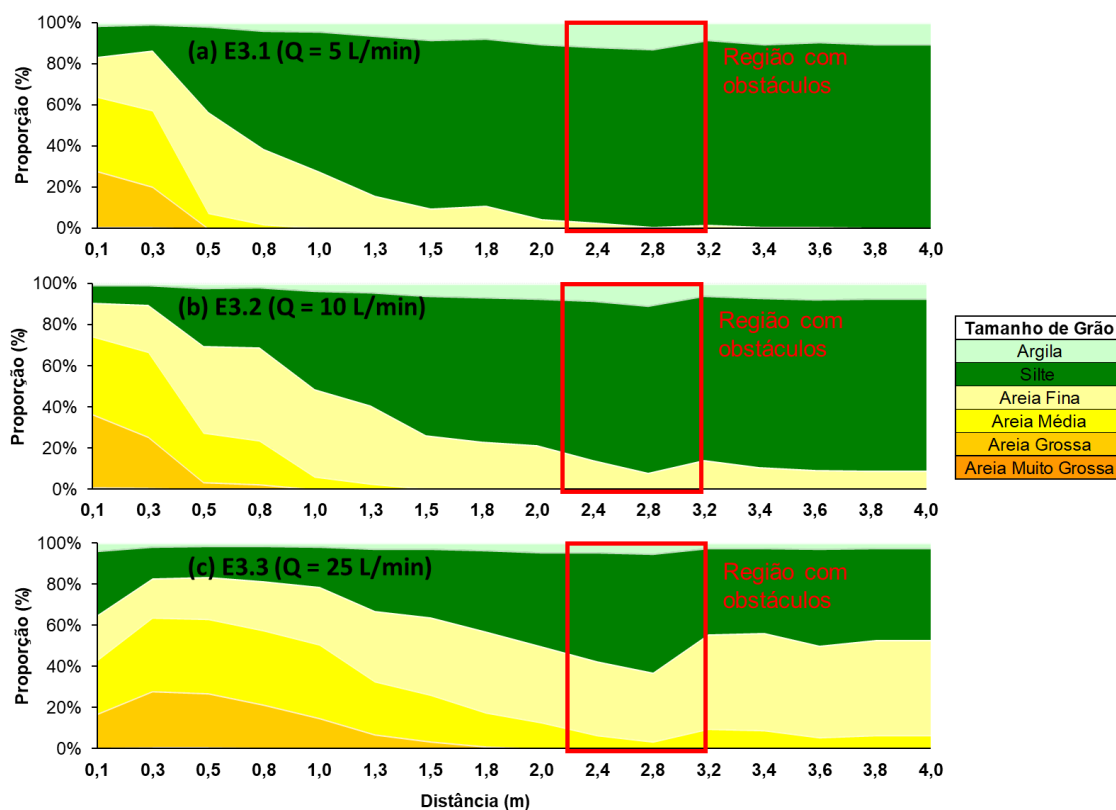


Figura 50 - Mapa granulométrico dos depósitos da série 3 de experimentos, com obstáculos de 6 cm de altura, sendo as vazões (Q) de (a)  $Q_1$  de 5 L.min<sup>-1</sup>; (b)  $Q_2$  de 10 L.min<sup>-1</sup>; e (c)  $Q_3$  de 25 L.min<sup>-1</sup>.

Os depósitos formados pela série 3 de experimentos com obstáculos de 6 cm de altura apresentaram o comportamento de retenção de partículas finas (silte e argila), de areias fina e média na região à montante dos obstáculos. Para esta altura de obstáculo, em todas as vazões  $Q_1$ ,  $Q_2$  e  $Q_3$  ocorreu a retenção material.

## **6. DISCUSSÕES**

As discussões acerca dos resultados estão apresentadas nos tópicos 6.1, 6.2 e 6.3.

### **6.1. Os efeitos causados pela presença de obstáculos na hidrodinâmica das correntes de turbidez**

Para avaliar os efeitos causados pela presença de obstáculos na hidrodinâmica da corrente, os perfis de velocidade adimensionais demonstram o comportamento de diferentes correntes de turbidez relativamente a um parâmetro hidrodinâmico que funcione como denominador comum.

#### **6.1.1. Alterações nos Perfis Verticais Adimensionais de Velocidade**

Com base nos resultados apresentados no capítulo 5 (item 5.1.1 e item 5.1.2), a presença dos obstáculos nos experimentos resultaram em mudanças no comportamento hidrodinâmico das correntes de turbidez. As diferenças apresentadas entre a série 1 e as séries 2 e 3 mostraram que tanto o perfil de velocidade, a velocidade média e a espessura da corrente são afetadas por esta topografia.

Com relação ao perfil vertical de velocidades adimensional, os efeitos da vazão foram minimizados pelos efeitos dos obstáculos. Conforme pode ser verificado na figura 51.

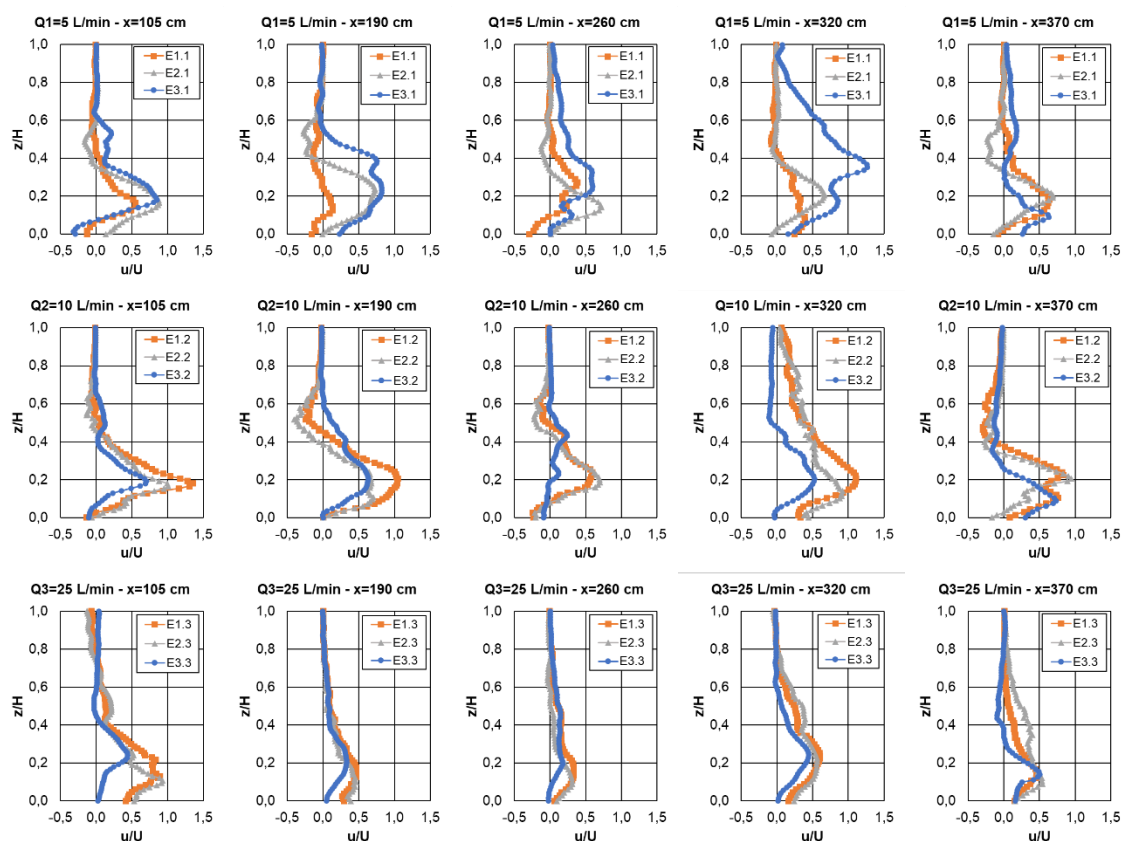


Figura 51 - Perfis de velocidade adimensionalizados e agrupados por vazão, comparando as séries 1, 2 e 3 (sem obstáculos e com obstáculos de 3 cm e 6 cm, respectivamente).

Observa-se que, para a condição de vazão  $Q_1$  ( $5 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$ ), a presença de obstáculos ( $220 < x < 320 \text{ cm}$ ) não resultou em efeitos significativos nem a montante nem entre os obstáculos (perfil  $x = 260 \text{ cm}$ ). Mas no segmento do canal após os obstáculos houve uma redução da intensidade do perfil de velocidade principalmente para os escoamentos E3.1 (com obstáculos de 6 cm e vazão  $5 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$ ).

Conforme a vazão aumenta (consequentemente, a energia do fluxo também aumenta), a interação das correntes de turbidez com os obstáculos se torna mais marcante. Para as vazões  $Q_2$  e  $Q_3$ , ocorre que os perfis de velocidades dos ensaios controle (sem obstáculos) possui ao longo de todo o canal a maior magnitude das velocidades. Neste cenário, os obstáculos, tanto o de 3 cm como o de 6 cm, foram capazes de desacelerar o perfil de velocidades adimensionais ao longo de toda a extensão do canal.

Na figura 51 (b) e 51 (c), nota-se que os perfis que sofrem desaceleração ou são desestruturados entre os obstáculos se regeneram após a passagem por

eles ( $x = 320$  cm e  $x=370$  cm). Especificamente nos perfis E3.2 e E3.3 observa-se que a deformação com os obstáculos em sequência pode ter sido causada devido as zonas de recirculação (perfil quase constante na vertical) que se desenvolvem entre obstáculos e logo após a região com obstáculos os perfis de velocidades desenvolvem a estrutura característica novamente (ROSSATO e ALVES, 2011; YAGHOUBI et al., 2017).

#### 6.1.2. O Número de Froude Densimétrico e o escoamento de Correntes de Turbidez Sobre Obstáculos

Neste contexto de alterações na hidrodinâmica do perfil vertical de velocidades das correntes de turbidez, é possível identificar outros comportamentos dos fluxos com a interação com obstáculos através de relações estabelecidas por números adimensionais hidrodinâmicos. O número de Froude densimétrico relacionado com a velocidade máxima adimensionalizada pela velocidade da cabeça dos respectivos ensaios exprime diferenças no comportamento hidrodinâmico quando a corrente de turbidez escoar sem obstáculos, com obstáculos de 3 cm e em seguida de 6 cm.

A Figura 52 apresenta as curvas que delimitam o comportamento das correntes de turbidez escoando sobre diferentes configurações topográficas.

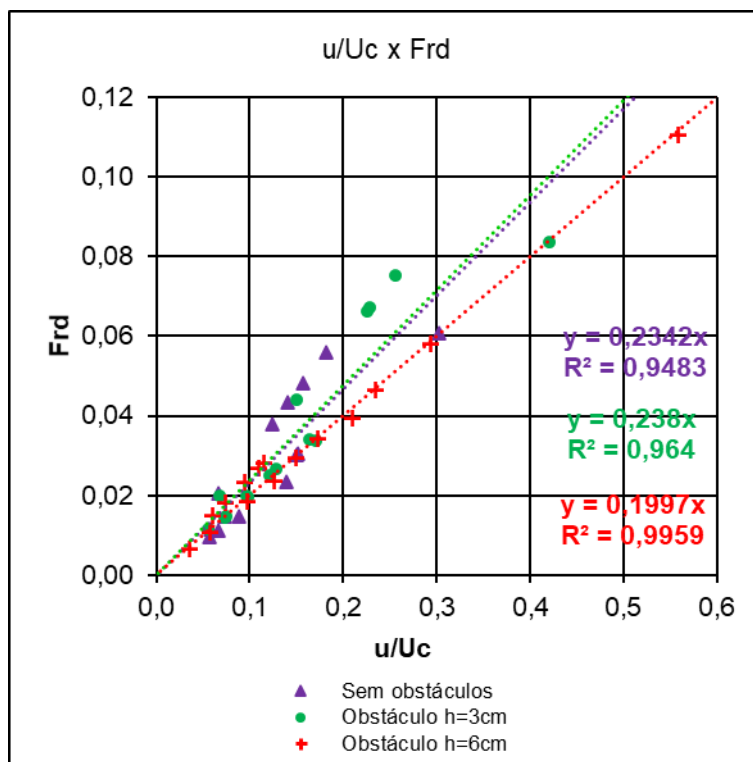


Figura 52 - Relação estabelecida entre a velocidade adimensionalizada e o número de Froude densimétrico entre os ensaios com e sem a presença de obstáculos.

O comportamento da relação adimensional estabelecida na figura 52 se caracteriza como uma relação linear positiva, ou seja, o aumento da velocidade adimensional aumenta o número de Froude densimétrico. A presença de obstáculos é capaz de mudar o gradiente de variação linear desta relação, sendo que para os obstáculos de 6 cm de altura esta relação possui o menor coeficiente linear (Tabela 9)

Tabela 9 - Mudanças no gradiente de variação das linhas de tendências do gráfico entre velocidade adimensional ( $u/U_c$ ) pelo número de Froude densimétrico (Frd).

Ensaio	Equação	R <sup>2</sup> (%)
Sem obstáculos	$Frd = 0,2342 U/U_c$	83,66
Obstáculos (h=3cm)	$Frd = 0,238 U/U_c$	87,39
Obstáculos (h=6 cm)	$Frd = 0,1997 U/U_c$	98,87

Enquanto que, entre as condições topográficas sem obstáculos e com obstáculos de 3 cm de altura, a regressão linear é quase coincidente, com

redução sutil do coeficiente de variação linear da linha de tendência dos pontos com obstáculos de 3 cm de altura em relação à condição de controle.

O número de Froude densimétrico pode se relacionar com outros parâmetros do escoamento de modo a identificar comportamentos da corrente de turbidez que evidencie mais diretamente a influência do obstáculo. Como, por exemplo, a relação entre o número de Froude densimétrico e as alturas da velocidade máxima dos perfis verticais de velocidades adimensionalizada pela altura do obstáculo.

A partir desta relação é possível entender que, para as diferentes alturas de obstáculos de 3 e 6 cm, de acordo com as alturas onde o perfil vertical de velocidade apresenta seu valor máximo, a corrente de turbidez pode assumir comportamentos distintos.

Na figura 53 se observa a relação estabelecida pelas alturas máximas adimensionais (altura do perfil de velocidades onde ocorre a velocidade máxima da corrente dividida pela altura do obstáculo) e o Número de Froude densimétrico.

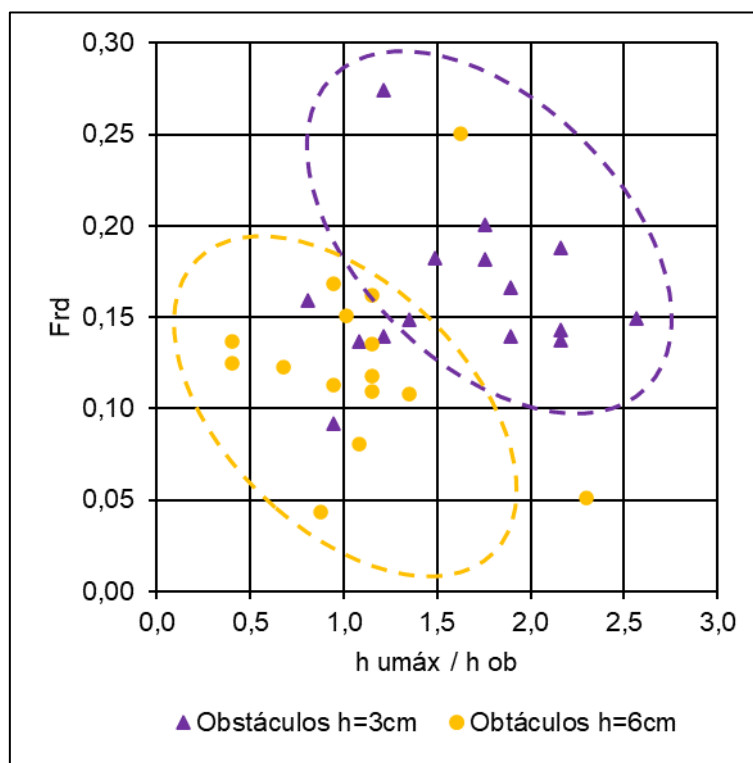


Figura 53 – Relação estabelecida entre o número de Froude e as alturas máximas adimensionais.

Conforme a figura 53, a região em amarelo, composta pelos pontos dos ensaios com obstáculos de 6 cm de altura, apresentou os menores números de Froude densimétrico em relação aos ensaios com obstáculos de 3 cm (região roxa). Neste sentido, sugere-se que a altura do obstáculo influenciou na relação entre as forças de inércias e gravitacionais da corrente, ou seja, obstáculos de maior altura serão capazes de reduzir os efeitos desta relação em relação a obstáculos menores em altura. Esses resultados corroboram com os valores apresentados nos perfis adimensionais de velocidades (Figura 51) e com a espessura da corrente (figura 45)

Outra forma de observar a relação estabelecida entre o número de Froude densimétrico e a existência de obstáculos no escoamento de correntes de turbidez é através da visualização dos registros deste parâmetro ao longo do comprimento do canal. Ou seja, entender como se deu a distribuição deste parâmetro ao longo das etapas do escoamento (antes dos obstáculos, entre obstáculos e após os obstáculos).

A figura 54 apresenta a disposição do número de Froude densimétrico ao longo do canal, entre as etapas do escoamento da corrente de turbidez sobre obstáculos.

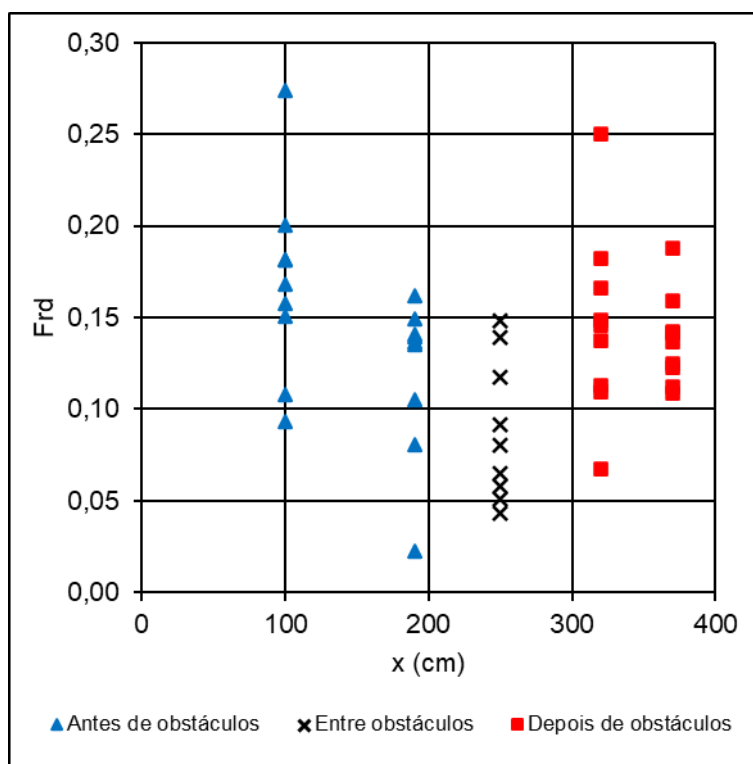


Figura 54 - Variação do número de Froude ao longo do comprimento do canal.

Deste modo, é possível corroborar ao entendimento que a existência dos obstáculos é capaz de reduzir os efeitos do número de Froude densimétrico no trecho do canal onde ocorrem. E logo após vencer esta resistência ao escoamento, as correntes de turbidez tendem a se regenerar, o que pode ser visualizado tanto na figura 54 quanto através dos perfis de velocidade (ROSSATO e ALVES, 2011; YAGHOUBI et al., 2017).

De acordo com Oshaghi et al. (2013), as correntes de turbidez escoando sobre obstáculos podem resultar em três tipos de comportamentos: sendo as regiões do gráfico (I) corrente de turbidez em estado subcrítico sem mudança de regime de escoamento; (IIa) corrente de turbidez é parcialmente bloqueada com ressalto hidráulico estacionário a jusante do obstáculo; (IIb) corrente é parcialmente bloqueada com ressalto hidráulico transitório a jusante do obstáculo; (III) corrente de turbidez em estado supercrítico sem mudança de regime; e a condição extrema de fluxo totalmente bloqueado. Conforme figura 55.

A figura 55 apresenta em qual estado de interação com obstáculos as correntes de turbidez ensaiadas se encontram, no contexto do gráfico proposto por Oshaghi et al. (2013).



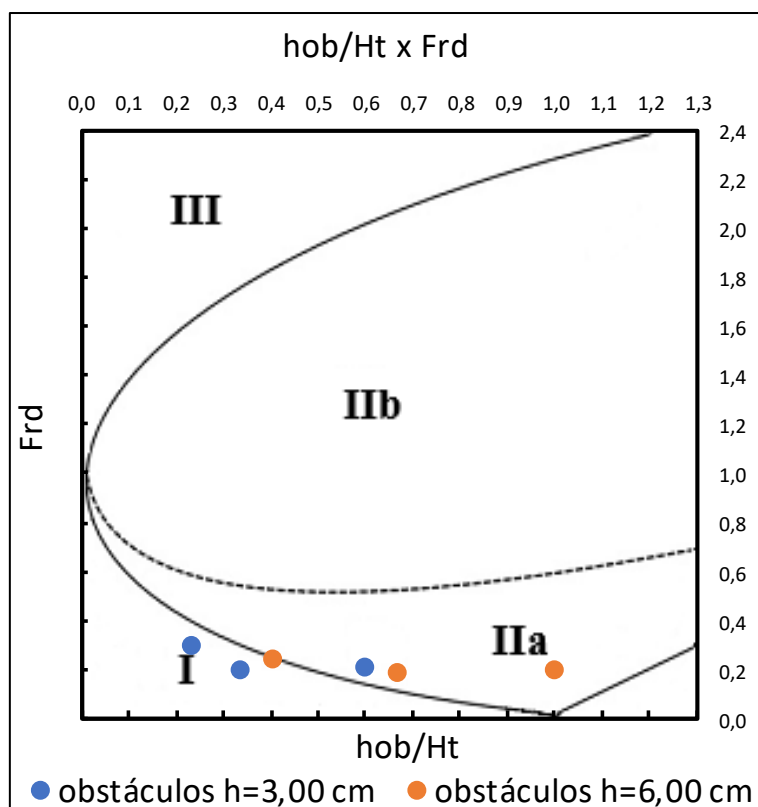


Figura 55 – Relações entre o número de Froude e a altura adimensional do obstáculo, conforme diagrama proposto por Oshaghi et al. (2013).

A partir da figura 55 é possível observar que as correntes de turbidez que escoaram sobre os obstáculos de 3 cm de altura tiveram comportamento predominantemente subcrítico sem alteração de regime de escoamento (região I). Nesta condição de obstáculo, a corrente E2.1 (obstáculo de 3 cm com vazão  $Q_1$  de  $5 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ ) desenvolveu uma relação próxima da caracterizada pela região IIa (corrente parcialmente bloqueada com ressalto hidráulico estacionário à jusante).

Para todos os experimentos (todas as vazões) com obstáculos de 6 cm de altura (serie 3) o comportamento predominante das correntes de turbidez foi parcialmente bloqueado com ressalto hidráulico estacionário à jusante. De fato, a altura de 6 cm, apesar de 100% maior que o da série 2 dos experimentos, não foi capaz de bloquear totalmente o fluxo, incluindo o experimento de menor vazão  $Q_1$  (ponto laranja sobre a linha divisória entre o regime I e II).

Com base nessas análises, verificou-se que o escoamento das series 1 e 2 apresentam o comportamento subcrítico, porém os ensaios da série 3, o escoamento provocou uma mudança significativa de regime, pois ao contornar

o obstáculo, o fluxo passou para o regime supercrítico, voltando ao regime subcrítico novamente, após o ressalto. Essa sequência ocorreu em todos os três obstáculos instalados no canal.

## 6.2. Vazões como condicionantes da interação de correntes de turbidez e obstáculos

As vazões de injeção de uma corrente de turbidez são um fator importante como condicionante de comportamento hidrodinâmico. Desse modo, ao testar diferentes vazões de escoamento de corrente, buscou-se observar diferenças no comportamento do fluxo na variação deste parâmetro.

A relação entre o número de Froude densimétrico e a velocidade máxima do perfil adimensionalizada pela velocidade de avanço se configura com uma tendência linear crescente, cujo crescimento é condicionado pela vazão.

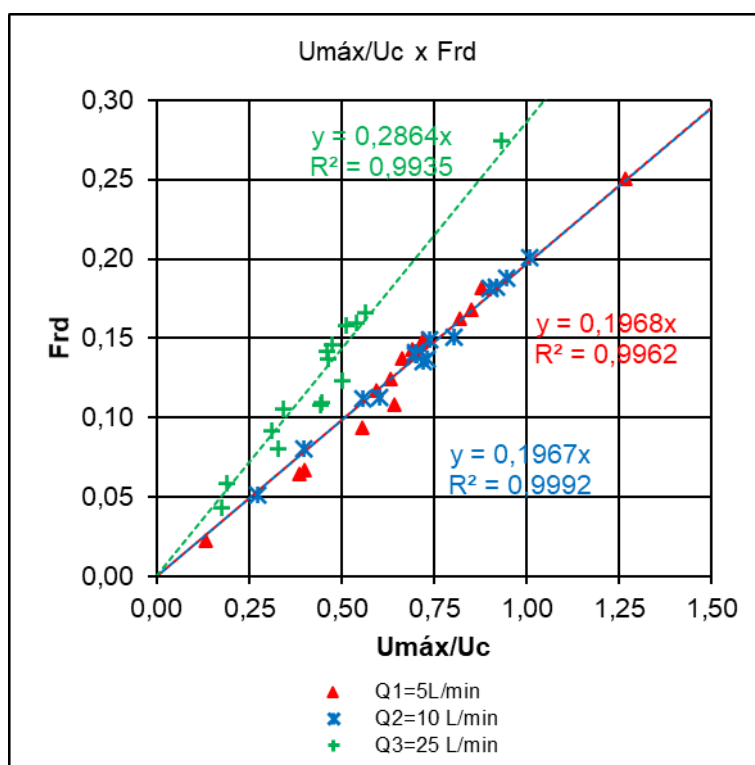


Figura 56 – Relação adimensional estabelecida pelo número de Froude e a velocidade máxima adimensional.

Nesta relação da figura 56, conforme a vazão aumenta, a inclinação da linha de tendência entre número de Froude densimétrico e velocidade máxima adimensional também aumenta. A maior vazão ( $Q_3 = 25 \text{ l.min}^{-1}$ ) apresenta o maior coeficiente angular em relação as vazões menores. Por outro lado, entre

as vazões  $Q_1$  e  $Q_2$  (5 e 10 l.min<sup>-1</sup>, respectivamente), os valores foram muito similares. Esse resultado indica que o ganho que se teria com o aumento de vazão (passado de 5 l.min<sup>-1</sup> para 10 l.min<sup>-1</sup>) não foi totalmente efetivo para modificar as condições do escoamento e que de certa forma, os fatores hidrodinâmicos foram sendo compensados. Cabe salientar que nessa análise, inclui escoamentos com e sem obstáculos reunidos, o que pode ser o fator dessa compensação.

A figura 57 apresenta a relação entre o Froude densimétrico com a altura correspondente a velocidade máxima ( $h_{Umáx}$ ) adimensionalizada pela altura total da corrente ( $H_t$ ).

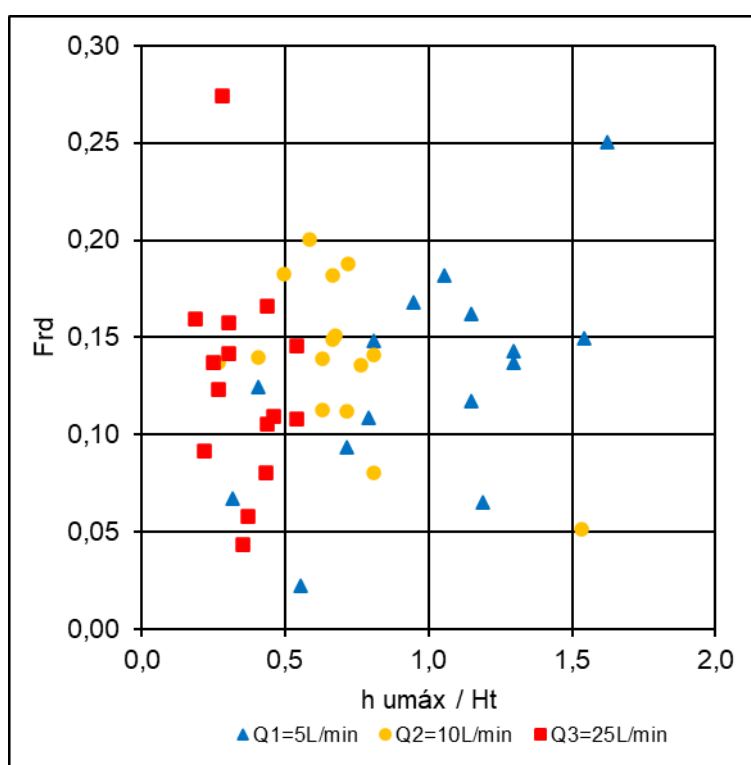


Figura 57 – Relação entre altura adimensional onde a velocidade é máxima e o número de Froude.

Os resultados indicam um padrão de comportamento diferente para cada vazão e com grande dispersão dos dados. Ainda assim, é possível verificar que para vazões  $Q_3$  ocorre as menores alturas adimensionais, isto é, a altura da velocidade máxima é mais próxima ao leito, o que corrobora com outros experimentos de correntes de turbidez (p. ex. Manica, 2012 e Koller, 2020).

Enquanto para as vazões  $Q_1$  ocorrem as maiores alturas adimensionais, para as vazões  $Q_2$  apresenta valores intermediários entre  $Q_1$  e  $Q_3$ . Em média,

as alturas adimensionais da velocidade máxima para a vazão de 5 l.min<sup>-1</sup> foi de 1,01, para vazão 10 l.min<sup>-1</sup> foi de 0,70 e para vazão de 25 l.min<sup>-1</sup> foi de 0,36, mostrando essa tendência inversa ao crescimento da vazão.

### 6.2.1. Fluxo de sedimentos e as diferentes vazões interagindo com obstáculos

Os fluxos de sedimentos ( $q$ ) representam o produto entre a velocidade média da corrente no ponto de medição e gravidade reduzida da corrente ensaiada. Desta forma, o comportamento linear deste parâmetro em relação ao número de Froude densimétrico é esperado devido a interdependência dos fatores, mas ainda sim, é possível verificar a sua influência nas correntes de turbidez.

O fluxo de sedimentos revela ser um indicador do comportamento das correntes de turbidez com as condições topográficas. Uma vez que os obstáculos se configuram como controladores do escoamento, pois possuem a capacidade de bloquear parcialmente ou totalmente a corrente de turbidez.

A figura 58 apresenta o desenvolvimento do fluxo de sedimentos ( $q$ ) nos cenários testados, agrupado pelas vazões Q<sub>1</sub>, Q<sub>2</sub> e Q<sub>3</sub>, e comparando entre as condições topográficas.

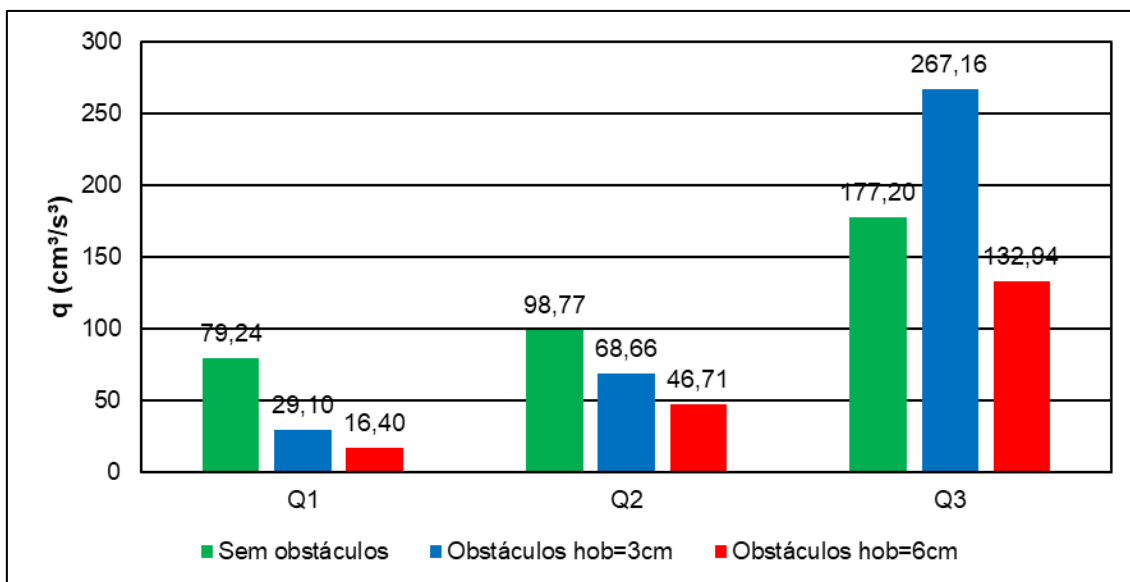


Figura 58 – Relação estabelecida entre fluxo de sedimentos e o número de Froude para as diferentes vazões.

A figura 58 mostra que, para as maiores vazões ( $Q_2$  e  $Q_3$ ), ocorrem os maiores valores de fluxo de sedimentos, ou seja, mais sedimentos foram transportados. A presença de obstáculos afeta o fluxo de sedimentos principalmente para os experimentos com obstáculos de 6 cm de altura (série 3).

Outro tipo de análise inclui a velocidade máxima do perfil de velocidade de cada corrente de turbidez sendo relacionada com o fluxo sedimentar, obtendo comportamentos aproximadamente logarítmicos destes parâmetros (FARIZAN et al., 2019).

A figura 59 apresenta as relações entre as condições topográficas sem obstáculos, com obstáculos de 3 cm e 6 cm de altura.

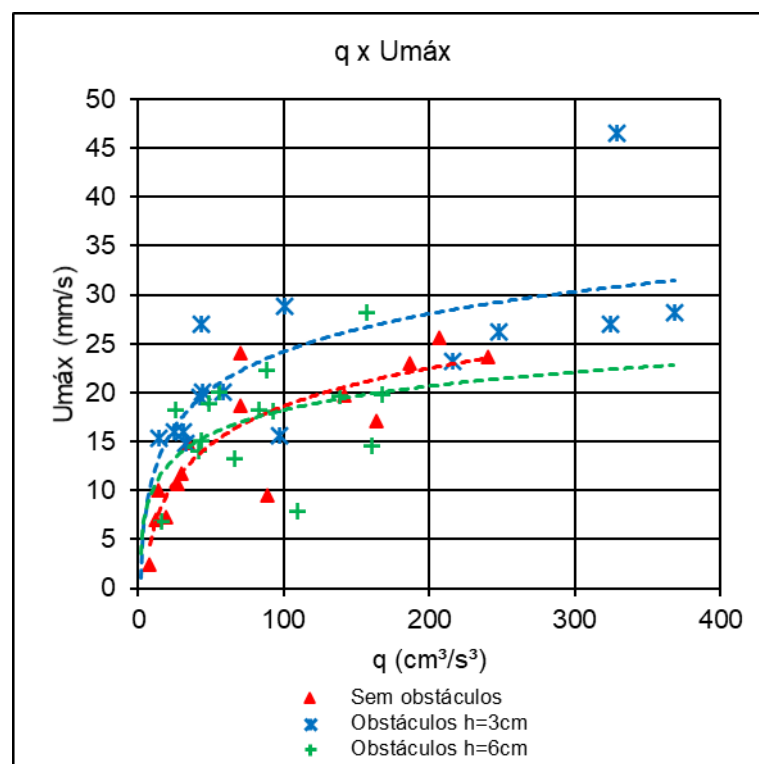


Figura 59 – Fluxo sedimentar relacionado com a velocidade máxima do perfil de velocidades das correntes de turbidez.

Conforme Farizan et al. (2019), o fluxo sedimentar é fortemente alterado pela presença de obstáculos no leito de escoamento das correntes de turbidez. Esta interação das correntes de turbidez com obstáculos de 6 cm de altura apresentou menor crescimento da relação fluxo sedimentar por velocidade máxima, uma vez que parte considerável da corrente pode ter sido interceptada ou foi refletida como onda de translação. Já as correntes de turbidez que escoaram em canais sem obstáculos e com obstáculos de 3 cm de altura, ou

seja, com menos resistência ao escoamento, apresentaram os maiores crescimentos da relação  $q \times U_{\text{máxima}}$ .

### **6.3. A influência dos obstáculos na deposição de correntes de turbidez**

A deposição das partículas das correntes de turbidez, em condições controladas de laboratório, segue um padrão de afinamento gradual de grão, no qual as partículas mais grossas são depositadas em regiões proximais da injeção do fluxo e as mais finas nas regiões distais da origem. No entanto, na existência de obstáculos topográficos, este padrão de afinamento gradual pode sofrer alterações, resultando na retenção de partículas, na seleção dos grãos e também na alteração das proporções (BURSIK e WOODS, 2000; KNELLER e BUCKEE, 2000; MANICA, 2008; YAGHOUBI et al., 2017; FARIZAN et al., 2019).

#### **6.3.1. Diâmetro médio adimensionalizado como indicador de alterações na deposição de partículas de correntes de turbidez**

Conforme dados apresentados no capítulo 5, tanto a mediana do diâmetro ( $D_{50}$ ) quanto a média dos diâmetros ( $D_{\text{médio}}$ ) se apresentam como indicadores da distribuição granulométrica do depósito ao longo do comprimento do canal. Porém o diâmetro médio consegue agregar mais informações de outros percentis, como, por exemplo, o  $D_{25}$  e  $D_{75}$ , no seu cálculo.

Assim, pode-se verificar que nos experimentos os resultados brutos apresentados pelo  $D_{\text{médio}}$  foram mais detalhados do que o do  $D_{50}$ . Portanto, através do uso dos parâmetros adimensionais do  $D_{\text{médio}}$  é possível estabelecer a caracterização das diferenças dos depósitos entre os trechos do canal antes, depois e entre os obstáculos.

Os diâmetros adimensionalizados dos trechos antes, depois e entre obstáculos é estabelecido pelas médias do  $D_{\text{médio}}$  nos respectivos segmentos. Estes parâmetros auxiliam a corroborar no entendimento de como estas partículas são afetadas pelas condições de escoamento (vazão) e topografia. Desse modo, a partir da média dos diâmetros destes segmentos do canal foram realizados dois tipos de análises, uma a partir da equação 13 (considerando apenas a comparação entre antes e após os obstáculos) e outra da equação 16 (considerando também o segmento entre os obstáculos).

A figura 60 apresenta o gráfico de variação do  $D_{\text{médio}}$  adimensional. Este parâmetro abrange todo o depósito das correntes de turbidez testadas, em diferentes condições topográficas e vazões.

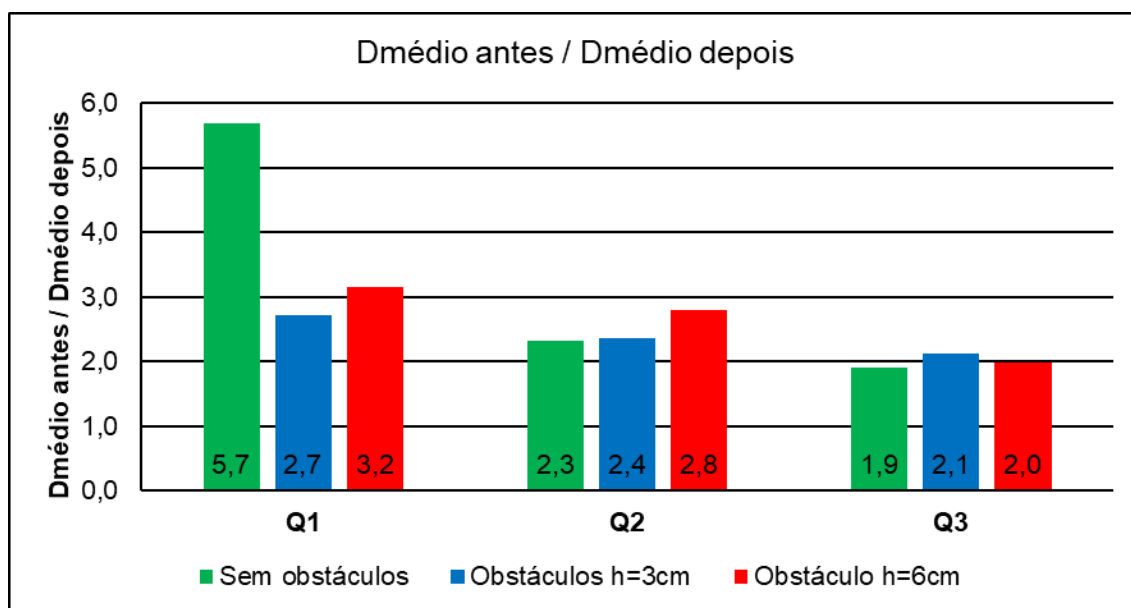


Figura 60 - Diagrama de relações entre os diâmetros adimensionais e o número de Froude densimétrico.

A figura 60 apresenta uma redução gradual da relação proposta entre  $D_{\text{médio}}$  antes e depois dos obstáculos. Quanto maior o valor desta relação, mais fino é o depósito depois dos obstáculos em relação ao trecho anterior aos mesmos. Neste entendimento, valida-se a percepção estabelecida pelos perfis de variação granulométrica dos depósitos (Figura 46 e 47) e perfis de proporções granulométricas dos depósitos (Figuras 48, 49 e 50).

A partir da figura 60, observa-se que na condição de vazão Q<sub>1</sub> a presença de obstáculos teve efeito na razão entre  $D_{\text{médio}}$  antes e depois dos obstáculos, sugerindo tanto uma redução nos valores do  $D_{\text{médio}}$  antes, quanto um possível aumento do  $D_{\text{médio}}$  depois. Neste cenário, entende-se que os obstáculos alteram a distribuição granulométrica dos grãos, causado provavelmente por reflexão de parte do fluxo de volta para montante, promovendo a deposição de partículas mais finas a montante dos obstáculos e alterando as proporções do depósito em todo o canal, conforme é relatado por Bursik e Woods (2000); Brunt et al. (2004); Farizan et al. (2019).

Os depósitos formados pelas correntes de turbidez das vazões Q<sub>2</sub> e Q<sub>3</sub> indicam, nesta relação da figura 60, que o incremento da vazão reduz a

capacidade de controle dos obstáculos em relação à vazão  $Q_1$ . Conforme a figura 60, para vazões maiores ocorre a redução da razão entre  $D_{\text{médio}}$  antes e depois dos obstáculos, sugerindo que tanto  $Q_2$  quanto  $Q_3$  são eficazes no transporte de sedimentos comparando os segmentos do canal antes e depois dos obstáculos.

Nesta perspectiva, é importante agregar à análise o comportamento do depósito entre os obstáculos. Sendo assim, toma-se este segmento entre os obstáculos como o divisor da diferença entre os segmentos antes e depois dos obstáculos, conforme é proposto pela equação 16.

A figura 61 apresenta o comportamento da diferença entre  $D_{\text{médio}}$  antes e depois dos obstáculos relacionado com o  $D_{\text{médio}}$  entre os obstáculos.

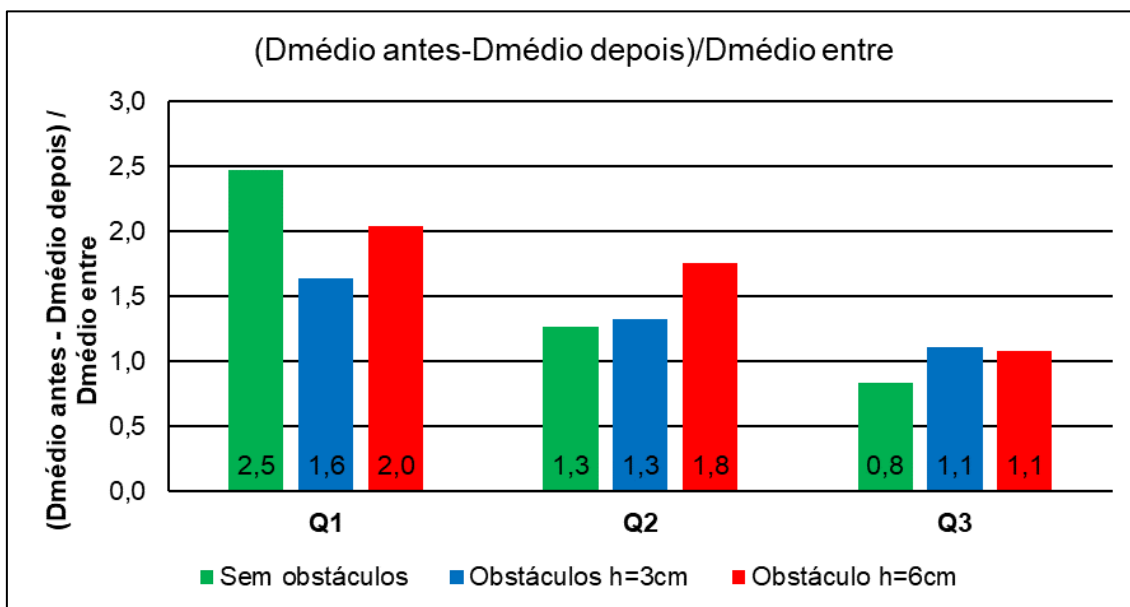


Figura 61 - Diagrama de relações entre o diâmetro médio adimensional e o número de Froude densimétrico

A figura 61 apresenta o comportamento deste parâmetro adimensional do  $D_{\text{médio}}$  ao longo do canal para cada vazão  $Q_1$ ,  $Q_2$  e  $Q_3$  e para as condições com e sem obstáculos. Nesta relação, quanto menor o  $D_{\text{médio}}$  entre os obstáculos, maior será o valor do parâmetro, potencializando a diferença entre o  $D_{\text{médio}}$  antes e depois dos obstáculos.

Em todas as condições topográficas (com e sem os obstáculos), percebe-se que o aumento da vazão reduz o valor deste parâmetro, o que indica que a granulometria do depósito se torna mais homogênea entre os trechos definidos (antes, depois e entre os obstáculos). Todas as vazões apresentaram a



capacidade de promover uma melhor uniformidade dos grãos ao longo do canal, uma vez que elas mobilizam os grãos maiores para mais longe, de mesmo modo que os obstáculos, ainda que retenham parte dessas partículas maiores, também refletem parte do fluxo e distribui as partículas mais finas entre as regiões do canal, conforme é encontrado também por Brunt et al. (2004); Kubo (2004).

### 6.3.2. Os obstáculos enquanto mecanismo de distribuição dos grãos depositados pelas correntes de turbidez

A interação das correntes de turbidez com feições topográficas do leito de escoamento resulta em comportamentos do fluxo como a retenção, o refluxo (quando em ambientes confinados por baixios ou entre obstáculos), ondas de translação. Todos estes efeitos mobilizam as partículas da corrente, possibilitando a sua deposição de partículas mais finas oriundas da recirculação na região a montante dos obstáculos (GARCIA e PARKER et al. 1989; ALEXANDER e MORRIS, 1994; FARIZAN et al., 2019).

Neste contexto, o grau de seleção de grão ( $\sigma_\phi$ ) pelo método de Folk e Ward (1957) pode dar um panorama do efeito de seleção dos grãos ocasionado pelos obstáculos. A tabela 10 apresenta o parâmetro  $\sigma_\phi$  dos depósitos dos experimentos.

Tabela 10 - Grau de seleção dos depósitos das correntes de turbidez em cada ensaio.

Ensaio	Obstáculos	Vazão (l/min)	$\sigma (\phi)$	Classificação
E1.1	Sem	5	1,59	Pobrememente selecionado
E1.2	Sem	10	0,90	Moderadamente selecionado
E1.3	Sem	25	0,99	Moderadamente selecionado
E2.1	h=3cm	5	1,11	Pobrememente selecionado
E2.2	h=3cm	10	1,04	Pobrememente selecionado
E2.3	h=3cm	25	1,17	Pobrememente selecionado
E3.1	h=6cm	5	1,32	Pobrememente selecionado
E3.2	h=6cm	10	1,26	Pobrememente selecionado
E3.3	h=6cm	25	1,30	Pobrememente selecionado

De acordo com a tabela 10, os depósitos dos ensaios controle, que tiveram o seu comportamento condicionado principalmente pela vazão, apresentou

maior grau de seleção para as vazões maiores ( $Q_2$  e  $Q_3$ ). Neste contexto, os obstáculos do leito de escoamento funcionam como um mecanismo de redistribuição das partículas transportadas pela corrente de turbidez, tornando o depósito pobremente selecionado. Esta redistribuição devido aos obstáculos se desenvolve ao longo de todo o depósito da corrente de turbidez, resultando na mudança de classificação do  $\sigma_\varphi$ .

## 7. CONCLUSÃO

O estudo de correntes de turbidez é fundamental para entender o desenvolvimento de fenômenos naturais em ambientes marinho, fluvial e lacustres. Assim, esta pesquisa buscou compreender, via modelagem física, o escoamento de correntes de turbidez escoando sobre obstáculos, submetida a diferentes condições de injeção e de topografia e os efeitos na distribuição de grãos depositados.

Os resultados apresentados, mostraram que, de fato, a presença de obstáculos no leito de escoamento altera o comportamento hidrodinâmico das correntes de turbidez e alteram a distribuição de grãos (tamanho) ao longo do comprimento.

Em termos hidrodinâmicos, os perfis verticais de velocidade indicam que, na zona entre obstáculos, eles modificam completamente sua estrutura típica, sofrendo deformações no seu formato. Estas deformações ocorrem de forma mais evidente entre os obstáculos de 6 cm de altura, indicando que a altura do obstáculo também controla essas alterações.

Por outro lado, ao se reduzir 50% a altura do obstáculo (3 cm) foi verificada que os perfis verticais de velocidade da corrente de turbidez desenvolveram um comportamento semelhante à condição sem obstáculos. Ou seja, este último obstáculo (3 cm de altura) não conferiu uma resistência ao fluxo que possibilitasse uma resposta hidrodinâmica significativa desta interação, devendo haver um valor limiar entre 3 e 6 cm que seria um divisor de mudança de comportamento.

Na perspectiva deposicional, a presença dos obstáculos (tanto de 3 cm quanto de 6 cm) foi capaz de causar um afinamento das partículas do depósito ao longo de todo o canal resultante da interação entre as correntes de turbidez e os obstáculos. Esta situação ocorre diferentemente da situação sem obstáculos, quando o depósito possui um segmento de montante, próximo da injeção, onde a maior proporção depositada é de partículas do tamanho de areias e um segmento distal composto por silte e argila.

Este afinamento da granulometria dos depósitos a montante dos obstáculos foi ocasionado pelo barramento (reflexão) da corrente devido a existência de uma zona de recirculação entre obstáculos topográficos. Além disso, a média e

a mediana dos diâmetros do depósito apresentaram uma tendência de afinamento na região compreendida entre os obstáculos, o que corrobora para o entendimento proposto por Yaghoubi et al. (2017) de que ocorre uma zona de menor energia entre os obstáculos, resultando na recirculação e deposição de partículas mais finas.

O material granular depositado demonstrou sofrer influência tanto da vazão de injeção, uma vez que vazões de maior magnitude são capazes de transportar partículas grossas para jusante. Já os obstáculos atuam na interceptação dessas partículas e também na reflexão e recirculação do fluxo. Neste processo, os sedimentos se depositam como resposta da interação entre a hidrodinâmica da corrente de turbidez e os obstáculos topográficos.

Uma vez que a abordagem experimental resultou relações adimensionais entre os diferentes parâmetros do fluxo, as correntes de turbidez apresentaram redução do número de Froude densimétrico na região entre obstáculos, e valores maiores antes e após os mesmos. Enquanto que relações lineares se construíram entre o número de Froude densimétrico e a velocidade máxima adimensional (agrupados pela topografia), além de o número de Froude densimétrico e o fluxo sedimentar (agrupados pela vazão).

No âmbito do grupo de pesquisa do Núcleo de Estudos em Correntes de Densidade (NECOD), esse estudo se consolida na construção do conhecimento acerca das correntes de turbidez e seu comportamento hidrodinâmico e deposicional. Uma vez que o trabalho foi pioneiro na perspectiva abordada através do uso de canal genérico com topografia genérica, se torna também uma nova referência dentro da realidade do grupo de pesquisa.

## **8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Sugere-se, como continuidade desse trabalho, a investigação do escoamento de correntes de turbidez com obstáculos em sequência que atue em novas abordagens na perspectiva da geometria dos obstáculos. Ou seja, ensaios com outras alturas de obstáculos, bem como outros espaçamentos entre obstáculos. Sendo possível avaliar mudanças nos comportamentos dos fenômenos, parâmetros e relações adimensionais.

Além disso, é recomendado testar em estudos futuros parâmetros hidrodinâmicos diferentes, como, por exemplo, testar novas concentrações, e novas vazões. Situação que permitiria compor um diagrama de comportamento para diferentes combinações de parâmetros. Podendo, inclusive, agregar com experimentos executados com correntes de densidade salinas, sem a presença de material particulado do carvão mineral.

Focando na análise estratigráfica em escala reduzida, sugere-se também a realização de ensaios experimentais sobrepostos com os obstáculos dispostos no leito do canal. Desse modo, a corrente de turbidez subsequente escoaria e se depositaria sobreposta ao depósito anterior, gerando uma sequência de deposições que interagiram com os obstáculos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALAVIAN, Vahid. Behavior of density currents on an incline. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 112, n. 1, p. 27-42, 1986.

ALAVIAN, Vahid et al. Density currents entering lakes and reservoirs. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 118, n. 11, p. 1464-1489, 1992.

ALTINAKAR, M. S.; GRAF, W. H.; HOPFINGER, E. J. Flow structure in turbidity currents. **Journal of Hydraulic Research**, v. 34, n. 5, p. 713-718, 1996.

ASGHARI PARI, S. A. et al. Effects of obstacle heights on controlling turbidity currents with different concentrations and discharges. **Journal of Food, Agriculture and Environment**, v. 8, p. 930-935, 2010.

BAINES, P. G. Topographic effects in stratified flows. **Oceanographic Literature Review**, v. 5, n. 43, p. 441, 1996.

BAAS, J. H; KESTEREN, W. V; POSTMA, G. Deposits of depletive high-density turbidity currents: a flume analogue of bed geometry, structure and texture. **Sedimentology**, v. 51, pp. 1053-188, 2004.

BURSIK, M. I.; WOODS, A. W. The effects of topography on sedimentation from particle-laden turbulent density currents. **Journal of Sedimentary Research**, v. 70, p. 53-63, 2000.

BRUNT, R. L; MCCAFFREY, W. D; KNELLER, B. C. Experimental modeling of the spatial distribution of grain size developed in a fill-and-spill mini-basin setting. **Journal of Sedimentary Research**, v. 74, pp. 438-446, 2004.

BAGNOLD, R. A. Auto-suspension of transported sediment: turbidity currents. **Proceedings of the Royal Society of London**, v. 265, pp. 315-319, 1962.

BOUMA, A. H. Turbidites. In: **Developments in sedimentology**. Elsevier, 1964. p. 247-256.

BOLLA PITALLUGA, M; IMRAN, J. A simple model for vertical profiles of velocity and suspended sediment concentration in straight and curved submarine channels. **Journal of Geophysical Research: Earth Surface**, v. 119, pp. 483-503, 2014.

BOFFO, C. et al. Complementary results on experimente-derived classification of submarine sediment gravity flows. **The American Association of Petroleum Geologists Annual Covention and Exhibition**. Houston, 2017. Disponível em: <<http://www.searchanddiscovery.com/abstracts/html/2017/90291ace/abstracts/2612157.html>> Acesso em: 31 de março de 2020.

BUFFON, P. **Modelagem física de uma região do fundo oceânico para entendimento dos padrões de preenchimento de minibacias por correntes de densidade**. 2014. 82p. Porto Alegre, RS (BR). Trabalho de Conclusão de

Curso, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2014.

CLARK, J. D; STANBROOK, D. A. Formation of large-scale shear structures during deposition from high-density turbidity currents, Grèsd'Annot Formation, south-east France. In: Particulate Gravity Currents. MCCAFFREY, W; KNELLER, B. C; PEAKALL, J. (Edit). **Special Publication of International Association of Sedimentologists**, v. 31, p. 219-231, 2001.

CARNEIRO, F. L. **Análise dimensional e teoria da semelhança e dos modelos físicos**. Editora UFRJ: Rio de Janeiro, 2ed, 1996. 256p.

CHRISTOFOLETTI, S. R; MORENO, M. N. Granulometria por difração a laser e sua relação com faciologia das rochas argilosas da Formação Corumbataí-SP. **Cerâmica**, v. 63, p. 303-310, 2017

CORREIA, M. A. A. C. S. **Escoamento de correntes de turbidez sobre múltiplos obstáculos**. 2012. 94p. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Ciência e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Portugal, 2012.

ELLISON, T. H; TURNER, S. J. Turbulent entrainment in stratified flows. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 6, pp. 423-448, 1959.

FARIZAN, A. et al. Effect of an obstacle on the depositional behaviour of turbidity currents. **Journal of Hydraulic Research**, v. 57, n. 1, p. 75-89, 2019.

FELIX, M. 2002. Flow structure of turbidity currents. **Sedimentology**, v. 49, p. 397-419.

FERNANDEZ, E. F; JUNIOR, O. A. P; PINHO, A. C. **Dicionário do petróleo em língua portuguesa: exploração e produção de petróleo e gás uma colaboração Brasil, Portugal e Angola**. Lixikon, 1ª ed, 656p. 2009.

FOLK, R. L.; WARD, W. C. Brazos River bar [Texas]; a study in the significance of grain size parameters. **Journal of Sedimentary Research**, v. 27, n. 1, p. 3-26, 1957.

GARCIA, M.; PARKER, G. Experiments on hydraulic jumps in turbidity currents near a canyon-fan transition. **Science**, v. 245, pp. 393–396, 1989.

GEE, M. J. R; MASSON, D. G; WATTS, A. B; MITCHELL, N. C. Passage of debris flows and turbidity currents through a topographic constriction: seafloor erosion and deflection of flow pathways. **Sedimentology**, v. 48, p.1389-1409, 2001.

HAUGHTON, P; DAVIS, C; MCCAFFREY, W; BAKER, S. Hybrid sediment gravity flow deposits: classification, origin and significance. **Marine and Petroleum Geology**, v. 26, p. 1900 – 1918, 2009.

HE, Y; XIE, X; KNELLER, B. C; WANG, Z; LI, X. Architecture and controlling factors of canyon fills on the shelf margin in the Qiongdongnan Basin, northern South China Sea. **Marine and Petroleum Geology**, v. 41, p. 264-276, 2013.

IDEL'CHIK, I. E. **Handbook of hydraulic resistance: coefficients of local resistance and of friction**. ERDA Div. Phys. Res., 1966. 525 p.

KUBO, Y. Experimental and numerical study of topographic effects on deposition from two-dimensional, particle-driven density currents. **Sedimentary Geology**, n. 164, pp. 311-326, 2004.

KNELLER, B.; EDWARDS, D.; MCCAFFREY, W.; MOORE, R. Oblique reflection of turbidity currents. **Geology**, v. 14, p. 250 – 252, 1991.

KNELLER, B. C; BRANNEY, M. J. Sustained high-density turbidity current and the deposition of thick massive sands. **Sedimentology**, v. 42, p. 607 – 6016, 1995.

KNELLER, B; BUCKEE, C. The structure and fluid mechanics of turbidity currents: a review of some recent studies and their geological implications. **Sedimentology**, v. 47, p. 62 – 94, 2000.

KOLLER, D. K. **Estudo experimental de formas de fundo gerada por correntes de densidade salina em canal de fundo móvel**. 2016. 133p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

LOWE, D. R. Sediment gravity flows: II. depositional models with special reference to the deposits of high-density turbidity currents. **Journal of Sedimentary Petrology**, v. 52, n. 1, p. 279-297, 1982.

MANICA, R. et al. Turbidity currents physical simulation in a small-scale modelo of large dimensions (Canyon almirante Câmara – Campos basin, Brazil): methodology and preliminary results. **The American Association of Petroleum Geologists Annual Covention and Exhibition**. Houston, 2006. Disponível em: <[www.searchanddiscovery.com/documents/2006/06088houston\\_abs/abstract/manica.htm](http://www.searchanddiscovery.com/documents/2006/06088houston_abs/abstract/manica.htm)> Acesso em: 17abril de 2020.

MANICA, R. **Geração de corrente de turbidez de alta densidade: condicionantes hidráulicos e deposicionais**. Porto Alegre, RS (BR). 2009. 426p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009.

MANICA, R. Sediment gravity flows: study based on experimental simulation. In: **Hydrodynamics – Natural Water Bodies**. SCHULZ, H.; LOBOSCO, R.; SIMOES, A. (Ed.). v. 1, p. 263-286, 2012.

MOTTA, V. F. **Curso de teoria da semelhança**. Edições UFRGS: Porto Alegre, 1972. 154p.

MORRIS, S. A; ALEXANDER, J. Changes in flow direction at a point caused by obstacles during passage of a density current. **Journal of Sedimentary Research**, v. 73, n. 4, p. 621-629, 2003.

MIDDLETON, G. V. Small-scale models of turbidity currents and the criterion for auto-suspension. **Journal of Sedimentary Petrology**, v. 36, p. 202-208, 1966a.



MIDDLETON, G. V; HAMPTON, M. A. Subaqueous sediment transport and deposition by sediment gravity flows. In: **Marine Sediment Transport and Environmental Management**. New York, Wiley, p. 197 – 218, 1973.

MIDDLETON, G. V. Sediment deposition from turbidity currents. **Annual Review of Earth Planet Science**, v. 21, pp. 89-114, 1993.

MULDER, T; ALEXANDER, J. The physical character of subaqueous sedimentary density flows and their deposits. **Sedimentology**, v. 48, p. 269 – 299, 2001a.

MULDER, T; ALEXANDER, J. Abrupt change in slope causes variation in the deposit thickness of concentrated particle-driven density currents. **Marine Geology**, v. 175, p. 221-235, 2001b.

MEIBURG, E; KNELLER, B. Turbidity currents and their deposits. **Annual Review of Fluid Mechanics**, v. 42, p. 135-156, 2009.

NASR-AZADANI, M; MEIBURG, E. Influence of seafloor topography on the depositional behavior of bi-disperse turbidity currents: a three-dimensional, depth-resolved numerical investigation. **Environment Fluid Mechanics**, v. 14, p. 319-342, 2014.

NASR-AZADANI, M; MEIBURG, E; KNELLER, B. C. Mixing dynamics of turbidity currents interacting with complex seafloor topography. **Environment Fluid Mechanics**, v. 18, p. 201-223, 2018.

OSHAGHI, M. R; AFSHIN, H; FIROOZABADI, B. Experimental investigation of the effect of obstacles on the behavior of turbidity currents. **Canadian Journal of Civil Engineering**, v. 40, p. 343–352, 2013.

POSTMA, G. Classification of sediment gravity-flows deposits based on flow conditions during sedimentation. **Geology**, v. 14, p. 291 – 294, 1986.

PIPER, D. J. W; NORMAK, W. R. Processes that initiate turbidity currents and their influence on turbidites: a marine geology perspective. **Journal of Sedimentary Research**, v. 79, p. 347 – 362, 2009.

PINET, P. R. **Fundamentos De Oceanografia**. Tradução: SANT'ANA, O. D. de; SANTOS, F. A. dos. 1ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2017. 429 p.

PARSON, J. D. et al. The mechanics of marine sediment gravity flows. **Continental Margin Sedimentation: from sediment transport to sequence stratigraphy**, v. 37, p. 275 – 334, 2007.

ROSSATO, R; ALVES, E. Experimental study of turbidity currents flow around obstacles. In: **Proc. 7th Int. Symp. on Stratified Flows, Rome, Italy**. 2011.

SYMONS, W. O. et al. A new model for turbidity current behavior based on integration of flow monitoring and precision coring in a submarine canyon. **Geology**, v. 45, n. 4, p. 367-370, 2017.

SHANMUGAM, G. The Bouma Sequence and the turbidite mind set. **Earth-Science Reviews**, v. 42, p. 201-229, 1997.

SALAHELDIN, T. M; IMRAN, J; CHAUDHRY, M. H; REED, C. Role of fine-grained sediment in turbidity current flow dynamics and resulting deposits. **Marine Geology**, v. 171, p. 21-38, 2000.

SEQUEIROS, O. E. et al. Characteristics of velocity and excess density profiles of saline underflows and turbidity currents flowing over a mobile bed. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 136, n. 7, p. 412-433, 2010.

SILVA, F. R. S. da. Modelagem física bidimensional de correntes de turbidez: análise sedimentológica de depósitos localizados em depressões topográficas isoladas em ambiente marinho. **Anais XXVI Salão de Iniciação Científica da UFRGS**. Porto Alegre, 2014. Disponível em: <[https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/113347/Resumo\\_35773.pdf?sequence=1](https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/113347/Resumo_35773.pdf?sequence=1)> Acesso em: 29 de março de 2020.

SIMPSON, J. E. A comparison between laboratory and atmospheric density currents. **Quarterly Journal of Royal Meteorological Society**, n. 95, p. 758-765, 1969.

SUMMER, E. J. et al. First direct measurements of hydraulic jumps in an active submarine density current. **Geophysical Research Letters**, v. 40, p. 5904-5908, 2013.

TALLING, P. J. et al. Subaqueous sediment density flows: depositional processes and deposit types. **Sedimentology**, v. 59, p. 1937-2003, 2012.

TALLING, P. J. Hybrid submarine flows comprising turbidity current and cohesive debris flow: deposits, theoretical and experimental analyses, and generalized models. **Geosphere**, v. 9, n. 3, pp. 1-28, 2013.

TOKYAY, T. et al. Gravity currents propagating over periodic arrays of blunt obstacles: effect of obstacle size. **Journal of Fluids and Structures**, v. 27, p. 798-806, 2011.

UDDEN, J. A. Mechanical composition of clastic sediments. **Bulletin of the Geological Society of America**, v. 25, n. 1, p. 655-744, 1914.

WENTWORTH, C. K. A scale of grade and class terms for clastic sediments. **The Journal of Geology**, v. 30, n. 5, p. 377-392, 1922.

WYNN, R. B. et al. The northwest African slope apron: a modern analogue for deep-water systems with complex seafloor topography. **Marine and Petroleum Geology**, v. 17, p. 253-265, 2000.

YAGHOUBI, S. et al. Experimental investigation of the effect of inlet concentration on the behavior of turbidity currents in the presence of two consecutive obstacles. **Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering**, v. 143, n. 2, p. 04016018-1-12, 2017.

YANG, T. et al. Genesis and depositional model of subaqueous sediment gravity-flow deposits in a lacustrine rift basin as exemplified by the Eocene Shahejie Formation in the Jiyang Depression, eastern China. **Marine and Petroleum Geology**, v. 102, p. 231-257, 2019.

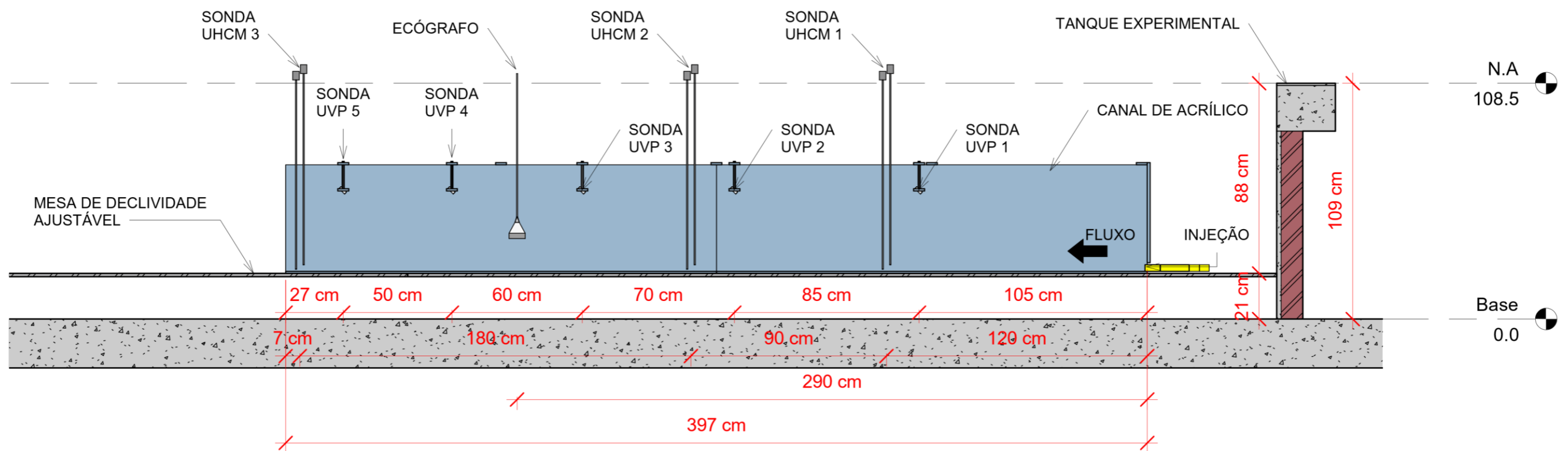
**ANEXOS**

**ANEXO I – CLASSES GRANULOMÉTRICAS (UDDEN, 1914; WENTWORTH,  
1922**

mm	micron $\mu\text{m}$	$\phi$	classe granulométrica	
1,00	1000	0	Arenito grosso	Areia
0,84				
0,71				
0,59				
0,50	500	1	Arenito médio	
0,42				
0,35				
0,30			Arenito fino	
0,25	250	2		
0,210				
0,177				
0,149			Arenito muito fino	
0,125	125	3		
0,105				
0,088				
0,074			Siltito grosso	Siltito
0,0625	62,5	4		
0,053	53	4,25		
0,044	44	4,50		
0,037	37	4,75		
0,031	3,1	5	Siltito médio	
0,0156	15,6	6	Siltito fino	
0,0078	7,8	7	Siltito muito fino	
0,0039	3,9	8	Argila	
0,0020	2,0	9		
0,00098	0,98	10		
0,00049	0,49	11		
0,00024	0,24	12		

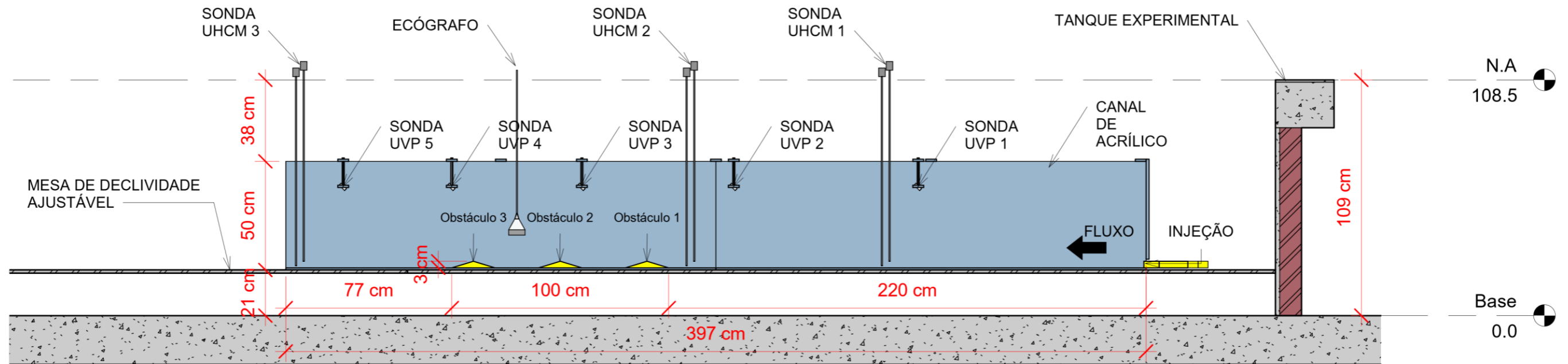
Figura 62 - Classificação granulométrica de Udden (1914) e Wentworth (1922)  
(CHRISTOFOLETTI e MORENO, 2017).

**ANEXO II – ESTRUTURA EXPERIMENTAL**



**1** Ensaio Série 1 (Controle)  
1 : 20

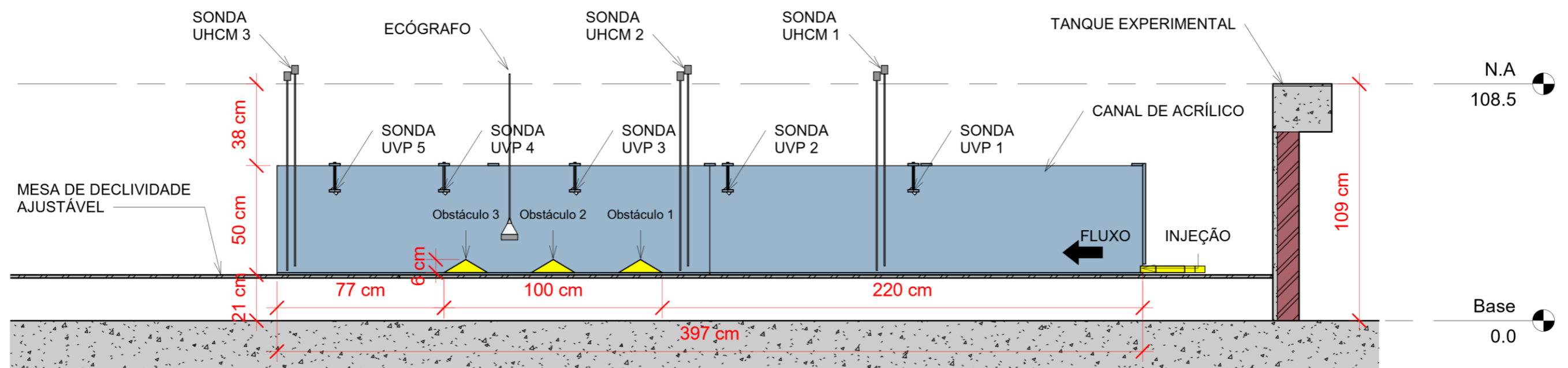
PROJETO:	Dissertação de Mestrado	FOLHA:	01
LOCAL:	Av. Bento Gonçalves, nº 9500, Agronomia, Porto Alegre, RS	REV.	
ASSUNTO:	Ensaio Série 1 (Controle)	ESCALA:	1 : 20
AUTOR DO PROJETO:	Arthur Costa Cerqueira	DESENHO:	Arthur Costa Cerqueira
		DATA:	10/03/2021



**1** Ensaio Série 2 (obstáculos h = 3cm)  
1 : 20

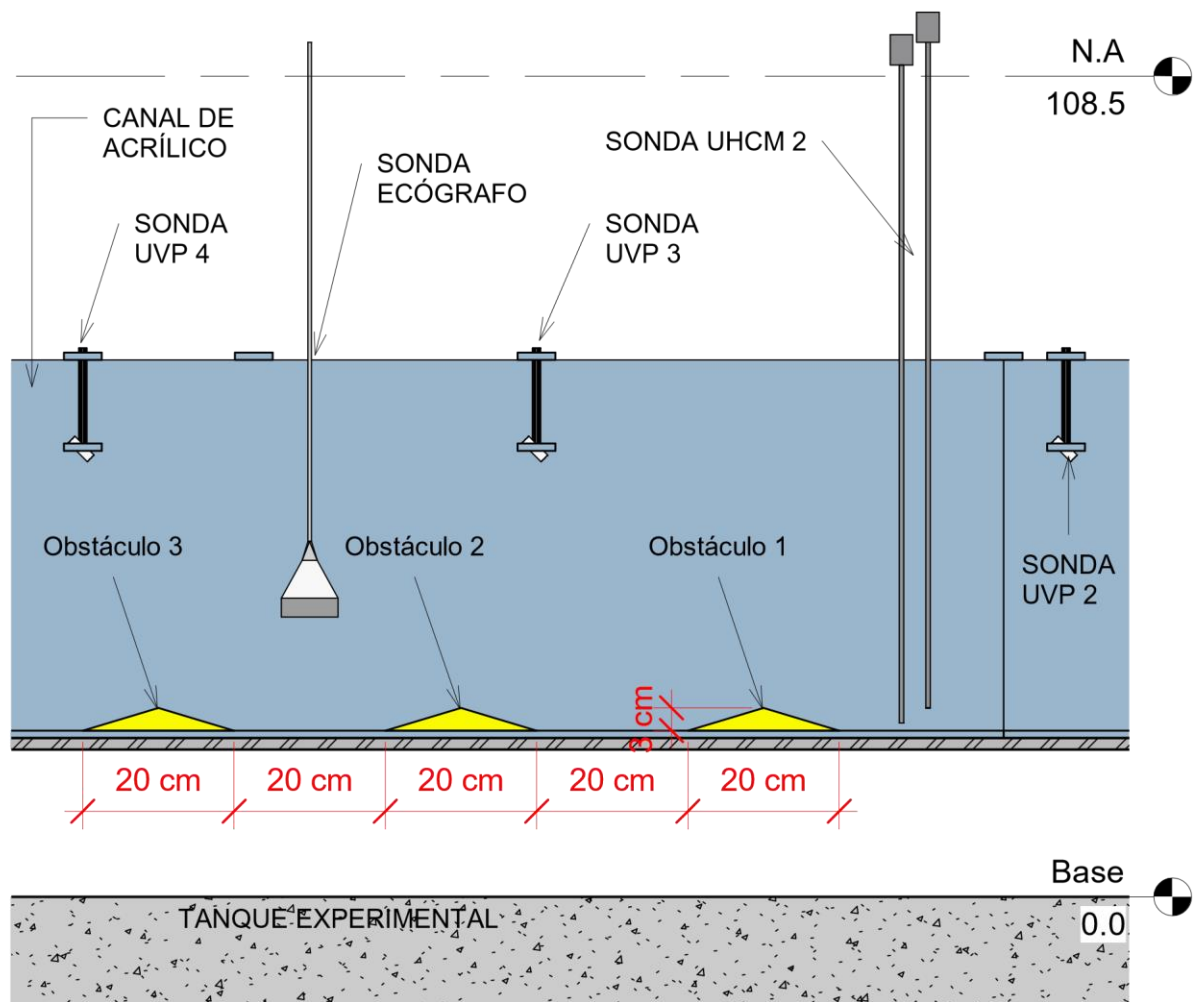
PROJETO:	Dissertação de Mestrado	FOLHA:	02
LOCAL:	Av. Bento Gonçalves, nº 9500, Agronomia, Porto Alegre, RS	REV.	
ASSUNTO:	Ensaio Série 2	ESCALA:	1 : 20
AUTOR DO PROJETO:	Arthur Costa Cerqueira	DATA:	10/03/21





**1** Ensaio Série 3 (obstáculos  $h = 6\text{cm}$ )  
1 : 20

PROJETO:	Dissertação de Mestrado	FOLHA:	
LOCAL:	Av. Bento Gonçalves, nº 9500, Agronomia, Porto Alegre, RS		<b>03</b>
ASSUNTO:	Ensaio Série 3	REV.	
AUTOR DO PROJETO:	Arthur Costa Cerqueira	ESCALA:	1 : 20
DESENHO:	Arthur Costa Cerqueira	DATA:	10/03/21



## 1 Detalhe dos obstáculos (h = 3cm)

1 : 10

PROJETO: Dissertação de Mestrado

FOLHA:

LOCAL: Av. Bento Gonçalves, nº 9500, Agronomia,  
Porto Alegre, RS

**04**

REV.

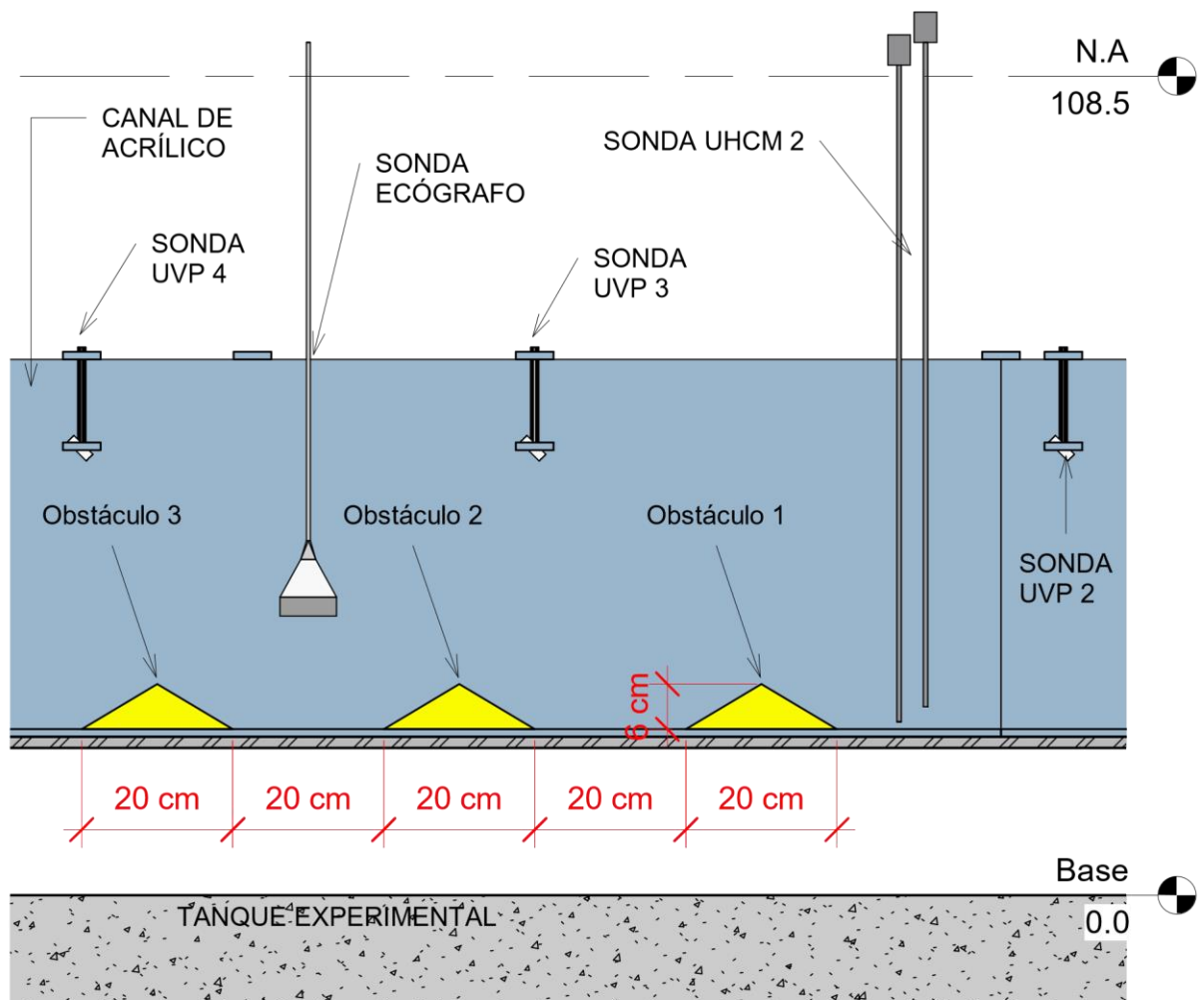
ASSUNTO: Detalhe Obstáculos (h = 3 cm)

ESCALA:  
1 : 10

AUTOR DO PROJETO:  
Arthur Costa Cerqueira

DESENHO:  
Arthur Costa Cerqueira

DATA:  
10/03/2021



## 1 Detalhe dos obstáculos (h = 6cm)

1

1 : 10

PROJETO: Dissertação de Mestrado

FOLHA:

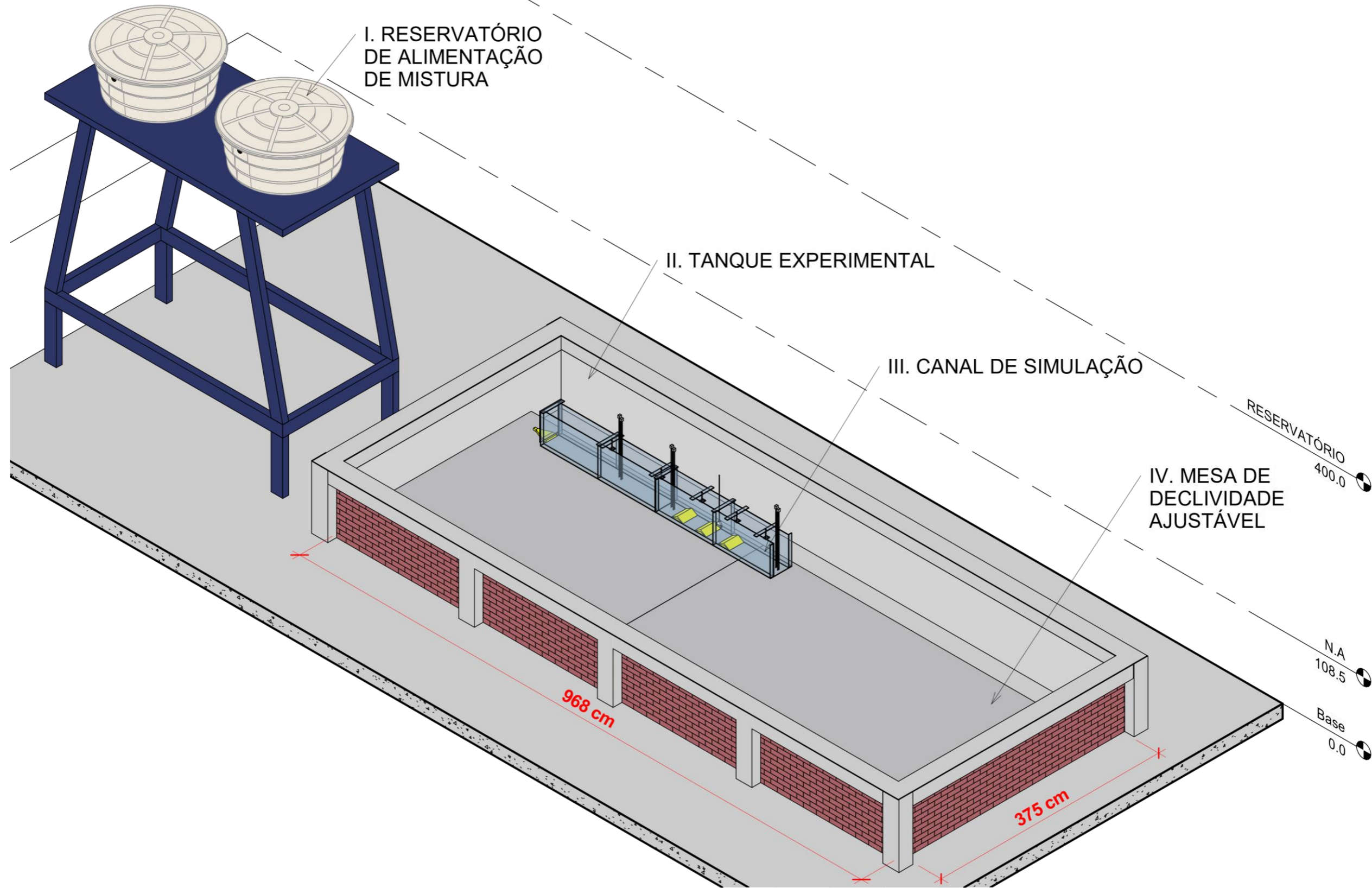
LOCAL: Av. Bento Gonçalves, nº 9500, Agronomia,  
Porto Alegre, RS

05

REV.

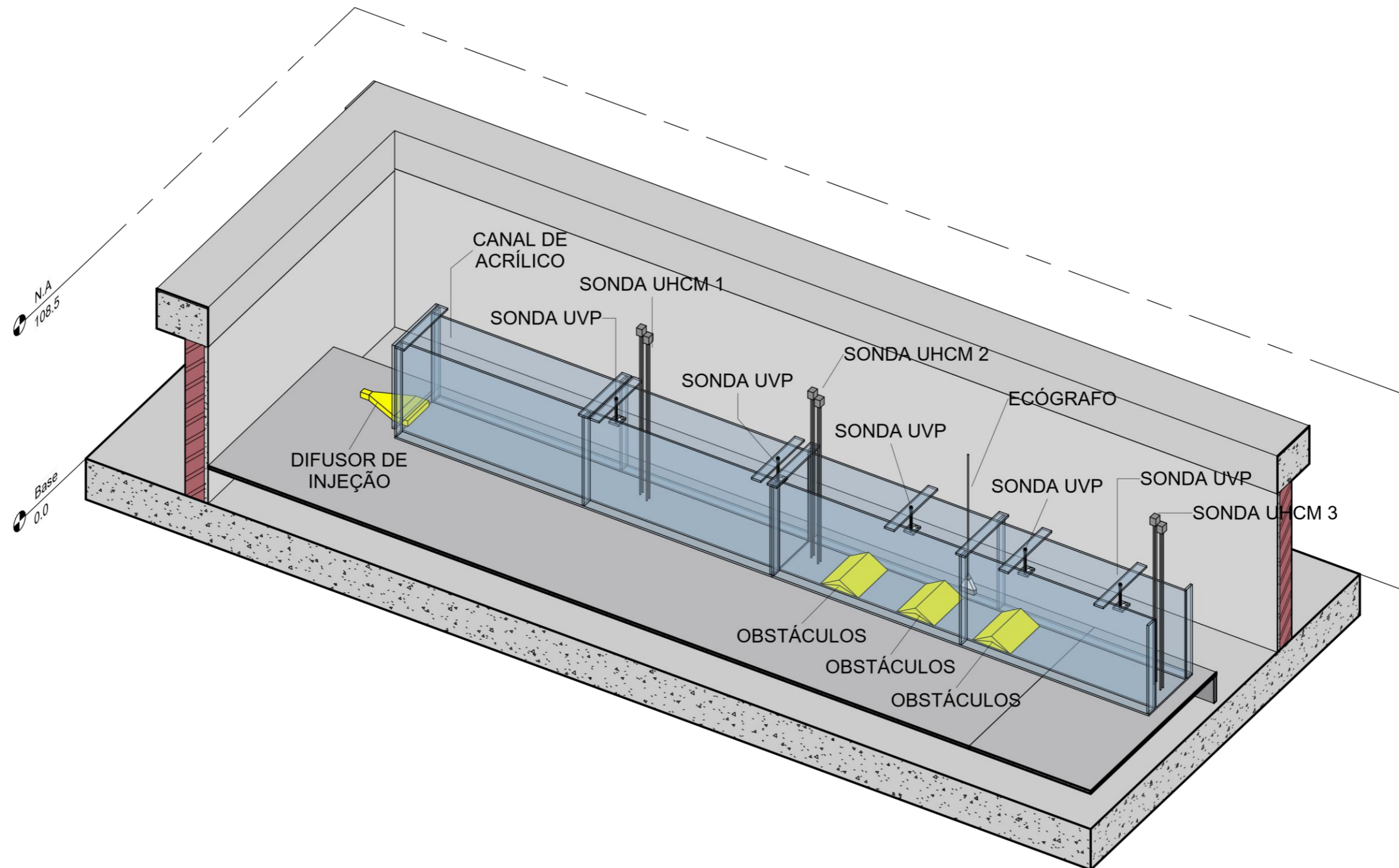
ASSUNTO: Detalhe Obstáculo (h = 6 cm)

ESCALA:  
1 : 10AUTOR DO PROJETO:  
Arthur Costa CerqueiraDESENHO:  
Arthur Costa CerqueiraDATA:  
10/03/21



1 3D - Geral

PROJETO:	Dissertação de Mestrado	FOLHA:	06
LOCAL:	Av. Bento Gonçalves, nº 9500, Agronomia, Porto Alegre, RS	REV.:	
ASSUNTO:	3D Geral	ESCALA:	
AUTOR DO PROJETO:	Arthur Costa Cerqueira	DESENHO:	Arthur Costa Cerqueira
		DATA:	10/03/21



1 3D - Canal

PROJETO: Dissertação de Mestrado

LOCAL: Av. Bento Gonçalves, nº 9500, Agronomia,  
Porto Alegre, RS

ASSUNTO: Isométrico aparato experimental

AUTOR DO PROJETO:  
Arthur Costa Cerqueira

DESENHO:  
Arthur Costa Cerqueira

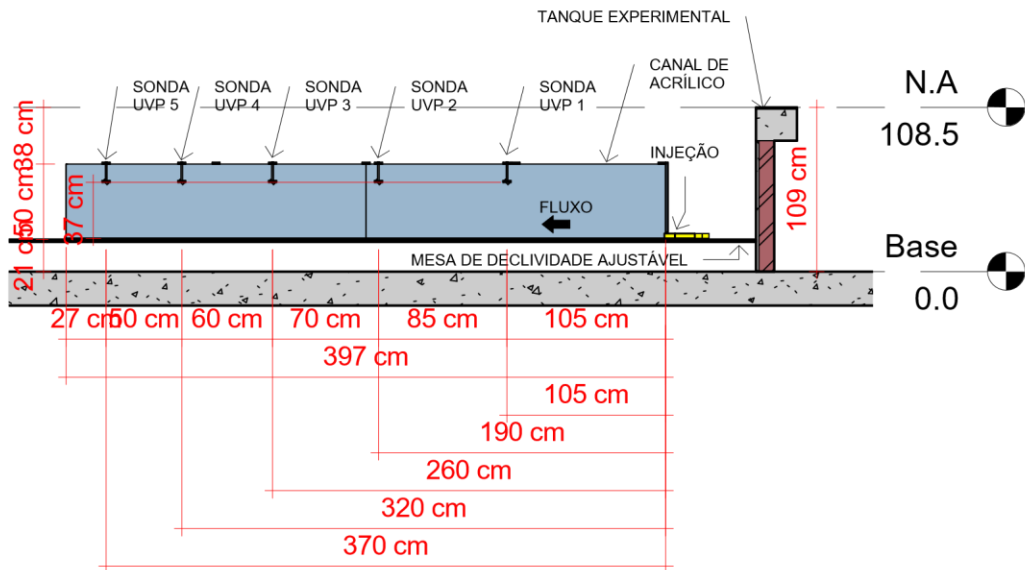
FOLHA:

07

REV.

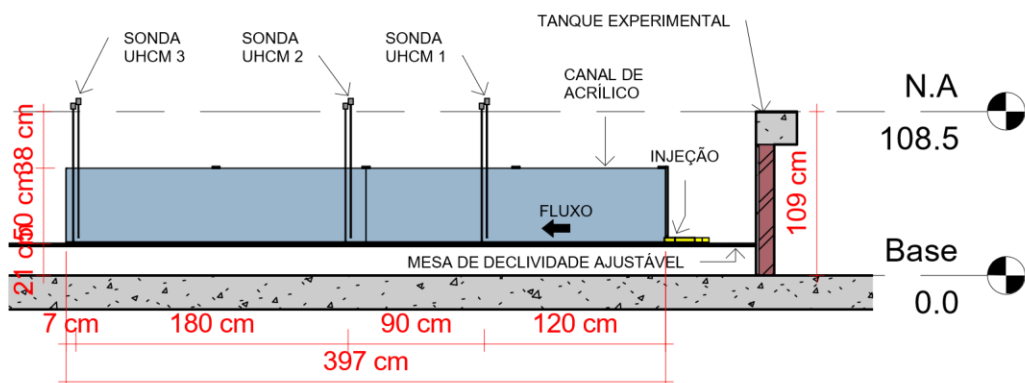
ESCALA:

DATA:  
12/10/21



## 1 Sondas UVP

1 : 50



## 2 Sondas UHCM

1 : 50

PROJETO: Dissertação de Mestrado

FOLHA:

LOCAL: Av. Bento Gonçalves, nº 9500, Agronomia,  
Porto Alegre, RS

**08**

REV.

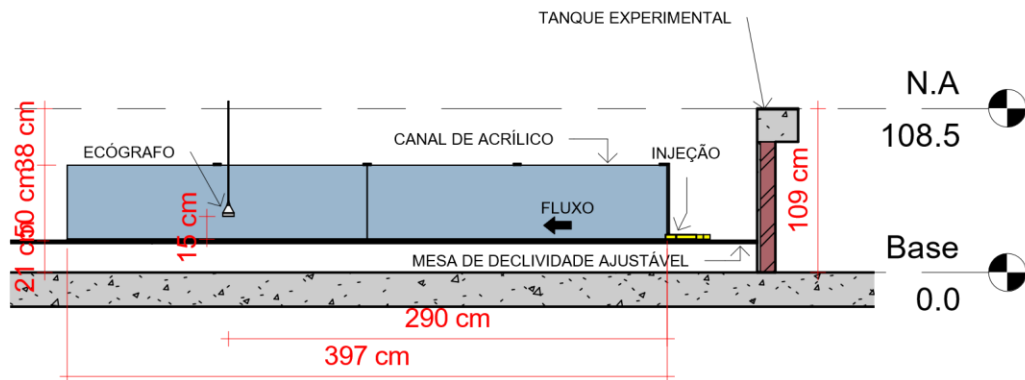
ASSUNTO: UVP e UHCM

ESCALA:  
1 : 50

AUTOR DO PROJETO:  
Arthur Costa Cerqueira

DESENHO:  
Arthur Costa Cerqueira

DATA:  
12/10/21



# 1 Sondas Ecógrafo

1 : 50

PROJETO: Dissertação de Mestrado

FOLHA:

LOCAL: Av. Bento Gonçalves, nº 9500, Agronomia,  
Porto Alegre, RS

**09**

REV.

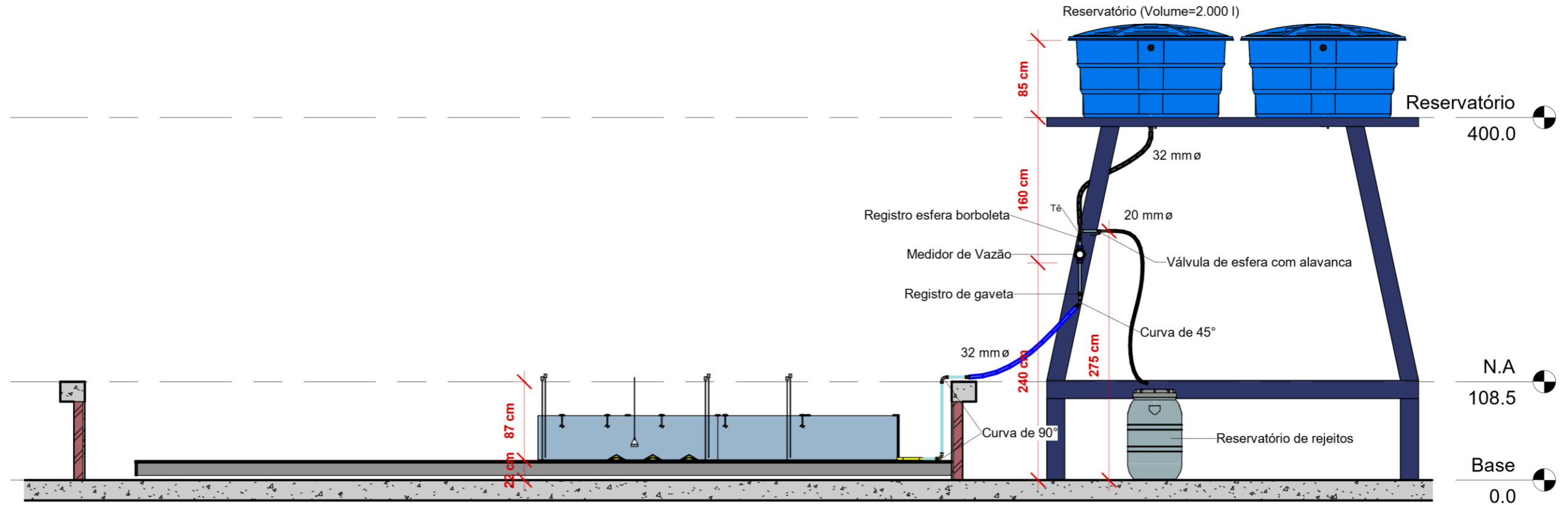
ASSUNTO: Ecógrafo e Vetrino

ESCALA:  
1 : 50

AUTOR DO PROJETO:  
Arthur Costa Cerqueira

DESENHO:  
Arthur Costa Cerqueira

DATA:  
12/10/21



**1** Elevação Frontal da Injeção de Corrente de Turbidez  
1 : 50

TABELA DE PEÇA HIDROSSANITÁRIA	
QUANTIDADE	DESCRIÇÃO
2	Reservatório Fibersul 2000l
2	Tampa de reservatório
2	Torneira Bóia para Caixa d'Água 1/2", Água Fria - TIGRE

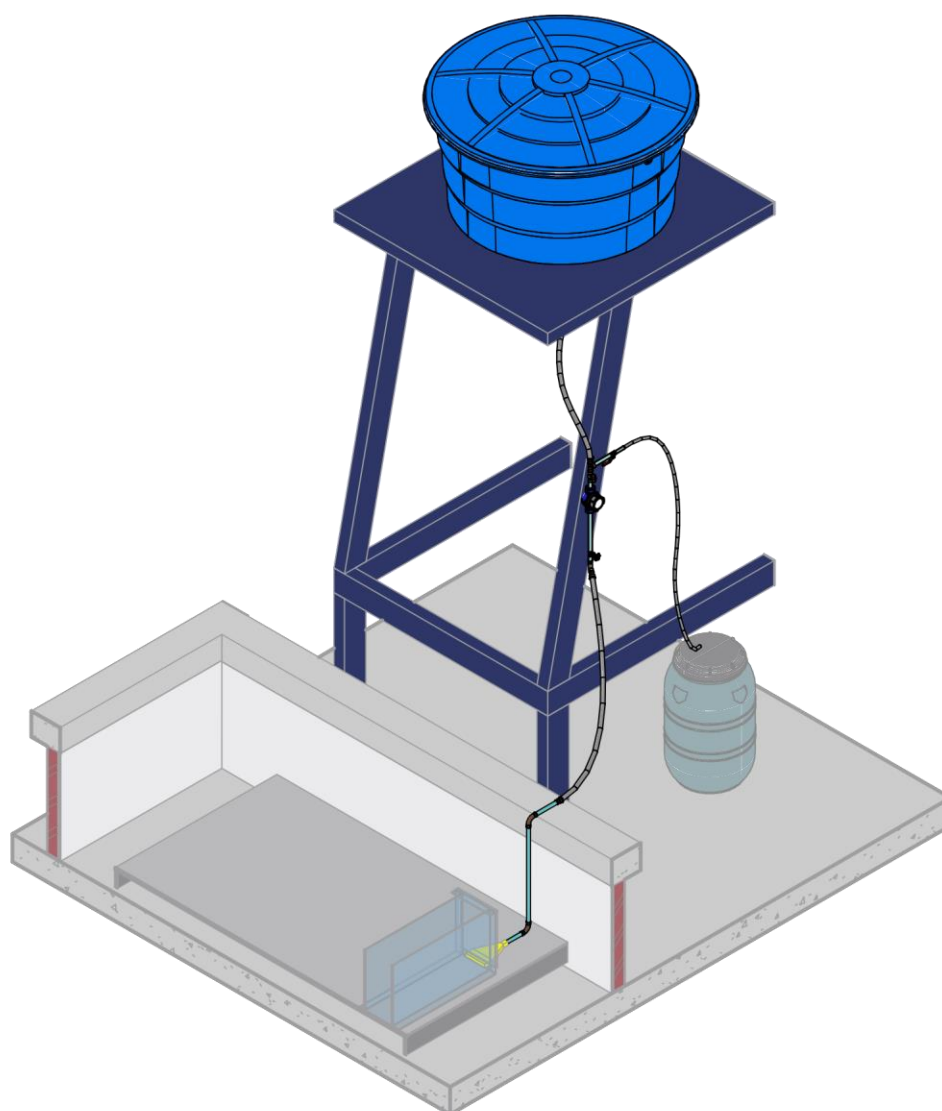
TABELA DE TUBULAÇÃO FLEXÍVEL	
COMPRIMENTO (cm)	DIÂMETRO
176.1	32 mm
206.1	20 mm
171.0	32 mm

TABELA DE TUBOS	
COMPRIMENTO (cm)	DIÂMETRO
PVC - Agua Fria - Tubo Soldável Tigre	
9.2	20 mm
195.9	25 mm
4.8	40 mm

TABELA DE CONEXÃO DE TUBO	
QUANTIDADE	DESCRIÇÃO
Água Fria	
5	Bucha de Redução Soldável Curta 25x20mm, PVC Marrom, Água Fria - TIGRE
1	Curva 45° ou 90° Soldável: O ângulo da conexão não corresponde a 90° ou 45°, verificar
2	Curva 90° Soldável 25mm, PVC Marrom, Água Fria - TIGRE
3	Luva de Redução Soldável 32x25mm, PVC Marrom, Água Fria - TIGRE
1	Luva de Redução Soldável 40x32mm, PVC Marrom, Água Fria - TIGRE
1	Tê Soldável com Rosca na Bolsa Central 25 x 3/4", PVC Marrom, Água Fria - TIGRE

PROJETO:	Dissertação de Mestrado	FOLHA:	10
LOCAL:	Av. Bento Gonçalves, 9500, Agronomia, Porto Alegre - RS	REV.	
ASSUNTO:	Vista Elevada do Sistema de Injeção	ESCALA:	1 : 50
AUTOR DO PROJETO:	Arthur Costa Cerqueira	DESENHO:	Arthur Costa Cerqueira
		DATA:	12/12/21





1

## Isométrico do Sistema de Injeção

PROJETO: Dissertação de Mestrado

FOLHA:

LOCAL: Av. Bento Gonçalves, 9500, Agronomia, Porto Alegre - RS

**11**

REV.

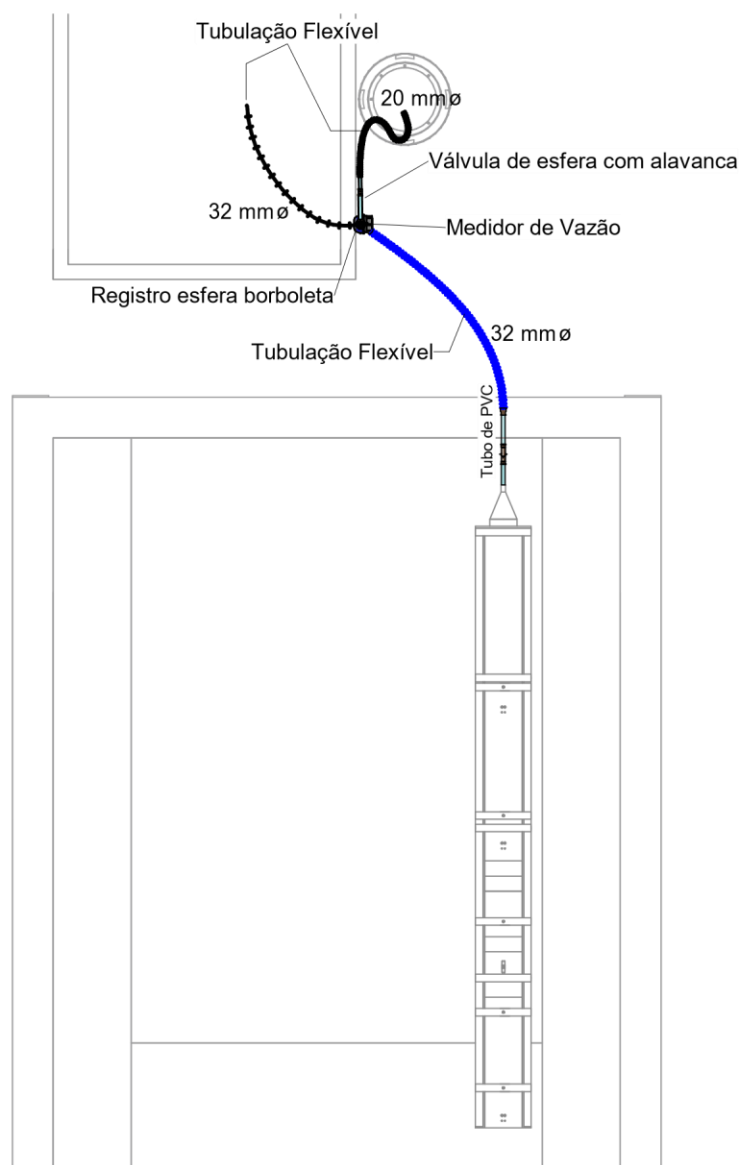
ASSUNTO: Isométrico do Sistema de Injeção

ESCALA:

AUTOR DO PROJETO:  
Arthur Costa Cerqueira

DESENHO:  
Arthur Costa Cerqueira

DATA:  
04/01/22



1

## Planta Baixa - Sistema de Injeção

1 : 50

PROJETO: Dissertação de Mestrado

FOLHA:

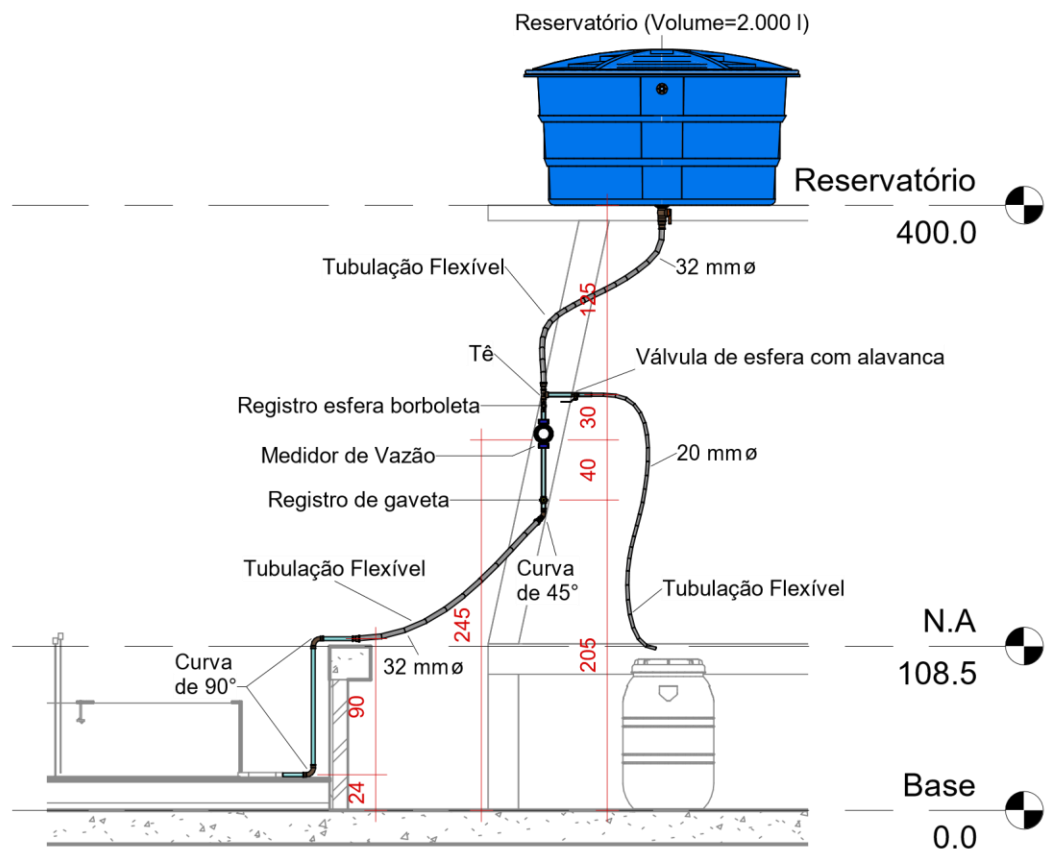
LOCAL: Av. Bento Gonçalves, 9500, Agronomia, Porto Alegre - RS

12

REV.

ASSUNTO: Planta Baixa do Sistema de Injeção

ESCALA:  
1 : 50AUTOR DO PROJETO:  
Arthur Costa CerqueiraDESENHO:  
Arthur Costa CerqueiraDATA:  
04/01/22



# 1 Elevação Frontal da Injeção

1 : 50

PROJETO: Dissertação de Mestrado

FOLHA:

LOCAL: Av. Bento Gonçalves, 9500, Agronomia, Porto Alegre - RS

**13**

REV.

ASSUNTO: Elevação Frontal da Injeção

ESCALA:

1 : 50

AUTOR DO PROJETO:

DESENHO:

DATA:

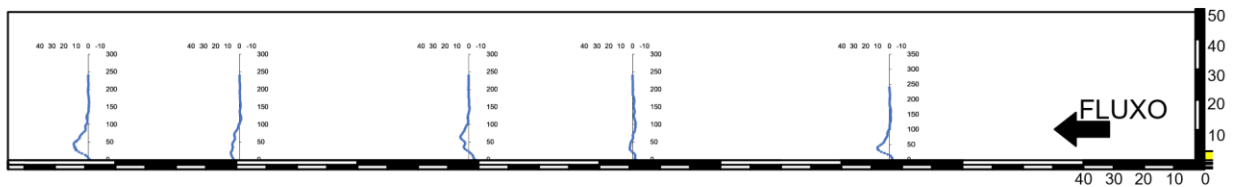
Arthur Costa Cerqueira

Arthur Costa Cerqueira

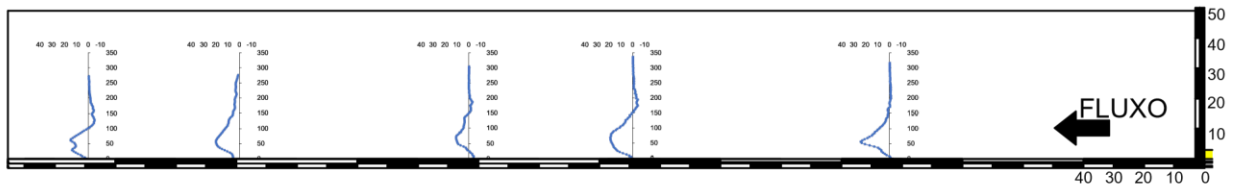
04/01/22

Ensaio E1.1 - sem obstáculos - Q1=5L/min

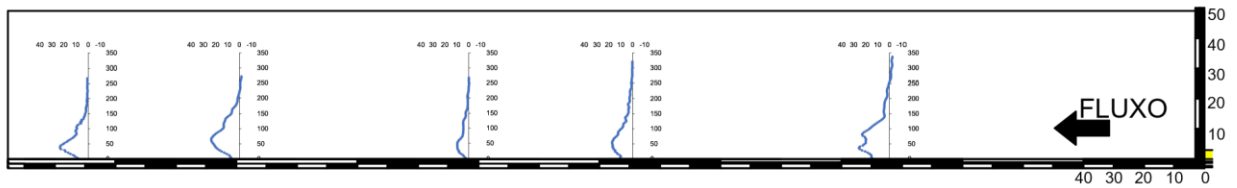
132



Ensaio E1.2 - sem obstáculos - Q2=10L/min



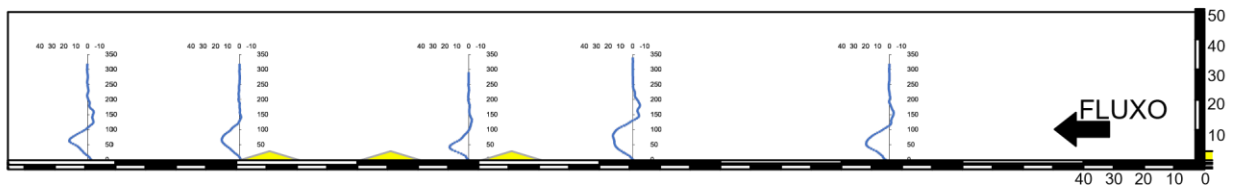
Ensaio E1.3 - sem obstáculos - Q3=25L/min



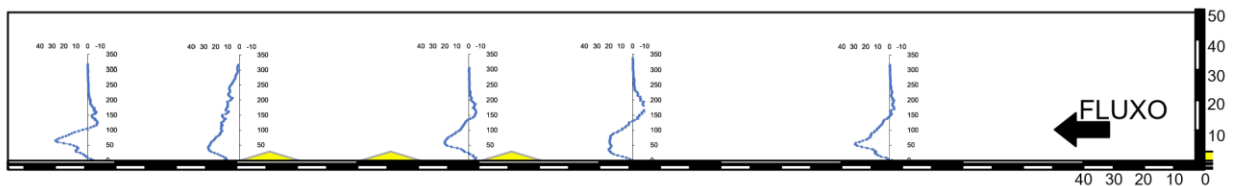
### 3 Perfil de Velocidade - Série 1

1 : 25

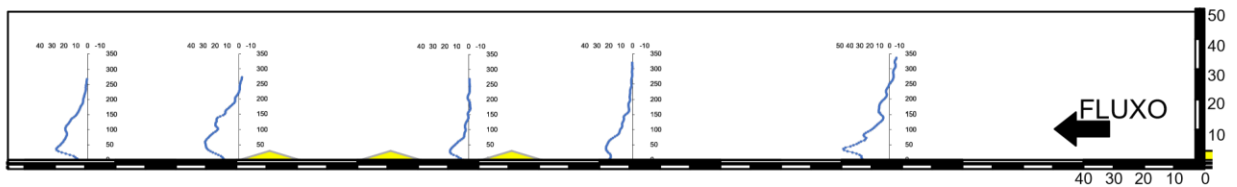
Ensaio E2.1 - obstáculos h=3cm - Q1=5L/min



Ensaio E2.2 - obstáculos h=3cm - Q2=10L/min



Ensaio E2.3 - obstáculos h=3cm - Q3=25L/min



### 6 Perfil de Velocidade - Série 2

1 : 25

PROJETO: Dissertação de Mestrado

FOLHA:

LOCAL: Av. Bento Gonçalves, nº 9500, Agronomia,  
Porto Alegre, RS

14

REV.

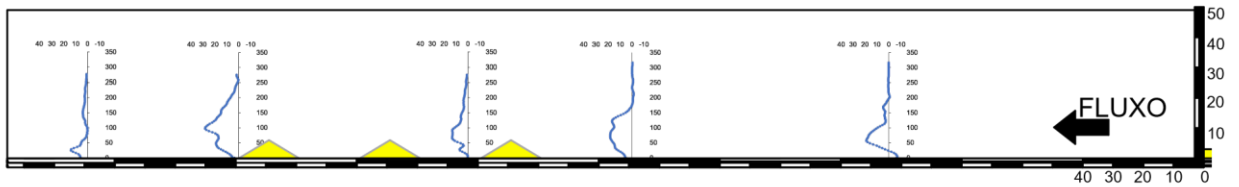
ASSUNTO: Perfis de Velocidade - Série 1 e 2

ESCALA:  
1 : 25

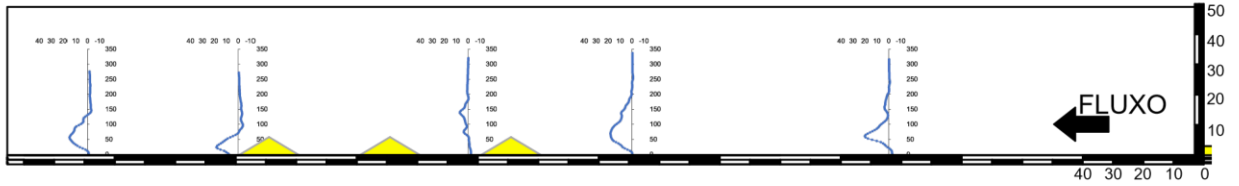
AUTOR DO PROJETO:  
Arthur Costa Cerqueira

DESENHO:  
Arthur Costa Cerqueira

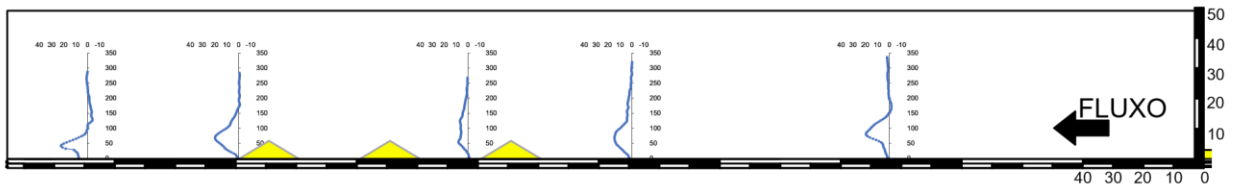
DATA:  
02/04/22



Ensaio E3.2 - obstáculos h=6cm - Q2=10L/min



Ensaio E3.3 - obstáculos h=3cm - Q3=25L/min



6

Perfil de Velocidade - Série 3

1 : 25

PROJETO: Dissertação de Mestrado

FOLHA:

LOCAL: Av. Bento Gonçalves, nº 9500, Agronomia,  
Porto Alegre, RS

15

REV.

ASSUNTO: Perfis de Velocidade - Séries 3

ESCALA:

1 : 25

AUTOR DO PROJETO:

Arthur Costa Cerqueira

DESENHO:

Arthur Costa Cerqueira

DATA:

04/01/2022