

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

TÚLIO MACHADO HUMBERTO GUIMARÃES

CARACTERIZAÇÃO HIDRODINÂMICA NA FORMAÇÃO DE LOBOS
TURBIDÍTICOS

PORTO ALEGRE

2024

TÚLIO MACHADO HUMBERTO GUIMARÃES

CARACTERIZAÇÃO HIDRODINÂMICA NA FORMAÇÃO DE LOBOS
TURBIDÍDICOS

Tese 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 doutor.

Orientador: Prof. Dr. Rafael Manica

PORTO ALEGRE

2024

CIP - Catalogação na Publicação

Guimarães, Túlio Machado Humberto
Caracterização hidrodinâmica na formação de lobos
turbidíticos / Túlio Machado Humberto Guimarães. --
2024.
234 f.
Orientador: Rafael Manica.

Tese (Doutorado) -- 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, 2024.

1. Correntes de densidade. 2. Correntes de
turbidez. 3. Fluxo gravitacional. 4. Lobos
turbidíticos. 5. Modelagem física. I. Manica, Rafael,
orient. II. Título.

TÚLIO MACHADO HUMBERTO GUIMARÃES

CARACTERIZAÇÃO HIDRODINÂMICA NA FORMAÇÃO DE LOBOS
TURBIDÍDICOS

Tese 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 doutor.

Aprovado em: Porto Alegre, 15 de dezembro de 2023

Prof. Dr. Rafael Manica – IPH UFRGS
Orientador

Dr.^a Débora Karine Koller – IPH UFRGS
Examinadora

Prof.^a Dr. – Pedro Antônio Roehe Reginato – IPH UFRGS
Examinadora

Dr. Juan Jose Fedele – ExxonMobil
Examinador

RESUMO

Um dos tipos de depósitos formados pelas correntes de densidade são os lobos turbidíticos, os quais podem abrigar reservas de hidrocarbonetos na natureza. Através da modelagem física, parâmetros responsáveis pela caracterização das correntes e dos depósitos podem ser reproduzidos em escala reduzida, sob condições controladas. Neste cenário, esse trabalho avaliou, através da simulação física, a caracterização hidrodinâmica na formação dos lobos turbidíticos por meio da variação dos parâmetros concentração, declividade do fundo e vazão. Para atingir tal objetivo, foram realizados 19 ensaios distribuídos em cinco etapas: sete ensaios para ajustes e testes, três com variação de vazão sem quebra de declividade, três com variação de vazão com quebra de declividade, três com variação de concentração e, três com variação de declividade do canal confinado com quebra de declividade. Os ensaios foram realizados em um tanque de geometria simplificada tridimensional, que conta com duas partes, uma confinada e outra desconfinada, de modo a representar uma configuração natural de um rio desembocando em um delta e atingindo a plataforma continental. Com a realização dos experimentos, classificou-se os ensaios realizados em oito modelos fluxo-depósito, com diferentes características morfológicas e hidrodinâmicas. Dois modelos foram oriundos de ensaios sem quebra de declividade, se destacaram principalmente pelo aumento da velocidade nas extremidades laterais à medida que a corrente de turbidez avançou para a jusante. Os demais modelos se diferenciaram sobretudo pela variação do alcance das partículas conforme houve variação de características da mistura injetada e, pela relevância da velocidade de expansão, frente a velocidade de avanço. Além disso, propõe-se uma adaptação da equação de Ganti, Lamb e McElroy (2014) para estimar do alcance longitudinal e transversal de diferentes frações granulométricas (areia grossa, areia média, areia fina, areia muito fina, silte grosso e silte médio) e, um diagrama que relaciona as características do fluxo (vazão, velocidade de cisalhamento e diâmetro médio do grão) para determinação do Fator de Forma do Depósito. Estas duas formas de estimar o alcance de diferentes frações granulométricas apresentaram precisão média superior a 75%. Com estes resultados foi aprimorada a caracterização hidrodinâmica da formação dos lobos turbidíticos, podendo ser extrapoladas as observações para ambientes naturais, quando associadas com dados sísmicos e de sondagem.

Palavras-chave: Correntes de densidade. Correntes de turbidez. Fluxos gravitacionais. Lobos turbidíticos. Modelagem física.

ABSTRACT

Turbidite lobes is one type of deposit formed by density currents, which may harbor hydrocarbon reserves. Parameters responsible for characterizing the currents hydrodynamic and deposit can be replicated on a reduced scale under controlled conditions. In this context, this study evaluated, through physical simulation, the hydrodynamic conditions involved in the formation of turbidite lobes by varying parameters such as concentration, bottom slope, and flow rate. Therefore, 19 experiments were conducted in five stages: seven trials for adjustments and tests, three with flow rate variation without slope break, three with flow rate variation with slope break, three with concentration variation, and three with confined channel slope variation with slope break. The experiments were carried out in a three-dimensional geometry tank, comprising a confined and an unconfined parts, to represent a natural river delta configuration reaching the continental shelf. Through the experiments, the conducted trials were classified into eight flow-deposit models, which developed different morphological and hydrodynamic characteristics. Two models resulted from experiments without slope break, primarily distinguished by the increased velocity at the lateral ends of the model as the turbidity current advanced downstream. The other models differed mainly in terms of the distance reached by the sediment particles related to the variation the injected mixture characteristics, and by the relation between the expansion velocity (laterally) and the advance velocity (longitudinally). Additionally, an adaptation of the Ganti, Lamb, and McElroy (2014) equation is proposed to estimate the longitudinal and transverse reach of different grain size fractions (coarse, medium, fine, and very fine sand, and coarse and medium silt), along with a diagram relating flow characteristics (flow rate, shear velocity, and mean grain diameter) for the determination of the form factor of the deposit. Both methods of estimating the reach distance of different grain size sediment fractions showed an average accuracy above 75%. These results contribute to the advancement of the state of the art on the hydrodynamic characterization of the flows responsible for generating turbidite lobe and allow the extrapolation of observations to natural environments when combined with seismic and drilling data.

Keywords: Density currents. Turbidity currents. Gravitational flows. Turbidite lobes. Physical modeling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Tipos de corrente de densidade.....	30
Figura 2 – Classificação de correntes de turbidez proposta por Manica	31
Figura 3 – Estrutura interna de uma corrente de densidade	32
Figura 4 – Perfil de velocidade e concentração em correntes de turbidez	33
Figura 5 – Desenvolvimento de uma corrente de densidade em ambiente natural...37	
Figura 6 – Desenvolvimento de uma corrente de densidade em escala reduzida e ilustração esquemática.....	37
Figura 7 – Exemplo de uma CLTZ na natureza.....	38
Figura 8 – Ressalto hidráulico	39
Figura 9 – Estágios da formação de um <i>knickpoint</i> , associado a colapsos retroativos – (a) imagens de ultrassom obtidas durante um experimento físico mostrando a evolução do perfil do talude; (b) perfil batimétrico para os diferentes momentos registrados.....	40
Figura 10 – Localização dos lobos em um sistema turbidítico	41
Figura 11 – Arquitetura de um complexo de lobos	42
Figura 12 – Tanque tridimensional de geometria simplificada.....	51
Figura 13 – Marcações realizadas nas chapas metálicas da parte desconfinada.....	52
Figura 14 – Representação tridimensional do tanque utilizado no ensaio	53
Figura 15 – Estrutura em que foi instalado os vectrinos utilizados nas etapas 1 e 2 do trabalho	53
Figura 16 – Estrutura em que foram instalados os transdutores	54
Figura 17 – Dimensões do difusor adotado.....	55
Figura 18 – Representação da peça utilizada para coletar amostras em diferentes alturas	58
Figura 19 – (A) Distribuição granulométrica acumulada e (B) histograma da distribuição granulométrica dos carvões disponíveis para os ensaios	62
Figura 20 – Acúmulo de depósito formado junto ao difusor quando utilizado carvão do tipo 205 e 210.....	63
Figura 21 – Estruturação dos ADVs nas etapas 1 e 2.....	64
Figura 22 – Estruturação dos transdutores de UVP utilizados nas etapas 3, 4 e 5...65	
Figura 23 – Configuração dos equipamentos empregados nos ensaios das etapas 3, 4 e 5	66

Figura 24 – Posições em que foram realizados a leitura da velocidade utilizando o ADV na região desconfinada.....	67
Figura 25 – Posições em que foram realizados a leitura da velocidade utilizando o UVP na região desconfinada.....	68
Figura 26 – Posições em que foram realizadas coletas da amostra da corrente de turbidez em diferentes alturas	69
Figura 27 – Representação esquemática da nomenclatura adotada no quadriculado da região desconfinada	70
Figura 28 – Concentração volumétrica da mistura injetada no tanque ao longo do tempo	73
Figura 29 – Vazões medidas e médias	75
Figura 30 – Evolução da corrente no tempo	77
Figura 31 – Perfis verticais de velocidade média longitudinal (eixo X) do vectrino ...	81
Figura 32 - Perfis verticais de velocidade na direção longitudinal no eixo central da região desconfinada	83
Figura 33 - Velocidades médias no eixo central da região desconfinada, direção longitudinal (eixo X).....	88
Figura 34 - Perfis verticais de velocidade na direção longitudinal no eixo lateral, distante 100 cm do eixo central, da região desconfinada.....	92
Figura 35 - Velocidades médias eixo lateral, distante 100 cm do eixo central, direção longitudinal (eixo X).....	95
Figura 36 - Mapa de contorno da velocidade longitudinal média	98
Figura 37 - Perfis verticais de velocidade na direção transversal no eixo central da região desconfinada	101
Figura 38 – Linhas da tendência das velocidades médias no eixo central.....	104
Figura 39 - Perfis verticais de velocidade na direção transversal no eixo lateral, distante 100 cm do eixo central, da região desconfinada.....	107
Figura 40 - Velocidades médias eixo lateral, distante 100 cm do eixo central,	109
Figura 41 - Mapa de contorno da velocidade transversal média	111
Figura 42 - Relações entre as velocidades médias longitudinais e transversais ao longo da região desconfinada - eixo central longitudinal.....	114
Figura 43 – Relação entre as velocidades (longitudinais e transversais) e a vazão de injeção (Etapa 3)	115

Figura 44 – Relação entre as velocidades (longitudinais e transversais) e a concentração da mistura injetada (Etapa 4).....	117
Figura 45 – Relação entre as velocidades (longitudinais e transversais) e a inclinação do leito do trecho confinado (Etapa 5).....	118
Figura 46 – Relações das velocidades de avanço e de expansão (V_x/V_y) com os parâmetros que variaram ao longo das etapas 3, 4 e 5 (vazão para a Etapa 3, concentração para a Etapa 4 e, inclinação do trecho confinado para a Etapa 5)....	120
Figura 47 – Perfil vertical de concentração no eixo longitudinal central: Etapa 3 - variação da vazão com quebra de declividade entre o trecho confinado e desconfinado; Etapa 4 - variação da concentração da mistura injetada; Etapa 5 - variação da inclinação do fundo do trecho confinado.....	123
Figura 48 – Relação entre os resultados de concentração dos medidores A e C...	127
Figura 49 – Perfil vertical de concentração, no eixo longitudinal lateral, distante 100 cm do eixo longitudinal central: Etapa 3 - variação da vazão com quebra de declividade entre o trecho confinado e desconfinado; Etapa 4 - variação da concentração da mistura injetada; Etapa 5 - variação da inclinação do fundo do trecho confinado...	128
Figura 50 - Mapa de contorno da concentração média	131
Figura 51 - Mapa de contorno da concentração em diferentes alturas – EA 15.....	133
Figura 52 - Mapa de contorno da concentração em diferentes alturas – EA 30.....	133
Figura 53 - Mapa de contorno da concentração em diferentes alturas – EA 45/ EB 5/ EC 4	134
Figura 54 – Variação da concentração média ao longo do eixo longitudinal central – Etapa 3 (variação da vazão com quebra de declividade entre o trecho confinado e desconfinado).....	135
Figura 55 - Mapa de contorno da concentração em diferentes alturas – EB 1.....	137
Figura 56 - Mapa de contorno da concentração em diferentes alturas – EB 10.....	138
Figura 57 - Mapa de contorno da concentração em diferentes alturas – EB 15.....	138
Figura 58 – Variação da concentração média ao longo do eixo longitudinal central – Etapa 4.....	139
Figura 59 - Mapa de contorno da concentração em diferentes alturas – EC 2	141
Figura 60 - Mapa de contorno da concentração em diferentes alturas – EC 3	142
Figura 61 - Mapa de contorno da concentração em diferentes alturas – EC 5	142
Figura 62 - Variação da concentração média ao longo do eixo longitudinal central – Etapa 5.....	143

Figura 63 – Diagramas para estimar a concentração volumétrica a partir da: vazão de injeção (A); concentração volumétrica da mistura injetada (B); inclinação do leito do trecho confinado (C)	145
Figura 64 - Mapa de contorno do número de Froude densimétrico.....	146
Figura 65 - Variação do número de Froude densimétrico ao longo.....	149
Figura 66 - Mapa de contorno do número de Reynolds	150
Figura 67 - Registro fotográfico dos depósitos gerados: Etapa 2 - variação da vazão sem quebra de declividade entre o trecho confinado e desconfinado;.....	153
Figura 68 – Altura do depósito formado na região confinada	157
Figura 69 – Topografia do depósito formado na região desconfinada	159
Figura 70 – Diâmetro médio do depósito formado na região confinada – Etapa 2 (variação da vazão sem quebra de declividade	161
Figura 71 – Localização das linhas 7 e 10 e, das colunas C, G e K.....	165
Figura 72 – Mapa de contorno do diâmetro médio do depósito formado nos ensaios da Etapa 3: EA 15 ($Q_{injeção} = 15 \text{ L.min}^{-1}$); EA 30 ($Q_{injeção} = 30 \text{ L.min}^{-1}$); EA 45 ($Q_{injeção} = 45 \text{ L.min}^{-1}$).....	166
Figura 73 - Perfil de distribuição granulométrica ao longo da região desconfinada para os ensaios da Etapa 3 ($C_{volumétrica} = 5\%$; $I_{trecho\ confinado} = 4^{\circ}$; $I_{trecho\ desconfinado} = 0^{\circ}$)	167
Figura 74 – Diagrama de cerca: Etapa 3.....	169
Figura 75 – Mapa de contorno do diâmetro médio do depósito formado nos ensaios da Etapa 4: EB 1 ($C_{injeção} = 1\%$); EB 10 ($C_{injeção} = 10\%$); EB 15 ($C_{injeção} = 15\%$).....	170
Figura 76 - Perfil de distribuição granulométrica ao longo da região desconfinada para os ensaios da Etapa 4 ($Q_{injeção} = 45 \text{ L.min}^{-1}$; $I_{trecho\ confinado} = 4^{\circ}$; $I_{trecho\ desconfinado} = 0^{\circ}$)	172
Figura 77 – Diagrama de cerca: Etapa 4.....	174
Figura 78 – Mapa de contorno do diâmetro médio do depósito formado nos ensaios da Etapa 5: EC 2 ($I_{trecho\ confinado} = 2^{\circ}$); EC 3 ($I_{trecho\ confinado} = 3^{\circ}$); EC 5 ($I_{trecho\ confinado} = 5^{\circ}$)	175
Figura 79 - Perfil de distribuição granulométrica ao longo da região desconfinada para os ensaios da Etapa 5 ($Q_{injeção} = 45 \text{ L.min}^{-1}$; $C_v = 5\%$; $I_{trecho\ desconfinado} = 0^{\circ}$)	176
Figura 80 – Diagrama de cerca: Etapa 5.....	178
Figura 81 – Representação esquemática do comprimento e largura da corrente de turbidez em um determinado tempo (a) e do depósito (b).....	179
Figura 82 – Relação entre comprimento e largura da corrente de densidade.....	182
Figura 83 – Fator de forma da corrente de turbidez ao longo do tempo	184

Figura 84 – Relação entre coeficiente angular e o parâmetro variante de cada etapa	185
Figura 85 – Relação do FFC com os parâmetros variantes de cada etapa	187
Figura 86 - Modelo fluxo-depósito em situação em que não há quebra de declividade entre as zonas confinada e desconfinada	189
Figura 87 – Modelo fluxo-depósito em situação em que há quebra de declividade entre as zonas confinada e desconfinada	191
Figura 88 – Precisão da equação de Ganti, Lamb e McElroy (2014) para diferentes frações granulométricas	205
Figura 89 – Precisão da equação modificada de Ganti, Lamb e McElroy (2014) para diferentes frações granulométricas	207
Figura 90 – Relação entre as características hidrodinâmicas do fluxo e o fator de forma do depósito (FFD) para diferentes classes granulométricas	209
Figura 91 – Diagrama FFD para diferentes frações granulométricas em função das características do fluxo.....	209
Figura 92 - Diâmetro médio (a) e D_{50} (b) do depósito formado na região confinada	231

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Ensaios realizados e, parâmetros adotados	60
Tabela 2 – Diâmetros dos carvões disponíveis para ensaio	62
Tabela 3 – Concentrações volumétricas e desvio padrão ao longo do tempo	73
Tabela 4 – Vazões almejadas e médias ao longo do tempo e, desvio padrão.....	74
Tabela 5 – Velocidades máximas e média no vectrino 1	82
Tabela 6 – Velocidades máximas e médias na direção longitudinal no eixo central .	85
Tabela 7 – Velocidades máximas e médias na direção longitudinal no eixo lateral, distante 100 cm do eixo central,.....	94
Tabela 8 – Velocidades máximas e médias na direção transversal no eixo central	102
Tabela 9 – Velocidades máximas e médias na direção transversal no eixo lateral, distante 100 cm do eixo central,.....	108
Tabela 10 – Precisão da Equação 6	116
Tabela 11 – Precisão da Equação 7	117
Tabela 12 – Precisão da Equação 8	119
Tabela 13 – Precisão da Equação 9 (as células em verde são as que apresentaram resultado satisfatório e, as em vermelho, não satisfatório)	136
Tabela 14 – Precisão da Equação 10 (as células em verde são as que apresentaram resultado satisfatório e, as em vermelho, não satisfatório)	140
Tabela 15 – Precisão da Equação 11 (as células em verde são as que apresentaram resultado satisfatório e, as em vermelho, não satisfatório)	144
Tabela 16 – Variação do diâmetro médio ao longo da altura do depósito formado e volume de material sedimentado na região confinada	163
Tabela 17 – Medidas longitudinais e transversais da expansão da corrente de turbidez ao longo do tempo.....	180
Tabela 18 – Fator de forma da corrente	183
Tabela 19 – Escala granulométrica adotada	202
Tabela 20 – Alturas de sedimentação e velocidades médias do fluxo empregadas no cálculo do alcance da partícula	203
Tabela 21 – Alcance teórico de diferentes frações granulométricas nos ensaios realizados.....	203
Tabela 22 – Alcance medido de diferentes frações granulométricas nos ensaios realizados.....	204

Tabela 23 – Alturas de sedimentação e velocidades médias do fluxo empregadas no cálculo do alcance da partícula	208
Tabela 24 – Precisão do diagrama proposto em relação a equação de Ganti, Lamb e McElroy corrigia e, também, pelas medições obtidas no diagrama de cerca (as células em verde são as que apresentaram resultado satisfatório e, as em vermelho, não satisfatório).....	210
Tabela 25 – Precisão do diagrama proposto para determinação do FFD para diferentes frações granulométricas em função das características do fluxo, aplicado aos dados de Wilkin et al. (2023)	211
Tabela 26 – Valores de concentrações obtidas nos medidores A e C: Etapa 3 - variação da vazão com quebra de declividade entre o trecho confinado e desconfinado; Etapa 4 - variação da concentração da mistura injetada; Etapa 5 - variação da inclinação do fundo do trecho confinado.....	226

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Aparato experimental utilizado nos ensaios	57
Quadro 2 – Comparativo dos ensaios com baixa vazão (E10 e EA 15), com e sem presença de quebra de declividade entre as regiões confinada e desconfinada	193
Quadro 3 – Comparativo dos ensaios com alta vazão (E40 e EA 45), com e sem presença de quebra de declividade entre as regiões confinada e desconfinada	194
Quadro 4 – Comparativo dos ensaios com alta vazão, variado a concentração da mistura injetada (Etapa 4)	197
Quadro 5 – Comparativo dos ensaios com alta vazão, variado a inclinação do leito do trecho confinado (Etapa 5)	199

LISTA DE SÍMBOLOS

- a: Coeficiente angular;
- A_i : Alcance teórico da partícula (m);
- A_{ix} : Alcance teórico da partícula na direção longitudinal ao fluxo (m);
- A_{iy} : Alcance teórico da partícula na direção transversal ao fluxo (m);
- A_{ix-m} : Alcance medido do sedimento na direção longitudinal ao fluxo (m);
- A_{iy-m} : Alcance medido do sedimento na direção transversal ao fluxo (m);
- b: Base exponencial;
- C: Comprimento do depósito ou de expansão da corrente de turbidez (cm);
- $C_{almejada}$: Concentração volumétrica calculada antes da realização dos ensaios (%);
- $C_{H = "A"}$: Concentração volumétrica na altura "A" em relação ao leito (%);
- $C_{injeção}$: Concentração volumétrica da mistura injetada (%);
- $C_{média}$: Concentração volumétrica média (%);
- C_v : Concentração volumétrica (%);
- d: Diâmetro dos grãos (μm);
- D: Distância em relação ao início do desconfinamento (cm);
- $D_{areia\ média}$: Diâmetro da areia média ($2,5 \cdot 10^{-4}$ m);
- $D_{areia\ muito\ fina}$: Diâmetro da areia muito fina ($6,25 \cdot 10^{-5}$ m);
- $D_{médio}$: Diâmetro médio (μm);
- $D_{referência}$: Diâmetro de referência para ajuste da equação do alcance dos grãos (m);
- D_{10} : Diâmetro máximo apresentado por 10% das partículas (μm);
- D_{50} : Diâmetro máximo apresentado por 50% das partículas (μm);
- D_{90} : Diâmetro máximo apresentado por 90% das partículas (μm);
- f_i : Coeficiente de perda de carga na superfície superior (adimensional);
- f_o : Coeficiente de perda de carga na superfície inferior (adimensional);
- $F_{r,d}$: Número de Froude densimétrico (adimensional);
- g: Aceleração da gravidade ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$);
- g' : Aceleração da gravidade reduzida ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$);
- h_a : Altura da lâmina d'água (m);
- h_c : Altura da corrente (m);
- I: Declividade de fundo (% ou m/m);
- $I_{\text{trecho confinado}}$: Declividade do leito da região confinada (% ou $\text{m} \cdot \text{m}^{-1}$);
- $I_{\text{trecho desconfinado}}$: Declividade do leito da região desconfinada (% ou $\text{m} \cdot \text{m}^{-1}$);
- K: Coeficiente de ajuste (adimensional);

K_c : Constante de Von Kàrman (0,41);

L : Largura do depósito ou de expansão da corrente de turbidez (cm);

Med_A : Medidas de concentração volumétricas realizadas pelo medidor A (direita);

Med_C : Medidas de concentração volumétricas realizadas pelo medidor C (esquerda);

$Q_{almejada}$: Vazão da mistura almejada para o ensaio ($L \cdot min^{-1}$);

$Q_{injeção}$: Vazão teórica da injeção da mistura ($L \cdot min^{-1}$);

$Q_{média\ medida}$: Vazão média da mistura injetada durante o ensaio ($L \cdot min^{-1}$);

R : Densidade submersa do sedimento;

R^2 : Coeficiente de determinação (adimensional);

Re_y : Número Reynolds (adimensional);

T : Tempo (s);

u_c : Velocidade da corrente de turbidez ($m \cdot s^{-1}$);

u_x : Velocidade média da corrente de turbidez na direção longitudinal ($m \cdot s^{-1}$);

u_y : Velocidade média da corrente de turbidez na direção transversal ($m \cdot s^{-1}$);

u^* : Velocidade de cisalhamento ($m \cdot s^{-1}$);

$V_{máxima}$: Velocidade máxima da corrente de turbidez ($cm \cdot s^{-1}$);

$V_{média}$: Velocidade média da corrente de turbidez ($cm \cdot s^{-1}$);

$V_{máx\ "A"}$: Velocidade máxima da corrente de turbidez na abscissa "A" ($cm \cdot s^{-1}$);

$V_{méd\ "A"}$: Velocidade média da corrente de turbidez na abscissa "A" ($cm \cdot s^{-1}$);

$V_{méd-X}$: Velocidade média de avanço da corrente de turbidez ($cm \cdot s^{-1}$);

$V_{méd-Y}$: Velocidade média de expansão da corrente de turbidez ($cm \cdot s^{-1}$);

V_x : Velocidade longitudinal / de avanço ($cm \cdot s^{-1}$);

V_y : Velocidade transversal/ de expansão ($cm \cdot s^{-1}$);

w_s : Velocidade de queda ($m \cdot s^{-1}$);

z : Cota vertical de elevação (m);

z_0 : Cota vertical onde as velocidades são nulas (m);

ρ_f : Massa específica da corrente de turbidez (mistura) ($kg \cdot m^{-3}$);

ρ_w : Massa específica do fluido ambiente ($kg \cdot m^{-3}$);

ρ_{w1} e ρ_{w2} : Massas específicas de estratificação do fluido ambiente ($kg \cdot m^{-3}$);

$\Delta\rho$: Diferença entre a massa específica do fluido ambiente e a da mistura ($kg \cdot m^{-3}$);

σ : Coeficiente de uniformidade (adimensional);

ϑ_c : Viscosidade cinemática da corrente de densidade ($m^2 \cdot s^{-1}$).

LISTA DE ABREVIATURAS

ADV: *Acoustic Doppler Velocimetry*;

CLTZ: *Channel Lobe Transition Zones*;

E10: Ensaio com vazão de injeção de 10 L.min⁻¹, concentração volumétrica da mistura injetada de 5%, declividade do leito do trecho confinado de 4° e declividade do trecho desconfinado de 4° – Etapa 2;

E30: Ensaio com vazão de injeção de 30 L.min⁻¹, concentração volumétrica da mistura injetada de 5%, declividade do leito do trecho confinado de 4° e declividade do trecho desconfinado de 4° – Etapa 2;

E40: Ensaio com vazão de injeção de 40 L.min⁻¹, concentração volumétrica da mistura injetada de 5%, declividade do leito do trecho confinado de 4° e declividade do trecho desconfinado de 4° – Etapa 2;

EA 15: Ensaio com vazão de injeção de 15 L.min⁻¹, concentração volumétrica da mistura injetada de 5%, declividade do leito do trecho confinado de 4° e declividade do trecho desconfinado de 0° – Etapa 3;

EA 30: Ensaio com vazão de injeção de 30 L.min⁻¹, concentração volumétrica da mistura injetada de 5%, declividade do leito do trecho confinado de 4° e declividade do trecho desconfinado de 0° – Etapa 3;

EA 45/ EB 1/ EC 4: Ensaio com vazão de injeção de 45 L.min⁻¹, concentração volumétrica da mistura injetada de 5%, declividade do leito do trecho confinado de 4° e declividade do trecho desconfinado de 0° – Etapa 3, 4 e 5;

EB 1: Ensaio com vazão de injeção de 45 L.min⁻¹, concentração volumétrica da mistura injetada de 1%, declividade do leito do trecho confinado de 4° e declividade do trecho desconfinado de 0° – Etapa 4;

EB 10: Ensaio com vazão de injeção de 45 L.min⁻¹, concentração volumétrica da mistura injetada de 10%, declividade do leito do trecho confinado de 4° e declividade do trecho desconfinado de 0° – Etapa 4;

EB 15: Ensaio com vazão de injeção de 45 L.min⁻¹, concentração volumétrica da mistura injetada de 15%, declividade do leito do trecho confinado de 4° e declividade do trecho desconfinado de 0° – Etapa 4;

EC 2: Ensaio com vazão de injeção de 45 L.min⁻¹, concentração volumétrica da mistura injetada de 5%, declividade do leito do trecho confinado de 2° e declividade do trecho desconfinado de 0° – Etapa 5;

EC 3: Ensaio com vazão de injeção de $45 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$, concentração volumétrica da mistura injetada de 5%, declividade do leito do trecho confinado de 3° e declividade do trecho desconfinado de 0° – Etapa 5;

EC 5: Ensaio com vazão de injeção de $45 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$, concentração volumétrica da mistura injetada de 5%, declividade do leito do trecho confinado de 5° e declividade do trecho desconfinado de 0° – Etapa 5;

FFC: Fator de forma da corrente de turbidez;

FFD: Fator de forma do depósito;

IPH: Instituto de Pesquisa Hidráulicas;

NECOD: Núcleo de Estudo de Correntes de Densidade;

PVC: Policloreto de vinil;

SR: Carvão sem rótulo;

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul;

UHCM: *Ultra-High Concentration Meter*;

UVP: *Ultrasonic Doppler Velocity Profiler*;

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
2	JUSTIFICATIVA	24
3	HIPÓTESE DO TRABALHO	26
4	OBJETIVOS	27
4.1	OBJETIVO GERAL.....	27
4.2	OBJETIVO ESPECÍFICO	27
5	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	28
5.1	CORRENTE DE DENSIDADE.....	28
5.1.1	Conceito	28
5.1.2	Classificação	29
5.1.3	Anatomia da corrente	31
5.1.4	Perfil de velocidade e concentração	32
5.1.5	Parâmetros que interferem nas correntes de turbidez	33
5.2	PERCURSO DE UMA CORRENTE DE DENSIDADE.....	36
5.2.1	Vales/ canais marinhos	36
5.2.2	Zona de transição canais – lobos (<i>Channel Lobe Transition Zones - CLTZ</i>) 38	
5.3	LOBOS TURBIDÍTICOS	41
5.4	PESQUISAS COM CORRENTES DE DENSIDADE	43
5.4.1	Estudos de corrente de densidade	43
5.4.2	Estudos de corrente de densidade realizados no NECOD	45
5.4.3	Balço dos estudos de corrente de densidade	49
6	APARATO EXPERIMENTAL E EQUIPAMENTOS	51
6.1	INSTALAÇÕES FÍSICAS E CONFIGURAÇÃO DO TANQUE	51
6.2	EQUIPAMENTOS UTILIZADOS.....	55
7	MATERIAIS E MÉTODOS	60
7.1	ENSAIOS REALIZADOS	60
7.2	MATERIAL UTILIZADO NA MISTURA DE INJEÇÃO.....	61
7.3	METODOLOGIA EXPERIMENTAL: PRÉ-ENSAIO	63
7.4	METODOLOGIA DOS ENSAIOS	66
7.5	METODOLOGIA EXPERIMENTAL: PÓS-ENSAIO	69
7.6	AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DO DEPÓSITO.....	71
8	RESULTADOS E OBSERVAÇÕES	72

8.1	CONCENTRAÇÃO DA MISTURA INJETADA AO LONGO DO TEMPO.....	72
8.2	VAZÃO MEDIDA DA MISTURA INJETADA	74
8.3	EVOLUÇÃO DA CORRENTE NO TEMPO.....	76
8.4	VELOCIDADE MÉDIA NA DIREÇÃO X – PERFIL LONGITUDINAL.....	80
8.4.1	Velocidade de avanço (direção longitudinal) do trecho confinado.....	80
8.4.2	Velocidade de avanço (direção longitudinal) do trecho desconfinado .	82
8.5	VELOCIDADE MÉDIA NA DIREÇÃO Y – PERFIL TRANSVERSAL.....	99
8.6	CONCENTRAÇÃO DA CORRENTE DE TURBIDEZ	120
8.6.1	Concentração da corrente de turbidez ao longo da vertical.....	132
8.7	NÚMERO DE FROUDE DENSIMÉTRICO	145
8.8	NÚMERO DE REYNOLDS	149
8.9	REGISTRO FOTOGRÁFICO DO DEPÓSITO FORMADO.....	151
8.10	TOPOGRAFIA DO DEPÓSITO FORMADO	156
8.10.1	Topografia da região confinada	156
8.10.2	Topografia da região desconfinada	157
8.11	GRANULOMETRIA DO DEPÓSITO FORMADO	159
8.11.1	Análise granulométrica do depósito da região confinada	160
8.11.2	Análise granulométrica do depósito da região desconfinada.....	165
8.12	FATOR DE FORMA DO AVANÇO DA CORRENTE E DO DEPÓSITO.....	179
9	AVANÇO NO ESTADO DA ARTE.....	188
9.1	MODELOS DE FLUXO-DEPÓSITO DOS LOBOS TURBIDÍDICOS.....	188
9.2	DETERMINAÇÃO DO ALCANCE (LONGITUDINAL E TRANSVERSAL) DE DIFERENTES FRAÇÕES GRANULOMÉTRICAS E FATOR DE FORMA.....	201
10	CONCLUSÃO.....	212
11	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	214
APÊNDICE A – RESULTADO DO ENSAIO DE GRANULOMETRIA DOS CARVÕES 205, 210 E SEM RÓTULO		
		222
APÊNDICE B – DIMENSIONAMENTO DA MISTURA		
		224
APÊNDICE C – VALORES DE CONCENTRAÇÃO DOS MEDIDORES A E C		
		226
APÊNDICE D – DIÂMETRO MÉDIO E D₅₀ DO DEPÓSITO FORMADO NA REGIÃO CONFINADA.....		
		231

1 INTRODUÇÃO

Quando uma mistura de sedimento com água atinge um outro meio líquido, com diferente massa específica, há formação de correntes de densidade, também chamadas correntes de turbidez. Na natureza essa mistura inicial de sedimento com líquido pode estar relacionada a um aporte fluvial ou à desestabilização e/ou colapso de sedimentos no fundo de reservatórios, mares ou oceanos. Dependendo da duração e magnitude das correntes de turbidez, estas percorrem as encostas/ taludes junto ao leito, em direção ao fundo destes corpos da água, apresentando alto poder erosivo. Não é raro encontrar correntes de turbidez com duração que variam de minutos a semanas (AZPIROZ-ZABALA et al., 2017) e com velocidades próximas a 18 m.s^{-1} , além de percorrer distâncias superiores a 100 km antes de ocorrer a sedimentação total das partículas (STEVENSON et al., 2018). Como consequência dessa grande magnitude, as correntes de turbidez podem danificar oleodutos, gasodutos (ZAKERI; HOEG; NADIM, 2008) e cabos de comunicação (HSU et al., 2008) presentes nos oceanos ou, também, formar caminhos preferenciais no leito, dando início à formação dos canais/cânions submarinos, junto às zonas com maior declividade (p.ex. taludes marinhos).

Esses caminhos preferenciais são similares a canais confinados, os quais apresentam extensão muito superior a largura. Além disso, eles se desenvolvem com diferentes declividades, extensões e composições de leito, o que faz com que a interação de fluxo com o substrato seja bastante complexa. O comportamento hidrodinâmico de uma corrente de turbidez natural é fortemente influenciado por esses parâmetros e seu entendimento é fundamental para compreender como esses fluxos depositam sua carga de sedimentos nesses ambientes aquáticos. Após percorrerem esses caminhos/canais com forte declividade, as correntes de turbidez normalmente encontram zonas de desconfinamento, as quais, geralmente apresentam menores declividades sendo uma zona de deposição. Nessas regiões, em função da quebra de declividade, pode-se observar geração de ressaltos hidráulicos (KOMAR, 1971).

A região em que ocorre essa quebra de declividade e a possível ocorrência de ressalto hidráulico é denominada Zona de Transição Canal – Lobos, em inglês, usualmente chamada *Channel Lobe Transition Zones* – CLTZ (MUTTI; NORMARK, 1987), caracterizada pela presença do fenômeno de erosão a montante e deposição a jusante. Os depósitos formados após essa região são chamados de lobos turbidíticos, sendo o termo lobo relacionado a uma geometria ovoide, com

topografia convexa. Mulder e Etienne (2010) definem que lobos são depósitos sedimentares posicionados em regiões mais distais dos sistemas turbidíticos siliciclásticos, podendo ser encontrados, ao longo de rampas sedimentares ou em sistemas de contorno. Em geral, os depósitos turbidíticos, incluindo os lobos, despertam grande interesse na indústria do petróleo pois podem servir de reservatórios de hidrocarbonetos, os quais possuem expressivo valor econômico. Neste sentido, identificar, caracterizar e compreender os mecanismos de formação desses depósitos se torna algo importante de ser estudado (PETTINGILL, 2004). Na natureza, especificamente os lobos turbidíticos, apresentam particularidades relacionadas as suas dimensões (comprimentos, largura e espessura), composição, forma (relação entre as dimensões) e declividade, os quais estão fortemente ligadas às propriedades hidrodinâmicas dos fluxos que os geraram, tais como fontes de alimentação, vazão de alimentação, composição do fluxo, entre outros.

Compreender os mecanismos hidráulicos e a formação dos lobos turbidíticos auxilia na redução de incertezas relacionadas a estudos e sondagens para análise de presença e viabilidade de exploração dos depósitos de hidrocarbonetos. Diante disso, uma das maneiras de avaliar a dinâmica das correntes de turbidez e caracterizar os depósitos turbidíticos, é por meio da simulação física em laboratório, a qual pode ser realizada utilizando de experimentos com aproximações unidimensionais, bidimensionais ou tridimensionais.

No Brasil, o Núcleo de Estudo de Correntes de Densidade (NECOD/ IPH/ UFRGS) é uma das referências em simulação física para pesquisas com correntes de turbidez, e é o grupo de pesquisa no qual este trabalho está inserido. O NECOD foi criado em 2000 e apresenta no seu *know-how* parceria com grandes empresas como ExxonMobil, Petrobras e Shell. Essas parcerias contribuíram para a aquisição de equipamentos e infraestrutura de grande porte, o que torna o grupo de pesquisa com elevada capacidade de análise.

De maneira geral, há uma lacuna na literatura da modelagem física tridimensional no universo de correntes de turbidez e depósitos de lobos turbidíticos a ser explorada. Neste contexto, este trabalho visa preencher essa lacuna visando realizar simulações tridimensionais de grande porte, com variação da vazão de injeção de água e sedimento, concentração volumétrica da corrente e modificação da declividade do fundo. Desta forma, espera-se contribuir para o melhor entendimento dos mecanismos hidráulicos nessa região e na caracterização destes lobos

turbidílicos formados, em especial a sua relação entre alcance longitudinal e transversal de diferentes frações granulométricas e a determinação do seu fator de forma.

2 JUSTIFICATIVA

No universo da modelagem física de fenômenos naturais, a tentativa de estudar e reproduzir esse fenômeno, seja ele de pequeno ou grande porte, irá esbarrar em hipóteses simplificativas e, também, em efeitos de escala. Frequentemente, na modelagem física de correntes de densidade o segundo fator pesa significativamente nos estudos realizados. Simular essas correntes com mínimos impactos dos efeitos de escala requer estudos em modelos tridimensionais e, preferencialmente, de grande porte (com dimensões significativas), já que o fenômeno pode se transportar por longas distâncias na escala real (natureza). Assim, os laboratórios dedicados a esse tipo de estudo são escassos em nível mundial. Isso se reflete em uma quantidade reduzida de trabalhos de modelagem física tridimensional registrados na literatura. As implicações logísticas relacionadas a maiores dimensões, maior volume de material utilizado para preparação da mistura da corrente de densidade, maior necessidade de recurso financeiro, demanda maior de equipamentos, maior equipe para auxiliar nos ensaios, falta de instalações físicas etc., normalmente levam os pesquisadores a utilizarem tanques menores, que refletem em significantes simplificações envolvidas (ex. experimentos unidirecionais ou uni- bidimensionais) de fenômenos claramente tridimensionais, como a formação de lobos turbidíticos. Assim, essa pesquisa visa minimizar esses efeitos, se valendo de experimentos físicos tridimensionais em um tanque de grande porte. Dessa forma, os resultados contribuirão para melhor abordagem e explicação de fenômenos naturais que envolvem correntes de densidade e seus depósitos, os quais não são possíveis de serem sancionados com simulações físicas de menor porte (tanques na ordem de centímetros ou metros).

Particularmente, o estudo de lobos turbidíticos desperta muito interesse pela indústria de petróleo, pois as características de porosidade e permeabilidade desses depósitos siliciclásticos e sua localização nesses ambientes deposicionais, tornam esses depósitos como bons reservatórios de hidrocarbonetos. No Brasil, por exemplo, há alguns pontos de exploração na bacia de campos (ex. Campo de Marlim - BIZZI et al., 2003). Assim, é natural que a indústria e a academia busquem sempre desenvolver conhecimento e entendimento para uma melhor compreensão da gênese da formação desses depósitos. Tanto é que pesquisas com modelagem física tridimensional de lobos turbidíticos já foram desenvolvidas no NECOD, em projetos dedicados (Projeto Lobos I – 2005; Projeto Lobos II – 2012; Projeto Modelagem física na transição canal-lobo - 2013, por exemplo). Entretanto, o enfoque dos estudos nesses projetos era o

depósito gerado, sem tanta atenção na caracterização do escoamento que o formou, lacuna que esse trabalho buscará complementar com informações que não foram analisadas nas pesquisas anteriores.

Diante do exposto, este trabalho irá avaliar quais os parâmetros associados a formação da corrente de turbidez ainda na sua região confinada (antes da formação do lobo), podem influenciar nas características hidrodinâmicas do fluxo na região desconfinada e, conseqüentemente, nos depósitos gerados, mais especificadamente, no alcance de grãos de diferentes granulometrias ao longo do lobo turbidítico, o que de maneira indireta influencia na porosidade do depósito. Também, estimou-se as dimensões longitudinais e transversais (fator de forma do depósito lobado). Esses parâmetros geométricos deposicionais são importantes pois, usualmente são informações obtidas no estudo de campo (sísmica, imagens e batimetrias). Dessa forma, correlacioná-las com as características hidrodinâmicas de um fluxo de origem, poderá auxiliar na análise e interpretações dessas feições sedimentares, avançando no estado da arte tanto na academia quanto para aplicações da indústria.

Por fim, até a realização deste trabalho, poucos estudos que envolvem modelagem física experimental sobre correntes de turbidez conseguiram reproduzir o ressalto hidráulico que ocorre na *Channel Lobe Transition Zones*, entre estes que conseguiram essa reprodução se destaca Garcia e Parker (1989). Assim, através da realização de experimentos com diferentes vazões de injeção, alteração da inclinação do fundo do canal de experimentos e mudança de concentração da mistura utilizada, este trabalho buscará avançar nesse ponto específico de estudo e verificar se é possível representar, por meio da modelagem física, a ocorrência do ressalto quando modificado tais parâmetros.

3 HIPÓTESE DO TRABALHO

A hipótese dessa tese consiste em averiguar se é possível prever o fator de forma do depósito, através das características hidrodinâmicas da corrente de turbidez medidas na região confinada de um cânion.

4 OBJETIVOS

Buscando responder as indagações apontadas na justificativa desta pesquisa, os objetivos foram divididos em geral e específicos.

4.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral desse trabalho é caracterizar hidrodinamicamente as correntes de turbidez na zona de transição de um canal - lobos (CLTZ), por meio de modelagem física tridimensional. Dessa forma, buscar-se-á reproduzir lobos turbidíticos gerados em fluxos com diferentes concentrações volumétricas e vazões de injeção e sob diferentes inclinações de taludes confinados e desconfinados

4.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

- Implementar uma metodologia de simulação tridimensional de correntes de turbidez na zona de transição de canal – lobos;
- Avaliar os efeitos hidrodinâmicos dos fluxos nas regiões confinada e desconfinada (longitudinal e transversal) nas características geométricas dos lobos turbidíticos associadas;
- Avaliar as características da distribuição granulométrica dos grãos depositados nos lobos turbidíticos;
- Propor um parâmetro de determinação do fator de forma a partir de características do fluxo antes do desconfinamento;
- Avaliar a formação de ressalto hidráulico após o desconfinamento da corrente de turbidez.

5 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão abordados assuntos referentes a conceitos, classificações e características das correntes de densidade tais como: anatomia e perfil de velocidade, trajetória (desenvolvimento), e da geometria dos depósitos turbidíticos, em especial os lobos.

5.1 CORRENTE DE DENSIDADE

5.1.1 Conceito

Corrente de densidade pode ser definida como o fluxo mantido por um fluido envolvente, conduzido pelas forças gravitacionais, e que apresenta diferença de massa específica entre eles. Segundo Simpson (1987), essas correntes podem ser descritas como o movimento relativo que ocorre entre camadas de fluido que possuem uma diferença de massa específica. Esta diferença pode ocorrer através da presença de sólidos dissolvidos ou em suspensão, e/ ou pela diferença de temperatura ou salinidade entre os fluidos.

É possível notar a corrente de densidade em diversos fenômenos naturais como, por exemplo, no desemboque de rios em oceanos, tempestades de areia, frentes de brisa marinhas, chegada do fluxo de rejeitos em um rio após o rompimento de uma barragem, lançamento de efluente em um curso d'água, entre outros. Alguns destes fenômenos foram apresentados por Simpson (1987). Neste trabalho será objeto de estudo a corrente de densidade em meios líquidos, mais especificamente, no meio marinho.

Quando a diferença de densidade ocorre devido à presença de partículas em suspensão e o fluxo for regido majoritariamente pela componente ascendente da turbulência, denomina-se corrente de turbidez (KUENEN, 1950 e 1951). Segundo Parsons et al. (2007), estas correntes são escoamentos turbulentos impulsionados pelo gradiente de pressão horizontal, resultante do aumento da pressão hidrostática ocasionado pela adição de partículas. As correntes de turbidez são geralmente decorrentes de instabilidades geradas por sedimentos deslizando/escorregando em uma encosta submarina (MIDDLETON, 1993). Assim, se desenvolvem em ambiente marinho e chegam até as bacias abissais, onde se sedimentam, gerando depósitos denominados turbiditos.

5.1.2 Classificação

As correntes de densidade podem ser classificadas em correntes conservativas e não conservativas. Nas correntes conservativas, a taxa de velocidade, massa de material (e.g. material dissolvido) e espessura se conserva no espaço considerado (PARKER et al., 1987). Contudo, pode ocorrer a tendência da diminuição da concentração devido a incorporação de fluido ambiente através da superfície superior da corrente. Dessa maneira, mesmo não trocando material com o meio (correntes salinas, por exemplo), a concentração média desses fluxos pode ser alterada a partir da incorporação de fluido ambiente e da diluição dessas correntes, alterando desse modo a força motriz do escoamento (KOLLER, 2020). Já nas correntes não conservativas, há variação de massa no espaço, normalmente devido as trocas de material com a superfície por meio do processo de erosão e deposição gerando, com isso, variação da densidade ao longo da corrente.

Em função das constantes modificações das características das correntes não conservativas, devido à sedimentação e erosão dos sedimentos, Lowe (1979) propôs classificar este tipo de corrente com base no mecanismo de suporte dos grãos e na reologia dos fluidos. Pela reologia, os fluxos foram divididos em plásticos e os fluidos. Posteriormente, estes então foram divididos nas seguintes categorias, considerando o mecanismo de suporte dos grãos.

- Correntes de turbidez: partículas são suportadas pela turbulência do fluxo, podendo ser subdivididas em corrente de turbidez de baixa densidade e de alta densidade;

- Fluxos fluidizados: partículas são suportadas devido ao movimento ascendente entre grãos, dos fluidos intersticiais;

- Fluxos liquefeitos: partículas são mantidas em suspensão devido ao fluxo de fluidos entre os poros;

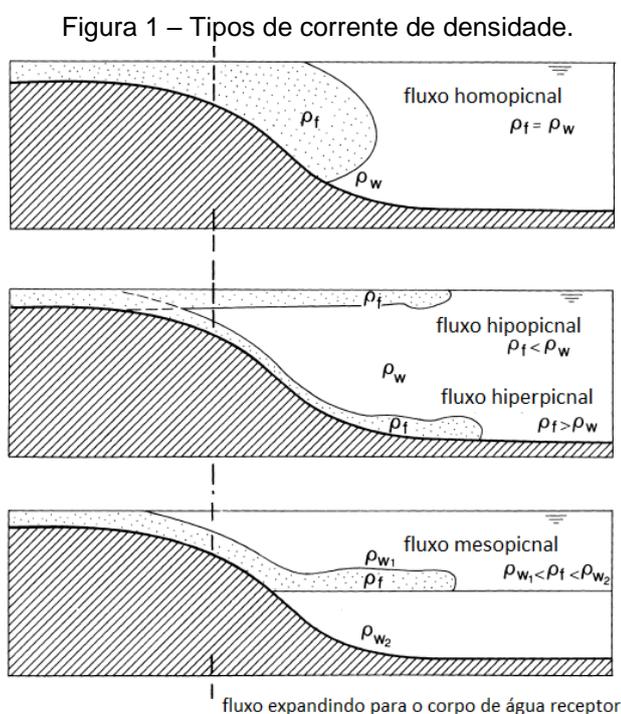
- Fluxos de grãos: partículas são mantidas em suspensão devido à colisão entre grãos, a qual gera uma “pressão dispersiva¹”;

- Fluxos de detritos coesos: grãos são suportados pela matriz coesiva.

Outra maneira de classificar as correntes de densidade é baseada na comparação da massa específica entre o fluxo e o fluido envolvente (fluido ambiente).

¹ Pressão dispersiva corresponde à pressão que os grãos são submetidos para serem mantidos em suspensão devido as forças de interação entre si, pelo choque entre as partículas ou devido a ação das forças oriundas da viscosidade.

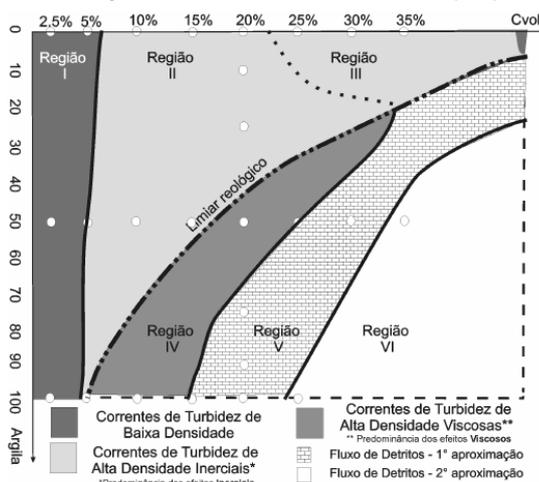
Segundo Mulder e Alexander (2001), quando a massa específica do fluxo for maior que a do fluido envolvente, este se denomina hiperpicnal; quando são iguais são classificados como homopical; quando a massa específica do fluxo for menor que a do líquido ambiente o fluxo é hipopical; já, quando a massa do fluxo for intermediária a massa específica estratificada do meio, nomeia-se mesopical. Na Figura 1 são apresentados os quatro tipos de classificação de correntes de densidade, sendo ρ_f a massa específica da corrente, ρ_w a massa específica do fluido ambiente, ρ_{w1} e ρ_{w2} as massas específicas de estratificação do fluido ambiente. Neste trabalho a corrente estudada é do tipo hiperpicnal.



Fonte: Adaptado de Mulder e Alexander (2001)

Segundo Kneller e Buckee (2000), vários mecanismos de suporte de sedimentos podem operar simultaneamente nas correntes de turbidez, uma vez que esse tipo de corrente descreve fenômenos naturais, cuja natureza não é clara em muitos casos. Manica (2009) propôs uma classificação para os fluxos gravitacionais, com base na concentração volumétrica dos grãos e no percentual de argila da mistura. Nesta classificação, há seis regiões para classificar o fluxo, conforme Figura 2.

Figura 2 – Classificação de correntes de turbidez proposta por Manica



Fonte: Manica (2009)

5.1.3 Anatomia da corrente

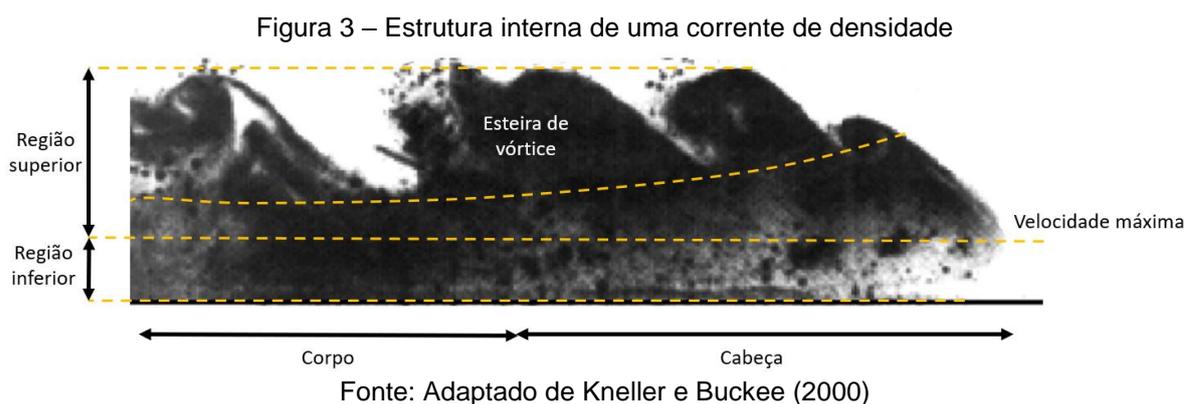
Conforme uma corrente de densidade se desloca, partículas em suspensão podem depositar ou continuar em suspensão devido à componente ascendente da turbulência do fluxo. Estes fenômenos ocorrem em diferentes regiões do escoamento. Com o objetivo de identificar estas regiões, Middleton e Hampton (1973) dividiram a corrente de densidade em três regiões: cabeça, corpo e cauda.

Uma vez que o corpo e a cauda não apresentam um limiar característico de transição (sendo a cauda o prolongamento do corpo) e as características hidráulicas se assemelham, estas duas regiões serão agrupadas, tornando assim a anatomia da corrente com duas partes: cabeça e corpo.

A cabeça é a responsável pelo avanço da corrente. Nesta região, predomina-se a ação da turbulência, o que torna a região com maior potencial de erosão, sendo a responsável em agregar sedimentos para o interior do fluxo. Segundo Middleton (1993), é na cabeça de uma corrente de densidade que se desenvolvem as principais instabilidades que condicionam o comportamento geral de uma corrente. A extensão da cabeça, de acordo com Simpson (1987), depende de uma série de fatores, sendo os mais importantes a inclinação do leito e a viscosidade da corrente.

O corpo da corrente geralmente apresenta espessura menor e é mais uniforme, o processo de deposição é maior que o de erosão, tornando o fluxo mais diluído (MIDDLETON E HAMPTON, 1973). O corpo da corrente possui velocidade na ordem de 30 a 40% maior quando comparado com a cabeça, pois, a fim de compensar a diluição que ocorre na cabeça (KNELLER E BUCKEE, 2000).

A estrutura interna das correntes de densidade é composta pela região superior (ou de livre mistura) e pela camada junto à parede (ou região inferior), conforme Figura 3. O ponto de transição dessas regiões é o local em que ocorre a velocidade máxima da corrente. Sedimentos presentes no leito são incorporados à corrente na região inferior. De acordo com Kneller e Buckee (2000), essa região é a parte mais veloz, na qual o gradiente de velocidade é positivo. Na região superior há incorporação do líquido do meio para a corrente, o que favorece com a sedimentação de material. Além disso, na região de livre mistura ocorre uma mistura turbulenta, na qual é possível observar a presença de uma esteira com vórtices. Segundo Koller (2020), o carregamento de líquido e de sedimento para a corrente de densidade possuem papéis importante na diluição ou incorporação de materiais, o que interfere na dinâmica da corrente.

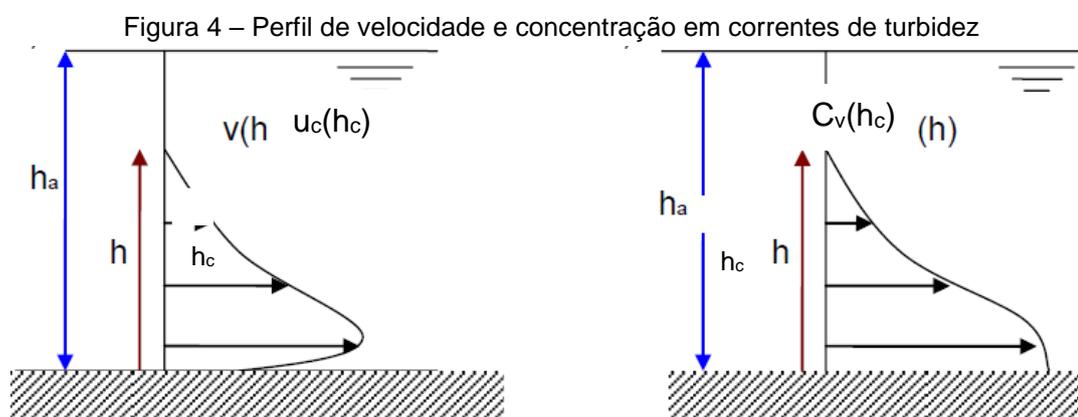


5.1.4 Perfil de velocidade e concentração

Em rios, de maneira geral, a distribuição vertical de velocidade segue uma lei aproximadamente parabólica, com valores decrescentes com a profundidade, e com máxima velocidade ocorrendo um pouco abaixo da superfície livre/ superiores (PORTO, 2006). Já nas correntes de turbidez do tipo hiperpicnal, objeto de estudo deste trabalho, o perfil de velocidade vertical conta com valores maiores na região um pouco acima do fundo, conforme Figura 4. Nestas correntes, o perfil de velocidade está diretamente relacionado à concentração, sendo as maiores velocidades coincidentes com a região das maiores concentrações (MIDDLETON, 1993).

Segundo Kneller et al. (1999), em correntes de turbidez, a altura em que ocorre a velocidade máxima é controlada pela razão das forças de arraste nas regiões

superior e inferior, geralmente, em experimentos, ocorre a 0,2 a 0,3 vezes a altura da corrente (h_c).



Fonte: Ferreira (2013)

5.1.5 Parâmetros que interferem nas correntes de turbidez

Quando se estuda as correntes de turbidez, devido sua complexidade, alguns parâmetros devem ser analisados e monitorados. Sendo assim, a realização de simulação física em escala reduzida é uma das possibilidades de avaliação destes fluxos, o que permite fazer analogias com fenômenos naturais. Essa analogia pode ser feita quando o modelo físico apresenta as mesmas grandezas regidas pelas leis da física do protótipo, ou quando há uma relação conhecida entre estas grandezas (MOTTA, 1972).

Middleton (1966b), descreveu os parâmetros que interferem na dinâmica das correntes de densidade. São eles: aceleração da gravidade reduzida, g' ($m.s^{-2}$); altura da corrente, h_c ; coeficiente de perda de carga nas superfícies superiores e inferiores, f_i e f_0 , respectivamente; declividade do fundo, I ($m.m^{-1}$); velocidade da corrente de densidade, u_c ($m.s^{-1}$); velocidade de cisalhamento, u^* ($m.s^{-1}$); e viscosidade cinemática da corrente de densidade, ϑ_c ($m^2.s^{-1}$). Como o presente trabalho irá tratar de correntes de densidade não conservativas, deve-se considerar também o coeficiente de uniformidade², σ ; concentração volumétrica, C_v ; diâmetro dos grãos, d (μm); velocidade de queda, w_s ($m.s^{-1}$). Pela análise dimensional, chega-se à Equação 1.

$$f(g', h_c, f_i, f_0, I, u_c, u^*, \vartheta_c, \sigma, C_v, d, w_s) = 0 \quad \text{Equação 1}$$

² Coeficiente de uniformidade corresponde ao desvio padrão referente a variação do diâmetro das partículas constituintes de uma mistura.

A aceleração da gravidade reduzida, consiste na mudança efetiva na aceleração da gravidade de um fluido em contato com outro fluido devido a diferença de densidade, e pode ser calculada conforme a Equação 2.

$$g' = g \cdot \frac{\Delta\rho}{\rho_w} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

g' é a aceleração da gravidade reduzida (m.s^{-2});

g é a aceleração da gravidade (m.s^{-2});

$\Delta\rho$ é a diferença de massa específica entre o fluido ambiente e a mistura (kg.m^{-3});

ρ_w massa específica do fluido ambiente (kg.m^{-3}).

Segundo Graf (1971), a velocidade de cisalhamento (u^*) corresponde a mensuração da intensidade das flutuações turbulentas da velocidade, podendo ser calculada por meio da Equação 3.

$$\frac{u_c}{u_*} = \frac{1}{K_c} \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

u_c velocidade da corrente de densidade (m.s^{-1});

u^* é a velocidade de cisalhamento (m.s^{-1});

K_c é a constante de Von Kàrman (0,41);

z é a cota vertical de elevação (m);

z_0 é o fundo do canal (m).

De acordo com Middleton (1966), a velocidade da corrente de densidade não é influenciada para declividades de fundo inferiores a $2,3^\circ$. Para declividades entre 5° e 90° , a velocidade é levemente influenciada pois, há aumento nas forças gravitacionais, às quais são compensadas pelo aumento da tensão cisalhante junto à interface superior da corrente.

Na modelagem física, alguns números adimensionais devem ser levados em consideração ao se planejar os experimentos. O número de Froude densimétrico é um desses e estabelece a relação quadrática entre as forças de inércia e as forças gravitacionais, conforme Equação 4. Este número determina o regime e o grau de

mistura nas interfaces da corrente (MIDDLETON, 1966; BAAS et al., 2014). Quando o valor do número de Froude densimétrico for maior que um, o escoamento é classificado como supercrítico ($F_{r,d} > 1$); se for igual a um, é dito crítico ($F_{r,d} = 1$); caso contrário, é classificado como subcrítico ($F_{r,d} < 1$).

$$F_{r,d} = \frac{u_c}{\sqrt{g' \cdot h_c}} \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

- $F_{r,d}$ é o número de Froude densimétrico (adimensional);
- u_c é a velocidade da corrente de densidade ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$);
- g' é a aceleração da gravidade reduzida ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$);
- h_c é a altura da corrente de densidade (m).

O número de Reynolds (Equação 4) é outro exemplo de número adimensional, o qual expressa a relação entre as forças de inércia e as forças viscosas. O fluxo pode ser classificado em laminar ou turbulento se o número de Reynolds for inferior a 500 ou superior a 2000, respectivamente. Quando o valor do número de Reynolds estiver entre esses números, é dito que o fluxo se encontra em uma zona de transição.

$$R_{ey} = \frac{u_c \cdot h_c}{\vartheta_c} \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

- R_{ey} é o número de Reynolds (adimensional);
- u_c é a velocidade média ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$);
- h_c é a altura da corrente de densidade (m);
- ϑ_c é a viscosidade cinemática da corrente de densidade ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$).

Segundo Del Rey (2006), a semelhança do número de Froude densimétrico deve ser assegurada para que os escoamentos sejam considerados semelhantes dinamicamente. Contudo, Heller (2016) alerta que realizar a modelagem física a partir da igualdade do número de Froude não garante que número de Reynolds seja representado corretamente. Isso ocorre pois para correntes de turbidez, a similaridade ocorre a partir de um valor mínimo do número de Reynolds, a partir do qual os efeitos de escala são desprezíveis. Parsons e Garcia (1998) em suas pesquisas sugerem que seja adotado valores superiores a 1000 para o número de Reynolds, para que haja

similaridade dos processos de mistura na cabeça das correntes de turbidez. Kneller e Buckee (2000), utilizam o número de Reynolds maior que 2000, que é o valor aplicado em canais a superfície livre.

5.2 PERCURSO DE UMA CORRENTE DE DENSIDADE

5.2.1 Vales/ canais marinhos

Uma das maneiras das correntes de densidade serem desencadeadas é através do colapso de sedimentos, em alguns casos, localizados próximos a plataformas continentais, podendo estar relacionados a eventos sísmicos, aportes fluviais e, formação de zonas de descarga submarina de água subterrânea, por exemplo. Independentemente do mecanismo de geração da corrente de densidade, esta inicia o processo de descida pela encosta/ talude marinho, com alto poder erosivo. Este processo favorece a escavação de caminhos preferenciais para o fluxo da corrente de densidade, iniciando, assim, a formação de vales marinhos nas encostas. Nesse sentido, as correntes de densidade atuam a todo momento na formação dos vales marinhos.

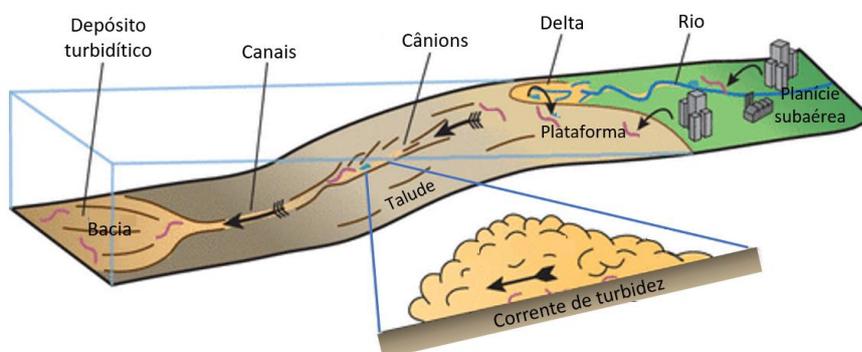
A geometria dos vales percorridos pelas correntes de densidade até atingirem o fundo dos oceanos é bastante variada, contudo, de maneira geral, são canais retos, como se a encosta tivesse sido cortada. Segundo Daly (1936), estes canais possuem inclinação longitudinal variando entre 1:100 e 1:10, com fundo irregular. Dependendo da magnitude das correntes de densidade nos vales submarinos, será dado o início da formação dos cânions.

Segundo Boffo (2017), a declividade do talude e a topografia podem ser os fatores responsáveis pela formação de caminhos preferenciais para o escoamento das correntes de densidade. Após a formação destes caminhos, que podem possuir grandes extensões, poderá então ocorrer a canalização do fluxo, que terá como consequência a transferência de sedimentos para as partes mais distais e profundas do mar, formando, desta maneira, os depósitos turbidíticos.

Na Figura 5 é apresentado um esquema de percurso natural no qual as correntes de densidade transitam antes de formarem os depósitos turbidíticos. Nesta imagem as correntes de densidade são oriundas do aporte fluvial e, ao chegarem no delta, iniciam o processo de erosão dos vales submarinos, os quais apresentam

confinamento lateral, o que contribui para o aumento da densidade do fluxo (HEEZ et al., 1969).

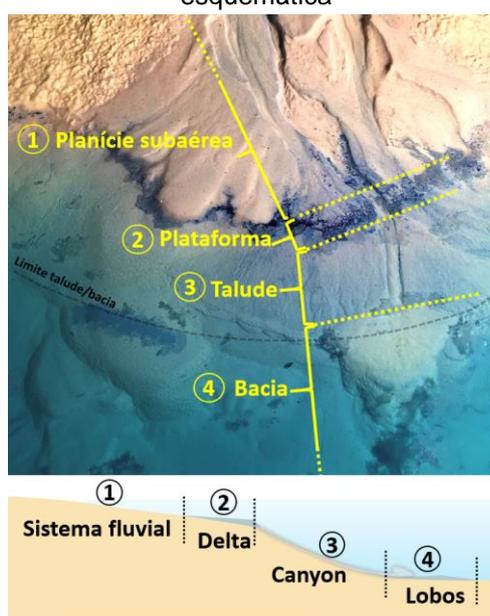
Figura 5 – Desenvolvimento de uma corrente de densidade em ambiente natural



Fonte: Adaptado de Pohl (2020)

Em escala reduzida é possível reproduzir o desenvolvimento de uma corrente de densidade, conforme Figura 6. Nesta imagem o fluxo iniciou em uma planície subaérea, semelhante a um sistema fluvial que, ao atingir o delta, formou uma corrente de turbidez. Essa corrente, ao percorrer o talude, ocasionou a escavação de caminhos preferenciais que, posteriormente, formaram uma estrutura semelhante a um cânion. Após percorrer o talude, a corrente de turbidez depositou na bacia, formando os lobos turbidíticos.

Figura 6 – Desenvolvimento de uma corrente de densidade em escala reduzida e ilustração esquemática



Fonte: Boffo. Acervo pessoal

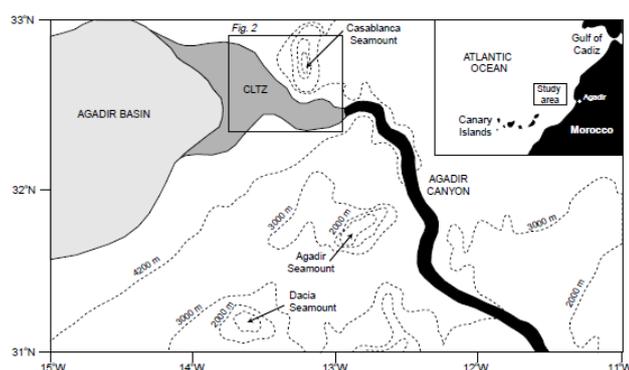
Na transição entre o talude e a bacia ocorre o desconfinamento da corrente de turbidez. Esta região comumente é caracterizada pela quebra de declividade do leito, o que pode ser propício para a formação de ressaltos hidráulicos (KOMAR, 1971). O trecho em que ocorre essa quebra de declividade e ressalto hidráulico é denominada de *Channel Lobe Transition Zones* – CLTZ (MUTTI; NORMARK, 1987).

5.2.2 Zona de transição canais – lobos (*Channel Lobe Transition Zones - CLTZ*)

Segundo Mutti e Normark (1987), a zona de transição canais - lobos corresponde à região de transição entre canais confinados e depósitos oriundo do desconfinamento. Esta região está localizada imediatamente abaixo da encosta do canal (talude), e pode estar relacionada à quebra de declividade e à mudança do fluxo do escoamento supercrítico para subcrítico. O CLTZ é caracterizado pela atividade erosiva e apresenta partículas de granulometria mais grossa, quando comparada ao restante do depósito, distribuídas de forma irregular.

Como exemplo de uma definição de CLTZ, tem-se a região após o cânion de Agadir localizado na margem de Marrocos, conforme Figura 7. Esta zona se estende por mais de 60 km a partir da foz do cânion e apresenta uma área de erosão com cerca de 30 km de extensão. Através de análises Wynn et al. (2002), constatou-se que o processo erosivo provavelmente ocorreu em diferentes eventos sucessivos.

Figura 7 – Exemplo de uma CLTZ na natureza

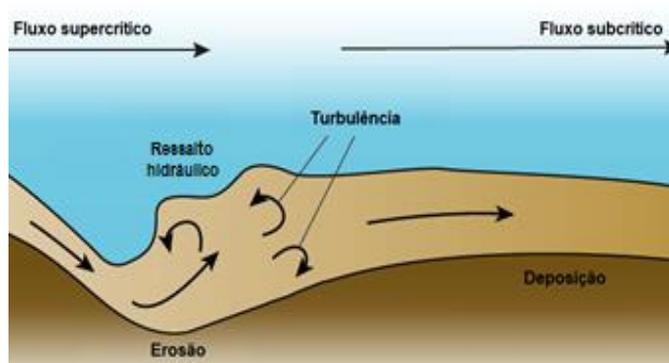


Fonte: Wynn et al. (2002)

Garcia e Parker (1989), ao realizarem experimentos com correntes de densidade, constataram a formação de ressalto hidráulico na região em que ocorre a transição dos canais - lobos. Este estudo foi de grande importância pois os processos de erosão podem estar associados a ressaltos hidráulicos.

As teorias que envolvem ressaltos hidráulicos e a deposição de correntes de turbidez foram utilizadas por Piper e Savoye (1993) para analisar a corrente de densidade e os processos de deposição em águas profundas do noroeste do Mar Mediterrâneo. No estudo destes pesquisadores, foi analisado perfis sísmicos de alta resolução, testemunhos e dados de sonar da região analisada. Através dos conhecimentos adquiridos em pesquisas anteriores, sobre ressaltos hidráulicos, foi possível constatar a existência do fenômeno de erosão nas CLTZ. O ressalto hidráulico ocorre quando o fluxo de montante é supercrítico e o de jusante subcrítico, o que contribui para a deposição de sedimentos após o ressalto conforme esquematizado na Figura 8.

Figura 8 – Ressalto hidráulico



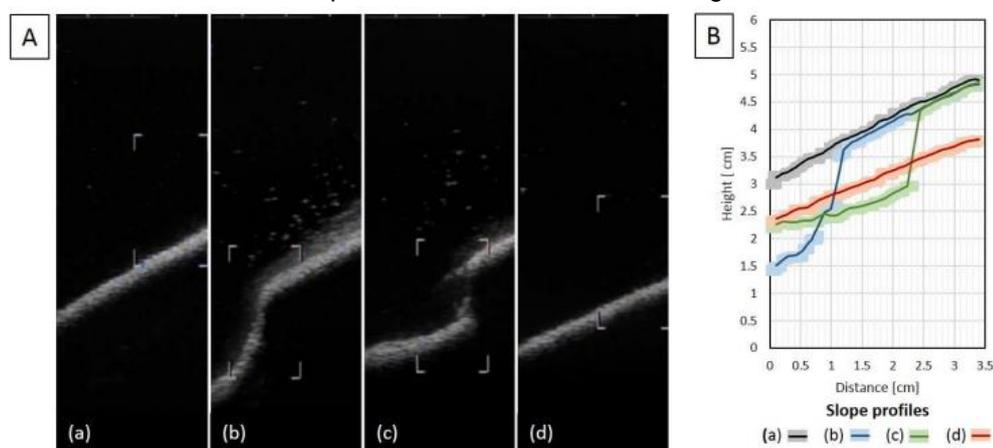
Fonte: Adaptado de Pohl (2019)

Com a identificação de ressaltos hidráulicos após o desconfinamento dos canais, os mecanismos que envolvem este fenômeno foram considerados um dos principais responsáveis pelas variedades de formas de fundo nas CLTZ, segundo pesquisas de Palanques et al. (1995). Ainda, ao analisar três diferentes CLTZ, localizados próximo à Marrocos, França e Portugal Wynn et al. (2002) notou que as formas de fundo nas CLTZ são geralmente alinhadas perpendicularmente ao caminho do fluxo principal. Devido à baixa resolução dos aparelhos utilizados para analisar estas formas, não foi possível identificar alterações menores. No desconfinamento da corrente de densidade, o fluxo se expande de maneira assimétrica, apresentando geometria com dimensões bastante variadas.

Em algumas situações, durante o desconfinamento da corrente de densidade, na região do CLTZ, pode ocorrer a formação de um *knickpoint*, associado a colapsos retroativos. Este é um fenômeno que ocorre nas cabeceiras do desconfinamento,

fazendo com que o ponto de erosão migre no sentido de subida do talude, com o objetivo de estabelecer um perfil de equilíbrio. Segundo Boffo (2017), os colapsos retroativos podem estar associados ao ressalto hidráulico que ocorre na transição talude - bacia, sendo um elemento importante para a formação dos cânions e para o confinamento do fluxo oriundo do aporte fluvial. Na Figura 9 é apresentado os diferentes estágios que ocorrem no fenômeno *knickpoint* de colapsos retroativos, obtidos através da simulação física, até a obtenção de um novo perfil de equilíbrio.

Figura 9 – Estágios da formação de um *knickpoint*, associado a colapsos retroativos – (a) imagens de ultrassom obtidas durante um experimento físico mostrando a evolução do perfil do talude; (b) perfil batimétrico para os diferentes momentos registrados

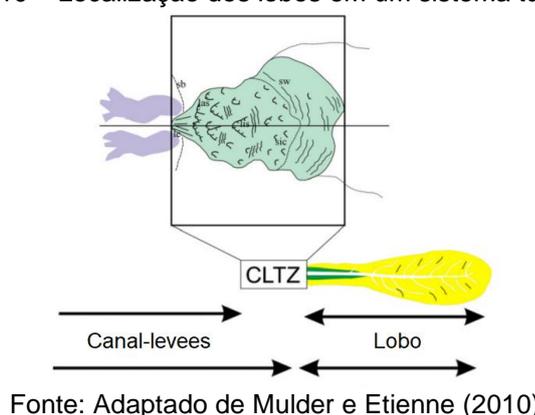


Fonte: Boffo et al. (2019)

De acordo com Mutti (1992), quando a relação areia/argila é baixa, a CLTZ pode estar ausente. Quando esta relação é alta, é provável a presença desta zona de transição, a qual conta com uma área de erosão. Na Figura 10 é apresentado um esquema de transição canal-lobo³, com e sem a presença da CLTZ. Ao comparar dois sistemas turbidíticos adjacente no Mar de Bering, Kenyon et al. (1995) observaram que a presença da CLTZ está relacionada ao tamanho, natureza do sistema de alimentação turbidítico, volume e composição da corrente de turbidez.

³ Na imagem é utilizado o termo canal-levees. Este são canais originados de um cânion com grandes extensões que atuam como sistema alimentador de sedimentos para canais menores (MUTTI; NORMARK, 1991).

Figura 10 – Localização dos lobos em um sistema turbidítico



5.3 LOBOS TURBIDÍDICOS

Normark (1970) utilizou o termo lobo para descrever estruturas sedimentares que estão associadas a sistemas turbidíticos de águas profundas. De acordo com autor, a morfologia do termo lobo está relacionada a uma geometria ovoide, com topografia convexa. Anos depois, com o objetivo de descrever um sistema turbidítico complexo de canal-*levees* do Mississippi, Bouma (1985) utilizou o termo lobo de leque.

Segundo Mulder e Etienne (2010), os lobos são depósitos sedimentares mais distais dos sistemas turbidíticos siliciclásticos, podendo ser encontrados, em alguns casos, em ambientes rasos e ao longo de rampas sedimentares. Com o avanço da sísmica de altíssima resolução, a determinação/ estimativa da morfologia e estrutura dos lobos foi aprimorada.

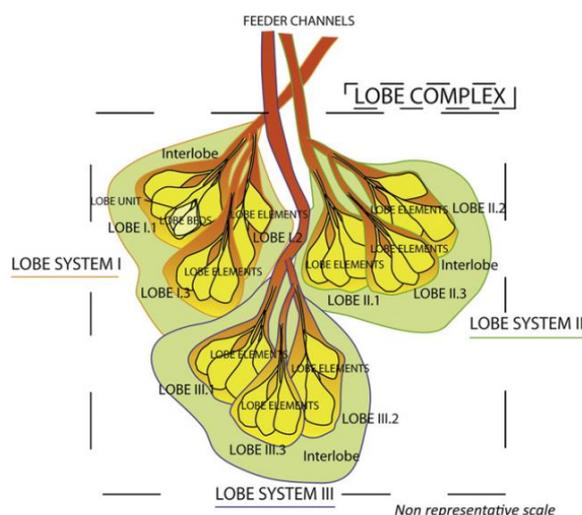
Os lobos apresentam baixa espessura, quando comparada com a sua extensão (MUTTI; RICCI LUCCHI, 1972), a forma dessas estruturas varia de arredondado a alongado (JEGOU et al., 2008). Na parte central do lobo, a topografia é predominantemente plana e, nas laterais, mais íngremes (MULDER; ETIENNE, 2010).

O lobo representa a continuidade natural do sistema canal-*levees* e suas características morfológicas apresentam geometrias que dependem da natureza e dimensão do sedimento constituinte e da topografia inicial do fundo do mar. Segundo Wynn et al. (2002), os lobos também podem se formar após a *Channel Lobe Transition Zones*, além de ocorrerem após os canais-*levees*, conforme Figura 10. Os lobos normalmente apresentam elevada distribuição espacial e são constituídos de depósitos de argila siltosa alternado com leitos siltsosos finos (GARDNER et al., 1996).

Segundo Prélat, Hodgson e Flint (2009), os lobos que foram formados por um mesmo canal alimentador, formam um sistema de lobos. A união de diferentes

sistemas de lobos, forma um complexo de lobos, os quais apresentam comprimento e largura com dezenas de quilômetros e espessuras de dezenas de metros. A Figura 11 apresenta um esquema de composição deste complexo de lobos.

Figura 11 – Arquitetura de um complexo de lobos



Fonte: Adaptado de Mulder e Etienne (2010)

As características dos lobos são afetadas com a quebra/mudança de declividade do fundo, o que ocorre na transição do canal alimentador com o desconfinamento da corrente. Este impacto de mudança de inclinação, foi abordado em experimentos (GARCIA; PARKER, 1989; ISLAM; IMRAN, 2010). Estudos indicaram que a quebra de declividade interfere na diminuição das componentes tangenciais das forças que atuam no fluxo, resultando na desaceleração da corrente de turbidez, e contribuindo com a deposição dos sedimentos em suspensão (ROUSE, 1937). Na simulação física, as consequências que a mudança de declividade ocasiona nos depósitos turbidíticos geralmente ocorrem com base nas pequenas variações na espessura dos depósitos (GRAY; ALEXANDER; LEEDER, 2006).

Segundo os experimentos de Métivier, Lajeunesse e Cacas (2005); Alexander et al. (2008) e Steel et al. (2017), quando a corrente de densidade se desconfinava, há expansão lateral, desaceleração da corrente e sedimentação. Com isso, há formação de depósitos lobados. Em alguns casos, à montante destes depósitos há uma região (CLTZ) na qual os processos de erosão sobrepõem os de deposição. Este processo de erosão está relacionado à formação de ressaltos hidráulicos, conforme descrito no item 5.2.2 Zona de transição canais – lobos (*Channel Lobe Transition Zones - CLTZ*).

Até o momento, poucos estudos experimentais sobre correntes de turbidez conseguiram comprovar através do número de Froude, a formação de ressalto hidráulico. Garcia e Parker (1989) foi um dos pesquisadores que conseguiu reproduzir este fenômeno. Outros autores como Pohl (2019), Spsychala et al. (2020), Wilkin et al. (2023) não mediram a variação da concentração da corrente de turbidez ao longo do canal e, com isso, não foi possível calcular o número de Froude após o desconfinamento. Assim, não é recomendado afirmar que houve formação de ressalto hidráulico, embora as características do depósito formado (presença de um trecho com erosão e outro com deposição) sejam notadas.

5.4 PESQUISAS COM CORRENTES DE DENSIDADE

Visto que, atualmente, há várias pesquisas com correntes de densidade, esse item será subdividido em três tópicos que envolvem a descrição de algumas pesquisas na área. A primeira parte destinada aos trabalhos pioneiros que envolveram principalmente simulação física, evidenciando como esta área foi se desenvolvendo através da absorção de conteúdo, e que serviram de base para demais investigações, além de alguns trabalhos da atualidade. Já no segundo tópico serão descritos os trabalhos realizados no NECOD/ IPH/ UFRGS acerca desse tema, em nível de mestrado e doutorado. Além disso, há um terceiro item que aborda uma análise crítica dos estudos que envolvem as correntes de turbidez.

5.4.1 Estudos de corrente de densidade

O primeiro estudo que envolveu simulação física com correntes de densidade foi realizado por Kuenen (1937) e teve por objetivo analisar se as correntes de densidade originadas nas encostas continentais teriam contribuído na formação dos cânions submarinos. Kuenen e Migliorini (1950) por sua vez, fizeram uma série de experimentos em dois tanques, um de pequeno e outro de grande porte. Através do controle da granulometria do material e, variando a velocidade de avanço, puderam notar a formação de estruturas sedimentares e o poder erosivo das correntes.

Os mecanismos de deposição foram objetos de estudo de Middleton (1967). Nesta pesquisa, através da simulação física, constatou-se as diferenças de deposição de correntes de densidade de alta e baixa densidade. Além disso, nesta pesquisa foi relatado a dificuldade da completa associação entre os resultados obtidos

experimentalmente e os processos naturais, devido à interação entre os fluidos e o transporte de sedimentos.

Luthi (1981), ao realizar experimentos em um tanque tridimensional, observou que no desconfinamento de correntes de turbidez forma-se um ângulo de expansão com rápida diluição da corrente, conforme o fluxo se desloca para jusante. Conseqüentemente, o diâmetro médio dos grãos depositados diminui à medida que se avança para as regiões distais.

Postma, Nemeç e Kleinspehn (1988) realizaram simulações físicas em uma calha inclinada de 4 m de comprimento, e constataram que partículas com maiores diâmetros, e isoladas, são inicialmente suspensas devido à turbulência do fluxo, e, posteriormente, atingem a transição entre a região de fluxo turbulento e a região de fluxo laminar inercial. Este estudo experimental analisou correntes de alta densidade.

O impacto da quebra de declividade na formação de depósitos, oriundos de correntes de densidade experimentais, pode ser avaliado por meio da análise das variações na espessura dos depósitos nas pesquisas que envolveram simulações físicas de Gray, Alexander e Leeder (2005). Além disso, estes autores constataram que as quebras de declividade interferem na estrutura externa dos escoamentos.

Visando relacionar a estrutura do fluxo das correntes de densidade e o transporte de sedimentos nos ressaltos hidráulicos, Macdonald et al. (2009) realizaram uma série de experimentos em canal bidimensional com 10 m de extensão. Na primeira etapa dos ensaios não foi adicionado sedimentos ao fluxo de modo a caracterizar com detalhe o ressalto hidráulico. Na segunda etapa dos ensaios, foi adicionado silte e notou-se a formação de leitos com características distintas.

A análise da variação espacial na composição dos lobos turbidíticos em decorrência do fracionamento hidrodinâmico foi objeto de estudo de Pyles, Straub e Gaguejante (2013). Por meio de dois experimentos em um tanque de ensaio com grandes dimensões, observou-se que o formato dos grãos tem maior influência na velocidade de queda para sedimentos maiores que 100 μm . Já para partículas menores que 100 μm , a massa específica que apresenta maior influência na velocidade de queda. Além disso, as correntes de densidade experimentais não arrastam sedimentos do leito, como ocorre em ambientes naturais.

Pohl et al. (2019) através de ensaios em um tanque tridimensional, com inclinação do leito em 11% e concentração de 17% da mistura injetada, notou que o desconfinamento da corrente de densidade aumenta as tensões de cisalhamento

junto ao fundo, ocasionando erosão no leito de fundo móvel. Além disso, esta pesquisa indicou que no desconfinamento forma-se gradiente de pressão lateral à medida que a corrente de turbidez é mais densa que o fluido ambiente e, esse gradiente é maior próximo ao fundo, o que explica a rápida expansão lateral e a queda de velocidade no eixo central da corrente.

A arquitetura dos depósitos turbidíticos foi objeto de estudo de Sychala et al. (2020). Nessa pesquisa foram empregadas vazões entre 25 e 40 m³.h⁻¹ (416,67 e 666,67 L.min⁻¹), declividade da parte confinada de 11° e na parte desconfinada entre 0 e 4°. Como resultado observou-se que o comprimento dos lobos manteve proporcional à declividade e à concentração do material injetado. A vazão, por outro lado, foi o parâmetro que mais interferiu na deposição dos sedimentos.

Pontopoulos et al. (2022), por meio da simulação física em tanque experimental de grande dimensão, realizou a caracterização quantitativa de partículas de natureza coesa e não coesa, empregadas em experimentos de fluxos gravitacionais. Onze parâmetros foram analisados e suas distribuições e tendências dentro da bacia experimental foram avaliadas. Entre as tendências observadas, notou-se que, geralmente, nas partes mais distais e periféricas dos depósitos experimentais estudados, ocorre o predomínio de partículas mais planas, alongadas e de formato irregular, caracterizadas pela diminuição dos valores de circularidade e razão de aspecto em comparação com as partes mais proximais e centrais dos depósitos.

O estudo de correntes de turbidez de alta densidade e seus depósitos em terminação abrupta de canal, com a presença de quebra de declividade entre a região confinada e desconfinada foi realizado por Wilkin et al. (2023). Nesta pesquisa observou-se que os elementos dos lobos aumentaram em comprimento, largura e espessura com o aumento das concentrações iniciais de sedimentos, enquanto uma redução no ângulo de quebra do talude do canal reduziu as dimensões devido à maior deposição do talude. Devido ao elevado número de informações neste trabalho, utilizou-se este estudo na validação das propostas de determinação do fator de forma do depósito.

5.4.2 Estudos de corrente de densidade realizados no NECOD

No Brasil, a simulação física de correntes de densidade vem sendo realizada de forma sistemática no Núcleo de Estudos em Corrente de Densidade do IPH da UFRGS desde 2000. A primeira dissertação apresentada por um membro do NECOD,

foi de Fabian (2002), e tinha por objetivo avaliar a dinâmica de correntes de densidade conservativas através de simulação em canal de declividade variável. Nesta pesquisa foi utilizado um canal de, aproximadamente, 3 m de comprimento. Os resultados mostraram que a variação de apenas 1% da massa específica das correntes de densidade, provocaram um acréscimo de 25% na velocidade média da corrente.

No mesmo ano, Manica (2002) propôs descrever o fluxo de corrente de densidade não conservativa gerada em um canal tridimensional de geometria simplificada (o mesmo utilizado nesta pesquisa de doutorado), e implantar uma metodologia para estudo, em escala reduzida, dos padrões de depósitos para as correntes de densidade não conservativas. Com essa pesquisa verificou-se que a velocidade de avanço, espessuras, formas de fundo e distribuição granulométricas do material estão intimamente mais ligadas à vazão de entrada do que ao volume de material injetado.

Visando analisar a extrapolação dos resultados de Manica (2002) para canal de grande porte, e avaliar os efeitos de escala induzidos, Brito (2005) realizou simulações físicas de depósitos e sequências deposicionais turbidíticas. Como resultado, constatou-se que para que se garanta a eliminação de efeitos de escala, devem ser mantidas constantes a massa específica do sedimento empregado na mistura, as suas condições de admissão, e o valor do Froude densimétrico. Neste trabalho foi utilizado um canal bidimensional longo, de 5 m de comprimento, com declividade variável.

A primeira tese defendida por um membro do NECOD, foi de Del Rey (2006) e teve como proposta avaliar o potencial da simulação física de corrente de turbidez na previsão e elucidação das feições sedimentares em seus depósitos. Nesta pesquisa utilizou-se um tanque tridimensional. Após os experimentos, observou-se que houve uma grande similaridade entre o depósito gerado e aqueles identificados em sistemas turbidíticos atuais e do registro geológico, tanto em afloramento como em dados de subsuperfície.

Diante da quantidade de ensaios realizados na área de correntes de turbidez pelo NECOD, Puhl (2007) se propôs a analisar 122 ensaios feitos no NECOD, buscando através de uso de regressão não linear múltipla, obter leis que correlacionam a velocidade, espessuras características com parâmetros de entrada, como por exemplo características dos sedimentos, da mistura e da injeção. Nesta

análise ficou evidente que as variáveis mais sensíveis são a vazão, concentração volumétrica e as propriedades das misturas, como massa específica e viscosidade.

Buscando avaliar o uso em modelos físicos de materiais sólidos dissolvidos ou suspensos (sal e bentonita), para simular o efeito das frações finas de sedimentos presentes nas correntes de turbidez de baixa densidade, Ducker (2007), realizou uma série de experimentos em um canal bidimensional de 3 m de comprimento. Com base nos resultados obtidos nos experimentos realizados, para as correntes de baixa densidade geradas no trabalho ($C_v < 2\%$), foi possível concluir que se poderia substituir sedimentos finos por sal na simulação física de correntes de densidade, apesar das pequenas diferenças nas características geométricas, dinâmicas e deposicionais.

Guirro (2008) realizou dez experimentos tridimensionais com correntes de turbidez, transportando partículas de caulinita e quartzo, para avaliar os efeitos da variação do tamanho dos grãos transportados pela corrente, e da vazão. A analogia entre os modelos gerados por correntes de turbidez ricas em finos e os sistemas turbidíticos de grãos finos do registro geológico, foi considerada satisfatória. Nestes experimentos foi utilizado o tanque experimental tridimensional de declividades ajustáveis que apresenta cerca de 35 m³.

Através da modelagem física realizada em um canal de acrílico de 4,5 m de comprimento, Manica (2009) realizou experimentos com diferentes tipos de fluxos gravitacionais de sedimentos, explicando assim, de maneira hidrodinâmica e deposicional, os fluxos gravitacionais de sedimentos naturais. Além disso, propôs uma classificação inédita para as correntes de turbidez de alta densidade, baseada na concentração volumétrica, presença de argila e comportamento reológico das misturas, considerando a evolução e transformação destes fluxos ao longo do espaço, conforme Figura 2.

Boffo (2010) realizou 28 experimentos em um canal bidimensional de 3 m, com o propósito de determinar as concentrações de sedimentos que formam correntes do tipo hiperpicnal em ambientes com diferentes concentrações salinas. Nesta pesquisa os resultados indicaram que mesmo injetando uma mistura de menor densidade, comparada ao fluido ambiente, foi possível obter o tipo de corrente almejado.

O estado de equilíbrio dinâmico de correntes de turbidez sobre um substrato móvel, foi analisado por Puhl (2012). Nesta pesquisa utilizou-se um canal unidirecional de 5,4 m de comprimento, e constatou-se que com a manutenção da descarga de

sedimentos as correntes de densidade têm a capacidade de alcançar um estado de equilíbrio com o leito, mesmo em regime de deposição.

Ferreira (2013) analisou se as correntes de turbidez geradas através da injeção de mistura por meio de difusores, se portam semelhante a um jato ou à uma pluma, ou se realmente se portam como fluxos gravitacionais. Esta análise foi feita utilizando um canal bidimensional de aço e vidro, com cerca de 15 m de comprimento e concluiu-se que as correntes de densidade geradas em laboratório não podem ser relacionadas diretamente com jatos e plumas. Entretanto, a quantidade de movimento inicial e a diluição apresentam comportamentos característicos para correntes de densidade.

Com o objetivo de identificar o comportamento espacial evolutivo (morfológicos e geométricos) nos padrões dos depósitos de leques submarinos análogos, Fick (2015) realizou uma série de dez experimentos em um tanque tridimensional de 1 m³. Os resultados indicaram que processos autogênicos locais alteraram a configuração global dos depósitos. Além disso, as concentrações de sedimentos tiveram influência direta nas características morfológicas e evolutivas dos depósitos.

O estudo de investigação e geração de formas de leito por ações de correntes de densidade salina foi realizado por Koller (2016), através de ensaios realizados em um canal de acrílico de 18 m de comprimento, com leito móvel e declividade variável. Esta pesquisa possibilitou a comparação das características hidráulicas da corrente de densidade e, granulométricas e morfológicas do leito móvel, com ambientes fluviais.

A caracterização reológica das misturas de água e sedimento, que são utilizadas em laboratório na simulação física de correntes de turbidez, foi realizada por Castro (2016). Esta análise permitiu comparar os dados obtidos via ensaio reológico com as equações reológicas frequentemente usadas para cálculo da viscosidade.

Visando aprimorar o conhecimento sobre a origem e formação de cânions, Boffo (2017), através de simulação física, realizou ensaios em um tanque tridimensional de pequeno porte. O resultado desta pesquisa provou ser possível formar cânions submarinos, a partir do processo de surgência de água subterrânea.

Buffon (2018), utilizando um canal bidimensional de inclinação variável de 4 m de comprimento, avaliou a pertinência da aplicação de conceitos de capacidade de transporte e de competência do escoamento às correntes de turbidez. Como produto, concluiu-se que os conceitos de competência de escoamento e de capacidade de transporte não foram capazes de refletir o diâmetro característico do sedimento

transportado pelas correntes simuladas e a capacidade máxima de transporte desses fluxos, como normalmente ocorre em escoamentos fluviais.

As pesquisas sobre formas de fundo continuaram e Koller (2020), através da simulação física em um canal bidimensional de 18 m de comprimento, avaliou se as correntes de densidade salinas podem ser utilizadas para substituir as correntes de turbidez, com relação aos processos hidráulicos e sedimentológicos, além, da habilidade de geração e desenvolvimento de formas de fundo de mesmo tipo e dimensões.

Cerqueira (2022) avaliou os efeitos de obstáculos no controle de correntes de turbidez em um canal de 2 m de comprimento.

As pesquisas desenvolvidas no NECOD que envolvem correntes de densidade, assim como em outros laboratórios, se concentraram principalmente em análises unidirecional ou bidimensional. Das 18 pesquisas realizadas por alunos de pós-graduação deste grupo de pesquisa, em nível de mestrado e doutorado, cinco trabalhos utilizaram tanques tridimensionais, sendo eles Manica (2002), Del Rey (2006), Guirro (2008), Fick (2015) e Boffo (2018). Este trabalho é o sexto da história do grupo a fazer este tipo de análise e o primeiro a focar no estudo direto dos lobos turbidíticos.

5.4.3 Balanço dos estudos de corrente de densidade

A simulação física tem por objetivo explorar o máximo de informações em um ambiente controlado, de modo a compreender os fenômenos e as relações de causa e efeito. Após isso, relaciona-se os conhecimentos adquiridos em laboratório com observações do ambiente natural e trabalhos de campo. Neste contexto, ao longo do desenvolvimento deste trabalho, observou-se que há uma lacuna a ser melhor explorada, dado que os experimentos físicos que envolvem corrente de turbidez geralmente apresentaram foco no depósito, ficando o fluxo responsável por tal acúmulo de sedimentos em segundo plano.

A formação dos lobos turbidíticos geralmente ocorrem em regiões desconfiadas. Diante disso, ao realizar simulações físicas em tanques tridimensionais, é de grande importância mensurar as características do fluxo e depósito de maneira tridimensional, ou seja, nos eixos longitudinais da região central e lateral. Contudo, esta última região é pouco investigada na simulação física, o que requer que novas pesquisas avancem nessa região. Além disso, algumas técnicas

empregadas para medições em canal bidimensional ainda precisam de adaptação para os experimentos tridimensionais, de modo a contribuir com posteriores análises de feições sedimentares em estudos de campo.

Observou-se que a bibliografia dos trabalhos que se utilizou simulação física com correntes de turbidez apresenta, de maneira geral, baixo volume de medições e divulgação dos dados medidos. Isto impede que novos trabalhos ao proporem novos modelos tenham maiores volumes de dados para ser empregados para validação.

Neste cenário, o presente trabalho foi idealizado de modo a propor experimentos que, no âmbito da simulação física, tenham maior detalhamento das características das correntes de turbidez formadoras dos lobos turbidíticos, maior descrição das estruturas deposicionais na esfera tridimensional, uso de técnicas até então empregadas majoritariamente em canais bidimensionais, divulgação de medições que possam auxiliar em futuros trabalhos. Com isso, espera-se contribuir com as interpretações obtidas em trabalhos de campo com possível aplicação na indústria.

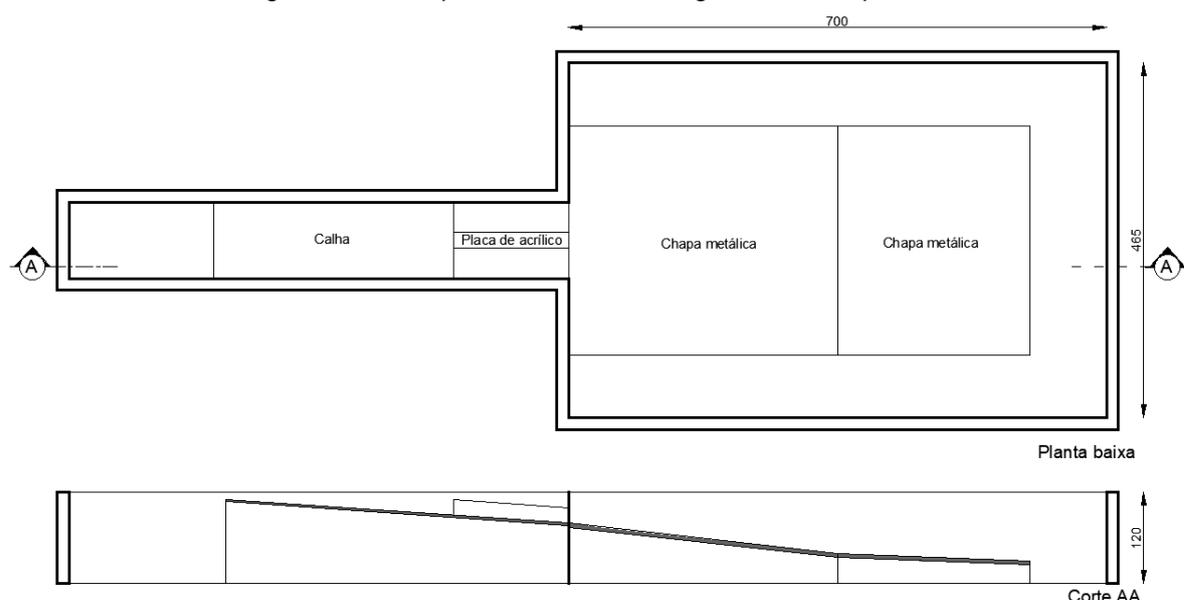
6 APARATO EXPERIMENTAL E EQUIPAMENTOS

Neste item será apresentado e caracterizado o aparato experimental utilizado para a realização dos ensaios e os equipamentos empregados para coleta de dados.

6.1 INSTALAÇÕES FÍSICAS E CONFIGURAÇÃO DO TANQUE

Na realização dos ensaios foi utilizado um canal tridimensional de geometria simplificada localizado no pavilhão fluvial do Instituto de Pesquisas Hidráulicas – IPH da Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS. Este tanque apresenta as dimensões conforme na Figura 12, possui volume de 46 m³ e conta com uma parte confinada, chamada canal e outra desconfinada chamada bacia, de modo a representar uma configuração natural de um rio desembocando em um delta e chegando na plataforma continental.

Figura 12 – Tanque tridimensional de geometria simplificada

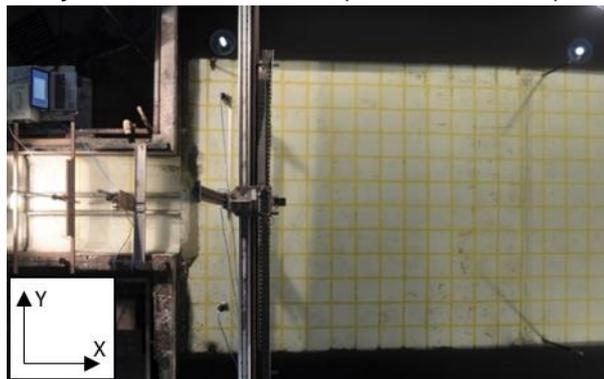


Fonte: Autor (2023)

Dentro da parte confinada do tanque há uma calha, na qual foram instaladas duas placas de acrílico, com o objetivo de evitar que haja dispersão da mistura injetada antes do desconfinamento do canal. Estas placas de acrílico possuem 150 cm de extensão e estão distanciadas 15 cm, o que equivale à largura do difusor de injeção utilizado. No seu interior, foram realizadas marcações junto ao fundo, espaçadas a cada 50 cm, com o objetivo de facilitar a instalação dos instrumentos de medição e auxiliar na coleta de dados desta região.

Já na parte desconfiada, há duas chapas de metal de dimensões 350 x 300 e 250 x 300 cm, as quais possuem inclinação ajustável por meio de barras roscadas. As chapas metálicas foram pintadas de branco e foi feito um quadriculado com espaçamento de 23 cm para facilitar o acompanhamento e avanço da corrente de densidade, conforme Figura 13.

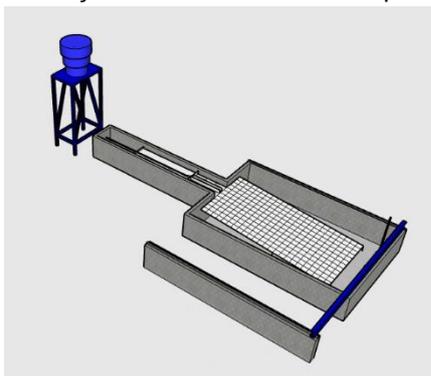
Figura 13 – Marcações realizadas nas chapas metálicas da parte desconfiada



Fonte: Autor (2023)

Sobre a região da bacia do tanque, há um sistema de varredura a laser automatizada do plano XY (Figura 13), composta por uma viga metálica de 700 cm de comprimento apoiada sobre trilhos que, e por meio de motores e um sistema de controle (*softwares*) permite o registro da topografia gerada de maneira automatizada a cada milímetro. Nesta viga, há uma haste metálica vertical, que é fixada em uma barra rosqueada, que permite a fixação de equipamentos pontuais, permitindo realizar leituras na direção Z. Visto que o comprimento da viga é maior que a largura do canal, que é de 465 cm, há uma parede auxiliar distanciada sete metros de uma das laterais do tanque, a qual serve de apoio para a outra extremidade da viga. A configuração do tanque, com a parede auxiliar e a viga de ferro é representada na Figura 14.

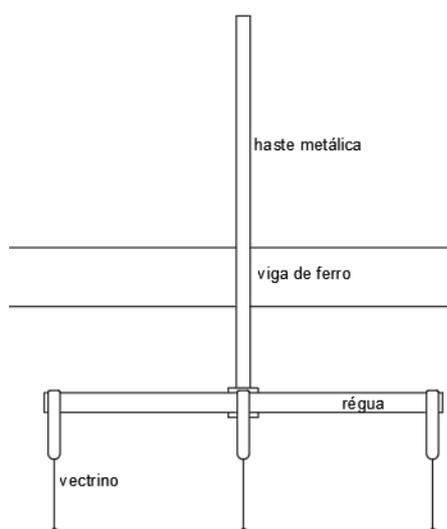
Figura 14 – Representação tridimensional do tanque utilizado no ensaio



Fonte: Autor (2023)

Na haste metálica, na extremidade inferior, há furos que permitem a instalação de distanciômetro a laser - instrumento utilizado para realizar a leitura do fundo das placas do tanque ou; régua de alumínio - dispositivo utilizado para fixar ADV-Vectrinos, equipamento que fornece velocidade em um determinado ponto (ver item 6.2). Essa régua de alumínio foi empregada nas etapas 1 e 2 deste trabalho (ver item 7.4). A Figura 15 apresenta o esquema da instalação da régua, contendo os ADV-vectrinos, com a haste metálica e viga de ferro, utilizados nas etapas 1 e 2 do presente trabalho.

Figura 15 – Estrutura em que foi instalado os vectrinos utilizados nas etapas 1 e 2 do trabalho



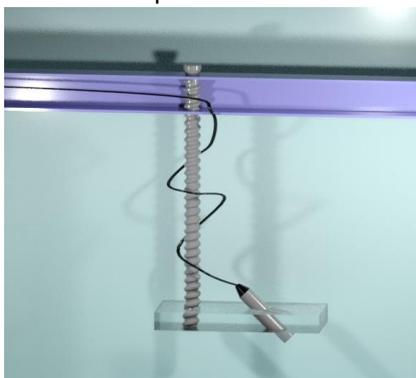
Fonte: Autor (2023)

Nas etapas 3, 4 e 5 (ver item 7.4), a régua de alumínio com ADV's foi substituída por quatro vigas metálicas que se apoiaram diretamente nas paredes laterais do tanque de ensaio. Conforme esquematizado na Figura 16, em cada viga metálica foram fixadas barras roscadas com suporte para colocação de transdutores (*probes*)

que foram conectadas ao UVP - equipamento que instalado 45° em relação ao fluxo fornece o perfil vertical de velocidade.

Um reservatório auxiliar com capacidade de 5000 litros, localizado à montante do tanque (Figura 14), foi utilizado para preparação e armazenamento das misturas de água e carvão. Este reservatório encontra-se em uma plataforma de 320 cm acima do fundo do tanque utilizado, sendo que as misturas chegaram ao tanque por gravidade.

Figura 16 – Estrutura em que foram instalados os transdutores



Fonte: Silva. Acervo pessoal

O reservatório auxiliar é conectado ao tanque de ensaio por meio de tubulação de PVC de 25 mm. Esta tubulação é conectada ao fundo do reservatório através de um orifício, no qual foi acoplado um registro esfera também de 25 mm. A jusante deste registro, há um medidor de vazão. Após este, foi instalado um tê de desvio com um registro esfera (15 mm) em uma das extremidades, que permite a coleta da amostra de mistura utilizada nos ensaios. No final das tubulações há um terceiro registro antes da ligação com o difusor (25 mm) que foi utilizado para garantir que não houvesse qualquer tipo de escoamento/ vazamento oriundo do reservatório após o término do ensaio.

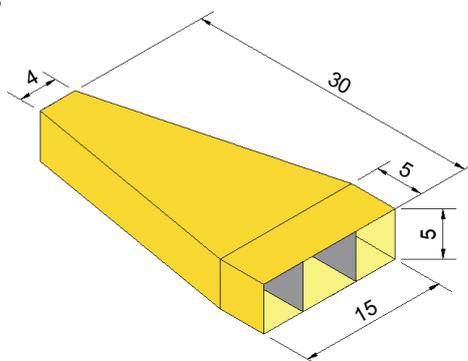
Foi utilizado um difusor com bocal retangular e dimensões apresentadas na Figura 17. Este difusor apresenta duas guias de correntes para se evitar a formação de gradiente positivo de pressão⁴ junto as paredes do mesmo. A instalação foi feita a

⁴ As guias de corrente servem para guiar o fluxo, contribuindo para que ocorra o máximo preenchimento do volume interno do difusor pelo escoamento, evitando que haja estrangulamento da corrente. O gradiente positivo de pressão deve ser evitado pois, pode causar redução da velocidade do escoamento, favorecendo a sedimentação de partículas dentro do difusor.

1,5 m antes do desconfinamento do canal, com o objetivo de reduzir quaisquer efeitos do jato de injeção (FERREIRA, 2013), caso viessem a ocorrer.

O nível de água no tanque de ensaio foi controlado por meio de uma calha de drenagem instalada no interior do tanque, junto à parede final, que permanecia com registros abertos durante todo o tempo para propiciar a drenagem do excesso de água. Esta calha foi montada sobre duas barras roscáveis, o que permite sua movimentação vertical, e o controle do nível de água no interior do tanque. O funcionamento desta calha é essencial para evitar transbordamentos durante a realização dos ensaios e manutenção do nível líquido durante todos os experimentos.

Figura 17 – Dimensões do difusor adotado



Fonte: Autor (2023)

Ao longo das paredes do tanque, junto ao fundo, há cinco aberturas, nas quais estão conectadas tubulações de saída em PVC de 32 mm, que permitem a drenagem do tanque. Em cada tubulação de saída há um registro, os quais são ajustados de acordo com a velocidade que se deseja realizar o esvaziamento. Na parte externa do tanque, essas tubulações são conectadas em uma única tubulação de 50 mm, que conduz a mistura resultante do ensaio ou a água limpa drenada para reaproveitamento ou descarte.

6.2 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

Durante a realização dos ensaios foram empregados diferentes tipos de equipamentos, cuja marcas e modelos estão apresentados no Quadro 1, e que permitiram coletar o maior número possível de informações. Dentro do reservatório auxiliar, foi posicionado um agitador eletromecânico que é utilizado para homogeneizar a mistura utilizada no ensaio. Este agitador é composto de um motor

elétrico e quatro pás, as quais possuem rotação controlada por um inversor de frequência situado próximo ao tanque de ensaio. Este inversor de frequência possibilita modificar a intensidade da agitação, o que possibilita a manutenção dos sedimentos em suspensão durante todo o ensaio. Nos ensaios, o agitador ficou afogado com o objetivo de evitar a formação de vórtices.

A vazão foi mensurada e controlada por um medidor e controlador de vazão instalado na tubulação que liga o reservatório auxiliar ao tanque de ensaio. Para esse experimento, foi adaptado um sistema de abertura e fechamento do registro motorizado com o acionamento de dois botões. Um para aumentar a vazão injetada e outro para diminuir a vazão injetada. Assim, o controle de vazão foi realizado de maneira manual, através desses dois botões, com o acompanhamento do resultado que era disponibilizado e registrado (com uma taxa de 1 Hz) em um computador conectado ao medidor de vazão eletromagnético. Além de medir a vazão, o medidor indicava o volume de material injetado. Foram utilizados dois medidores de vazões ao longo dos ensaios, um com limite máximo de leitura em $35 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$, e outro com limite de vazões de $50 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$.

Nas etapas 1 e 2, as velocidades da corrente de densidade foram medidas por meio do equipamento *Acoustic Doppler Velocimetry* - ADV, também conhecido como Vectrino. Este aparelho fornece a velocidade nas direções X, Y e Z em um ponto situado a 5 cm abaixo da extremidade inferior do centro do sensor. Foram utilizados quatro ADVs, sendo um instalado na parte confinada do tanque, a um metro do difusor, e os demais na parte desconfinada, na régua fixada na haste metálica, conforme Figura 15. Os ADVs foram conectados a dois computadores e, por meio do software do fabricante, foi possível saber em tempo real a velocidade da corrente de densidade em um determinado ponto, bem como a altura da medição em relação a chapa metálica.

Nas etapas 3, 4 e 5, utilizaram-se dois medidores de perfil de velocidade ultrassônico (*Ultrasonic Doppler Velocity Profiler* – UVP) de 2 MHz. Em cada um destes equipamentos, foi conectado 12 transdutores que realizam a medição do perfil vertical de velocidades. Estes transdutores emitem pulsos ultrassônicos que, ao atingirem partículas presentes no meio analisado, tem parte de sua energia dispersada, voltando como eco atenuado (WONGSAROJ et al., 2018).

Quadro 1 – Aparato experimental utilizado nos ensaios

Equipamento	Marca e modelo	Objetivo do uso
<i>Acoustic Doppler Velocimetry</i> - ADV	Nortek	Obtenção da velocidade nas direções x e y, em um determinado ponto
Agitador eletromecânico	-	Homogeneização a mistura
Analizador de partículas a laser	Cilas 1180	Realização de ensaios de granulometria
Câmera fotográfica	Nikon, modelo D500018-55 mm com resolução de 12,3 megapixel	Registro do desenvolvimento da corrente de densidade após o desconfinamento do canal
Ecógrafo ultrassônico	General Electric, modelo LOGIQ α 100 MP TM	Acompanhamento da sedimentação de partículas de carvão na parte confinada do canal
Estufa digital	Solid Steel	Secagem das amostras da mistura utilizada nos ensaios
Impressora 3D	Flashforge, modelo Creator Pro 2	Impressão de dispositivos utilizados para coleta de amostra em diferentes alturas da corrente de turbidez
Medidor de distância a laser ótico	MD250 ADV	Medição da topografia do depósito
Medidor eletromagnético e controlador de vazão	Siemens MAG6000	Registro da vazão de injeção da mistura durante a realização do ensaio
<i>Ultrasonic Doppler Velocity Profiler</i> - UVP	Met-Flow S.A.	Obtenção da velocidade nas direções x e y, ao longo da vertical.
<i>Ultra High Concentration Meter</i> - UHCM	Delft hydraulics	Medição de concentração em um determinado ponto
Balança de alta precisão, cronômetro, holofotes, trena, termômetro.	-	Auxiliar os demais equipamentos

Fonte: Autor (2023)

A sedimentação de partículas na parte confinada foi acompanhada por meio de um ecógrafo ultrassônico. Este equipamento funcionou como um scanner por ultrassom, permitindo a visualização do interior da corrente e da evolução temporal da deposição dos sedimentos e do aumento da espessura do depósito na parte confinada do tanque. O ecógrafo ultrassônico foi instalado a 50 cm do difusor e também permitiu a escolha do sedimento a ser utilizado (etapa de ajustes e teste), uma vez que os sedimentos com grãos maiores sedimentaram em sua maioria na parte confinada do tanque.

A concentração da corrente de turbidez foi medida através de amostras coletadas por sifões conectados a uma peça feita sob medida em impressora 3D. Conforme esquematizado na Figura 18, essa peça possui orifícios em cinco diferentes alturas e quando apoiada em alguma base permite a coleta de materiais nas alturas 0,5; 1,0; 2,5; 5 e 10 cm. A validação dessa metodologia para determinação da

concentração foi realizada através da comparação com dados obtidos por um UHCM instalado no final do trecho confinado.

Figura 18 – Representação da peça utilizada para coletar amostras em diferentes alturas



Fonte: Autor (2023)

O avanço da corrente de densidade foi registrado por meio de uma câmera fotográfica instalada em uma passarela localizada em um nível superior ao tanque de ensaio. A câmera foi programada para realizar fotografias de maneira automática a cada cinco segundos e seu posicionamento foi escolhido de maneira a registrar preferencialmente a parte do desconfinamento do canal. Holofotes foram posicionados no entorno do tanque de ensaio para auxiliar na iluminação e melhorar a visualização do avanço da corrente de densidade, contribuindo com a qualidade das imagens captadas pela câmera fotográfica.

A topografia dos depósitos na parte desconfinada foi medida por meio de um medidor de distância a laser com precisão de 0,1 mm. Este equipamento foi parafusado na haste metálica fixada a viga de ferro, e conectado a um computador. A leitura da topografia ocorre por meio de linhas equidistantes, com distância previamente definida em 1 cm. O produto desta leitura gera arquivos com as coordenadas X, Y e Z da região medida, sendo que Z corresponde à altura do depósito até o medidor de distância a laser.

Para a análise de granulométrica das amostras coletadas do depósito e dos sifões, foi utilizado o analisador de partículas a laser, que mede, através de um método ótico, o tamanho de partículas de 4 a 2500 micra.

A secagem de amostras para determinação de concentração das amostras coletadas pelos sifões foi feita em estufa digital, com temperatura interna de 90°C. O tempo que as amostras ficavam dentro deste equipamento variava em função do

volume de material coletado. Outros equipamentos foram utilizados na realização dos ensaios, como balança de alta precisão, cronômetros, termômetros e trenas. Estes equipamentos foram utilizados para auxiliar os equipamentos descritos anteriormente.

7 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste item serão abordados os parâmetros adotados nos ensaios realizados, o material utilizado na mistura de injeção, metodologia experimental no pré-ensaio, ensaio e pós-ensaio e, avaliação das características dos depósitos.

7.1 ENSAIOS REALIZADOS

O plano de realização dos ensaios deste trabalho foi dividido em cinco etapas: 1) ajustes e testes; 2) variação de vazão sem quebra de declividade na transição entre a região confinada e desconfiada; 3) variação da vazão com quebra de declividade; 4) variação da concentração com quebra de declividade e; 5) variação da declividade do canal confinado com quebra de declividade. Na Tabela 1 são apresentadas as características adotadas para a realização de cada ensaio.

Tabela 1 - Ensaios realizados e, parâmetros adotados

Etapa	Ensaio	Carvão utilizado	Vazão prevista (L.min ⁻¹)	Tempo de ensaio (min)	Concentração volumétrica calculada da mistura	Inclinação do canal confinado	Inclinação das chapas do canal desconfiado
1	ET 1	210	30	12	5%	2,5°	9,8°
1	ET 2	210	35	14	5%	2,5°	9,8°
1	ET 3	210	35	15	3%	4°	4°
1	ET 4	205	30	35	3%	4°	4°
1	ET 5	205	35	45	5%	4°	4°
1	ET 6	205	30	50	5%	4°	4°
1	ET 7	SR	30	60	5%	4°	4°
2	E10	SR	10	60	5%	4°	4°
2	E30	SR	30	60	5%	4°	4°
2	E40	SR	40	60	5%	4°	4°
3	EA 15	SR	15	60	5%	4°	0°
3	EA 30	SR	30	60	5%	4°	0°
*3,4,5	EA 45	SR	45	60	5%	4°	0°
4	EB 1	405	45	60	1%	4°	0°
4	EB 10	405	45	60	10%	4°	0°
4	EB 15	405	45	60	15%	4°	0°
5	EC 2	405	45	60	5%	2°	0°
5	EC 3	405	45	60	5%	3°	0°
5	EC 5	405	45	60	5%	5°	0°

* O ensaio EA 45, por apresentar parâmetros que permitem serem enquadrados nas etapas 3, 4 e 5, foi nomeado de EA 45, EB 5 e EC 4, quando analisado como pertencentes a etapas 3, 4 e 5, respectivamente.

Fonte: Autor (2023)

Na primeira etapa, o objetivo foi definir a metodologia experimental a partir da escolha do material granular, da seleção de equipamentos e instrumentos, além da

definição de metodologia e dos testes iniciais. A etapa 2 consistiu em verificar o comportamento das correntes de densidade, com diferentes valores de vazão, na região de desconfinamento, sem a presença da quebra de declividade entre a região confinada e a desconfinada. Com estes ensaios, buscou-se também verificar, para as vazões e declividade empregadas, se o desconfinamento, por si só, seria capaz de produzir ressaltos hidráulicos. Na etapa 3, através da inserção da quebra de declividade (declividade nula da região desconfinada), analisou-se os impactos da quebra de declividade na caracterização hidrodinâmica na formação dos lobos turbidíticos e modificações hidrodinâmicas do escoamento. Além disso, foi verificado se o desconfinamento juntamente com a quebra de declividade seria capaz de gerar ressaltos hidráulicos na região de transição canal-lobo.

Na etapa 4 foi objeto de estudo o impacto que a variação na concentração da mistura injetada apresentaria sobre a caracterização hidrodinâmica na formação de lobos turbidíticos. Nessa etapa, foi empregado concentração de 1% para simbolizar um aporte fluvial e, 10 e 15% para representar condições de fluxo mais concentrado. A última etapa foi a 5 e teve por objetivo avaliar a interferência que a inclinação da região confinada tem na formação dos lobos turbidíticos. Diante disso, a inclinação da região confinada oscilou entre 2 e 5°, permitindo verificar as consequências geradas.

As vazões empregadas e a concentração utilizada nas diferentes etapas foram baseadas em ensaios já realizados no laboratório que utilizaram o mesmo tanque para ensaios (Manica, 2002; Del Rey, 2005; projeto Lobos I, 2007; projeto Lobos II, 2012). Nestes trabalhos, as concentrações volumétricas variaram entre 4 e 35% e as vazões de ensaios variaram de 5 a 50 L.min⁻¹.

7.2 MATERIAL UTILIZADO NA MISTURA DE INJEÇÃO

Devido sua variabilidade, granulometria, menor densidade, disponibilidade e preço, o sedimento utilizado para elaboração da mistura para a realização dos ensaios foi o carvão mineral, oriundo de jazidas de Santa Catarina – Brasil. Dentre os diversos tipos de características do carvão mineral disponíveis no NECOD, foram realizados testes (Etapa 1) visando determinar qual deles se adequava melhor para os testes propostos.

Inicialmente três tipos de carvões com diferentes granulometrias, os quais foram denominados de 205, 210 e “sem rótulo”, foram pré-selecionados para realização dos experimentos. Estas nomenclaturas foram utilizadas baseados nos

códigos indicados nas embalagens desse produto comercial. Posteriormente, para iniciar a Etapa 4, foi necessário adquirir mais material e, devido à indisponibilidade do mesmo material utilizado anteriormente, foi adquirido carvão que foi denominado de 405. Na Figura 19 e na Tabela 2 são apresentados a curva granulométrica e o histograma e; os diâmetros dos diferentes tipos de carvão analisados. No apêndice A é apresentado o resultado dos ensaios de granulometria destes quatro carvões e seus parâmetros estatísticos. Conforme indicado na Figura 19, os carvões 205 e 405 são os que possuem granulometria com intervalo mais extenso. Já o carvão sem rótulo é o que apresenta grãos mais selecionados, indicado pela alta curvatura da distribuição granulométrica.

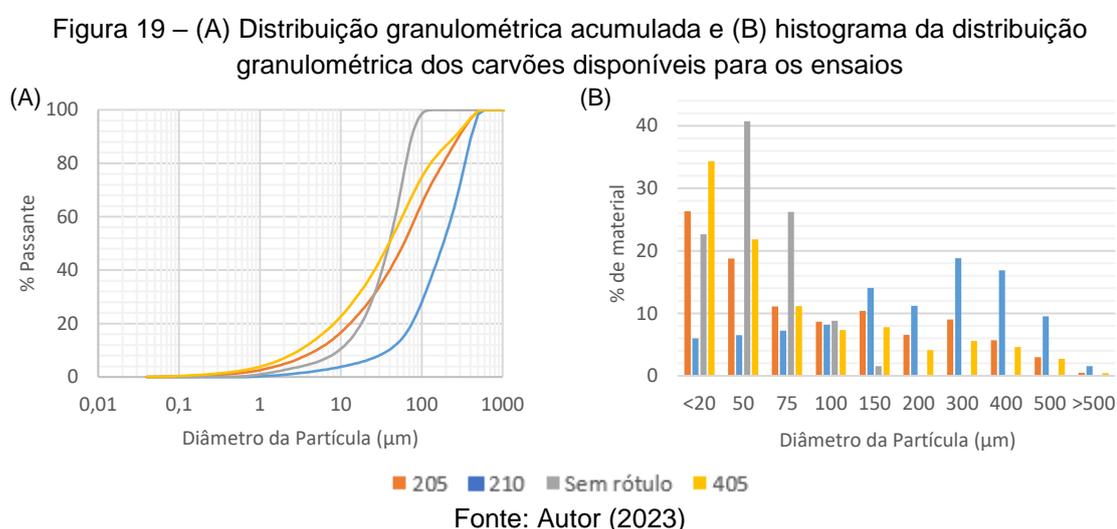


Tabela 2 – Diâmetros dos carvões disponíveis para ensaio

	Carvão 205	Carvão 210	Carvão sem rótulo	Carvão 405
D ₁₀ (μm)	5,01	39,12	9,80	3,08
D ₅₀ (μm)	60,47	184,72	39,80	39,44
D ₉₀ (μm)	288,00	411,46	74,72	257,92
D _{médio} (μm)	117,83	211,77	41,44	100,15

Fonte: Autor (2023)

Na Etapa 1 foram realizados ensaios com três tipos de carvões (205, 210 e sem rótulo), contudo, as misturas que continham carvões do tipo 205 e 210 não obtiveram resultados satisfatórios devido a uma sedimentação acentuada na região da calha, antes do desconfinamento do canal. A sedimentação dos grãos de carvões do tipo 205 e 210 ocorreu de maneira tão rápida que, em muitos casos, o ensaio teve que ser interrompido antes dos primeiros 15 minutos devido ao transbordamento de carvão

sobre as chapas de acrílico na seção confinada, conforme Figura 20. No total foram realizados sete ensaios com estes materiais variando a concentração e/ ou vazão de injeção da mistura, buscando transportar esse material a regiões mais a jusante, porém, os seis primeiros não tiveram sucesso, diferenciando apenas a localização do extravasamento que oscilou de 50 cm a 10m cm do difusor.

Figura 20 – Acúmulo de depósito formado junto ao difusor quando utilizado carvão do tipo 205 e 210



Fonte: Autor (2023)

No sétimo ensaio foi utilizado o carvão denominado de “sem rótulo”, o qual apresenta maior quantidade de partículas finas. O uso deste material proporcionou uma sedimentação menor na parte confinada do canal mesmo após 60 minutos de ensaio e, por isso, foi o material adotado nos experimentos das três primeiras etapas. Ao longo deste trabalho, a nomenclatura deste carvão poderá ser abreviada em SR.

A partir da Etapa 4, com o fim do carvão SR e com a compra do carvão 405, este passou a ser adotado, uma vez que entre os carvões disponíveis para ensaio, esse é o que apresentava D_{50} mais próximo do SR.

O cálculo da concentração volumétrica da mistura foi realizado conforme roteiro localizado no Apêndice B.

7.3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL: PRÉ-ENSAIO

A metodologia experimental iniciou-se com uma etapa de preparação, intitulada pré-ensaios. A mistura de sedimentos e água eram preparadas e colocadas no reservatório auxiliar, os instrumentos e equipamentos eram instalados e posicionados, e o tanque enchido com água até 20 cm abaixo da cota máxima, que é a altura do tanque (120 cm).

Na região da calha do tanque (trecho confinado) foi instalado a 50 cm do difusor a sonda do ecógrafo ultrassônico, a 100 cm do difusor um ADV e, a 130 cm uma sonda de medição do UHCM. A sonda do ecógrafo de ultrassom foi instalada cerca de 12 cm do fundo da calha. Já o ADV foi posicionado a 6 cm do fundo da calha, visto que a leitura ocorre 5 cm abaixo dos sensores, ou seja, nesta posição fornecia o valor da velocidade a 1 cm do fundo. A sonda de medição do UHCM foi instalada 2,5 cm do fundo da calha.

Uma vez que o uso do ADV teve por objetivo obter velocidades em diferentes alturas, visando a formação de um perfil vertical de velocidades, esse medidor foi fixado em um suporte metálico que continha uma manivela que permitiu ajustar a altura em que se desejava realizar a determinação da velocidade.

Nas etapas 1 e 2 dos ensaios, na região da bacia, foram instalados três ADVs em uma régua metálica de dois metros, um no meio e os outros nas extremidades, conforme Figura 21. A régua com os vectrinos foi posicionada a 50 cm do início do desconfinamento, os quais também foram inicialmente instalados a 6 cm do fundo. O vectrino do meio da régua teve por objetivo realizar a leitura da velocidade do fluxo na linha central do desconfinamento. Já os vectrinos da extremidade da régua, fizeram a leitura da velocidade nas posições transversais à corrente.

Figura 21 – Estruturação dos ADVs nas etapas 1 e 2

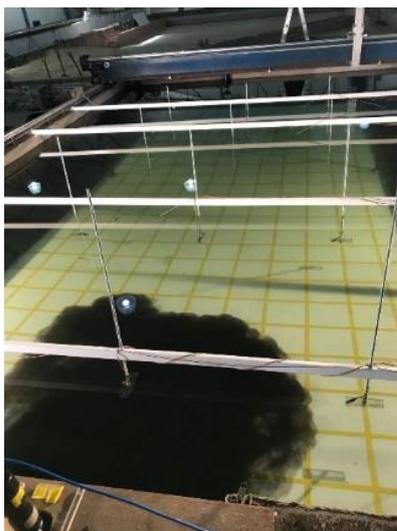


Fonte: Autor (2023)

Nas etapas 3, 4 e 5, na região da bacia foram instaladas quatro vigas metálicas removíveis, nas quais foram instalados os transdutores do UVP, conforme Figura 22.

Além disso, nessas etapas foram instaladas, em uma viga metálica, três peças utilizadas para coletar amostras da corrente em diferentes alturas que, posteriormente, foram utilizadas para determinação da concentração na região na linha central do desconfinamento e, nas extremidades distantes 100 cm da linha longitudinal central.

Figura 22 – Estruturação dos transdutores de UVP utilizados nas etapas 3, 4 e 5



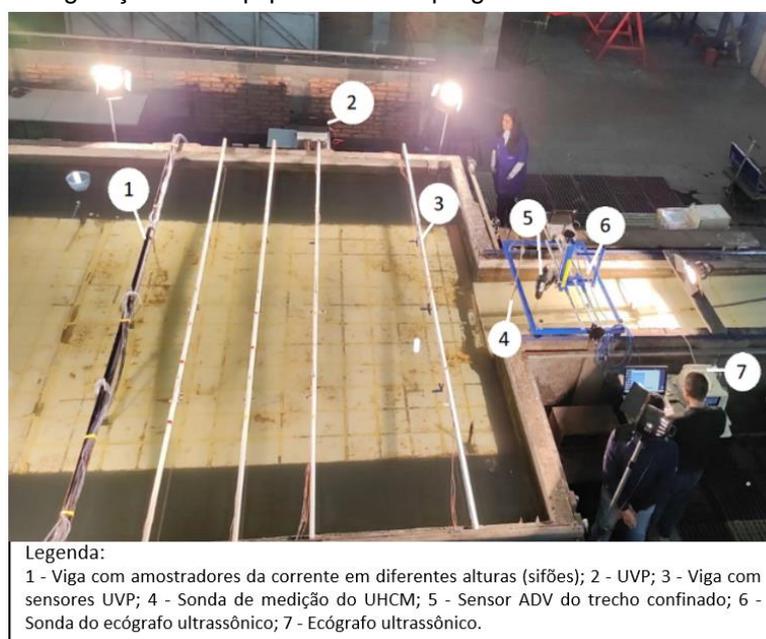
Fonte: Autor (2023)

Visto que as chapas de ferro da parte desconfiada e a calha do canal confinado impossibilitam a completa remoção e limpeza de carvão de ensaios anteriores junto ao fundo do tanque pois, ocupam quase toda a área do tanque, o enchimento do tanque foi realizado lentamente. Essa metodologia foi empregada de modo a evitar que a água ficasse turva e, conseqüentemente, atrapalhando o acompanhamento do desenvolvimento da corrente de densidade por meio de registro fotográfico. Sendo assim, foram utilizadas duas mangueiras de 15 mm, com vazões baixas, de modo que o processo de enchimento do tanque era lento, levando cerca de 48 horas por ensaio.

Após realizado todos os procedimentos e instalações da etapa de pré-ensaio, o agitador eletromecânico era ligado pelo menos 30 minutos antes do início do ensaio, havendo assim a homogeneização do carvão com a água do reservatório. Neste tempo, os computadores eram conectados no ecógrafo ultrassônico, os ADVs e UVPs ligados e conectados aos devidos *softwares*, e a altura de leitura dos equipamentos ajustadas. Além da medição da temperatura da água e da mistura. Na Figura 23 é

apresentado a configuração dos equipamentos empregados na realização dos ensaios das etapas 3, 4 e 5.

Figura 23 – Configuração dos equipamentos empregados nos ensaios das etapas 3, 4 e 5



Fonte: Autor (2023)

7.4 METODOLOGIA DOS ENSAIOS

O ensaio era iniciado por meio da abertura do registro esfera de 25 mm localizado na saída do reservatório auxiliar, concomitantemente ao início da gravação das imagens pelo ecógrafo e das fotografias sequenciais do ensaio.

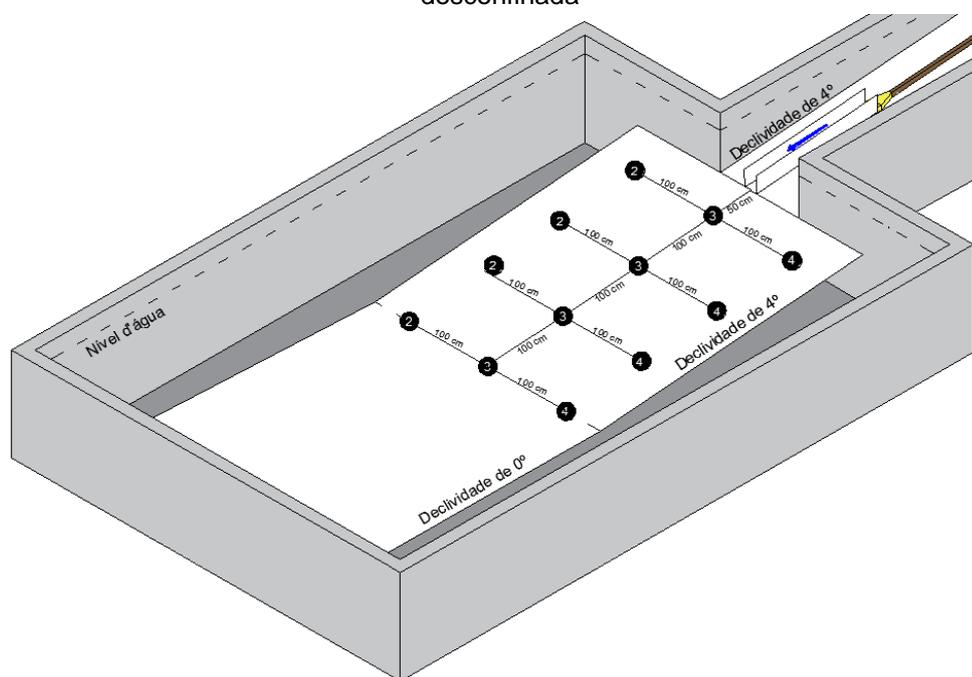
Amostras da mistura injetada no tanque de ensaio foram coletadas em média a cada dez minutos de ensaio. Esta coleta ocorreu através da abertura do registro de 15 mm, localizado na saída lateral do tê situado após o medidor de vazão. A primeira coleta da amostra de material (T1) foi realizada no início do experimento e, em geral, a cada 10 min de ensaio coletaram-se novas amostras. Sendo assim, as amostras T2, T3, T4, T5 e T6 foram obtidas nos tempos 10, 20, 30, 40 e 50 min, respectivamente. Esta coleta de material, teve por objetivo verificar a homogeneidade e a concentração da mistura ao longo do ensaio.

A leitura da velocidade da corrente iniciava-se quando a mistura passava pelo ADV localizado na parte confinada. Na parte confinada, a cada 2 min, aproximadamente, o ADV era elevado em 1 cm. Essa elevação possibilitou a

elaboração do perfil de velocidade vertical nas direções X e Y. Em média foram realizadas 10 leituras de velocidade na região confinada.

Nas etapas 1 e 2, os ADVs da parte desconfinaada foram elevados a cada 1,5 min, aproximadamente, totalizando sete leituras de velocidade, por aparelho, na posição 50 cm do desconfinamento. Após essas leituras, a viga de ferro, na qual estava fixada a régua metálica com os ADVs, era deslocada 100 cm para jusante, ou seja, 150 cm do início do desconfinamento, e as sete leituras refeitas e assim, sucessivamente nas posições 250 cm e 350 cm em relação ao início do desconfinamento. Na Figura 24 são apresentadas as posições em que foram medidas as velocidades ao longo da vertical, no trecho desconfinado, utilizando ADV. Nessa figura, a numeração nas posições em que foram realizadas as medidas representa a nomenclatura adotada para o vectrinos laterais e central. Ao final de cada ensaio obtinha-se 84 dados de velocidade, 28 por vectrinos. Após realizadas essas leituras, o ensaio era finalizado.

Figura 24 – Posições em que foram realizados a leitura da velocidade utilizando o ADV na região desconfinada

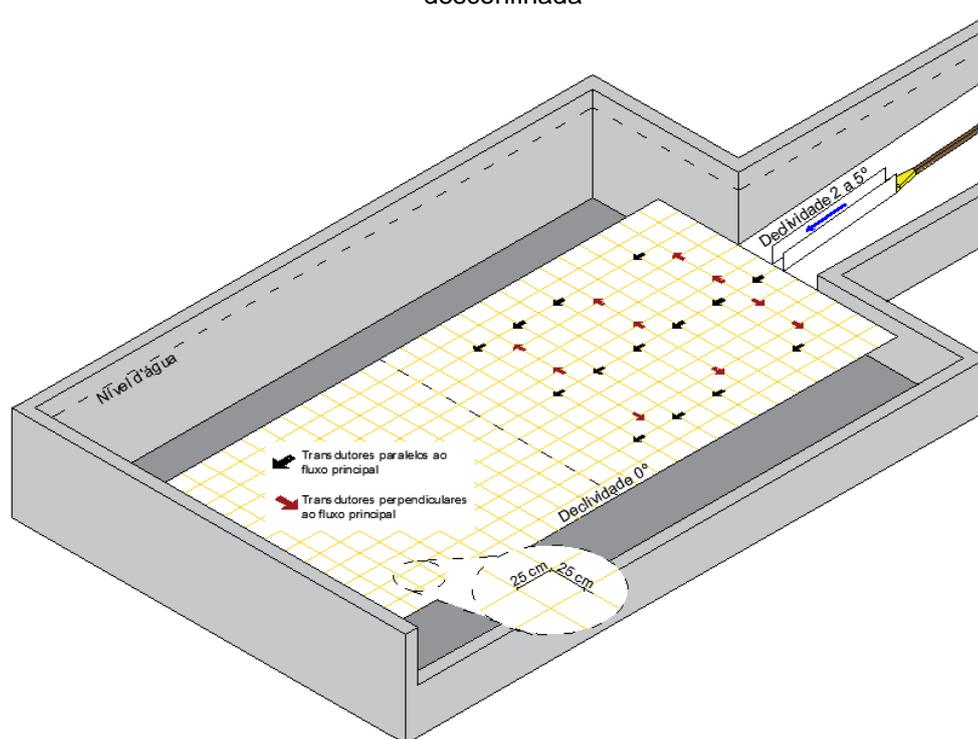


Fonte: Autor (2023)

Nas etapas de 3 a 5, os transdutores do UVP foram instalados com inclinação de 45° em relação ao eixo vertical e distante 50 cm do fundo. Diante disso, convencionou-se que o perfil de velocidade vertical corresponde a 25 cm do eixo

vertical em que o transdutor foi instalado. Foram posicionados 14 transdutores paralelos ao sentido principal do fluxo, sendo seis transdutores no eixo central e oito transdutores nas laterais, simetricamente divididos e distribuídos. Na direção perpendicular ao fluxo, foram posicionados dez transdutores de modo a obter o perfil de velocidade vertical da expansão da corrente. Na Figura 25 são apresentadas as posições em que foram medidas as velocidades ao longo da vertical, no trecho desconfinado, utilizando o UVP. Nessa imagem, os transdutores posicionados paralelamente e perpendicularmente a direção principal do fluxo estão representados pela cor preta e vermelha, respectivamente. Durante o ensaio, a velocidade do fluxo foi medida nos tempos de 0 a 10 min e de 50 a 60 min.

Figura 25 – Posições em que foram realizadas a leitura da velocidade utilizando o UVP na região desconfinada



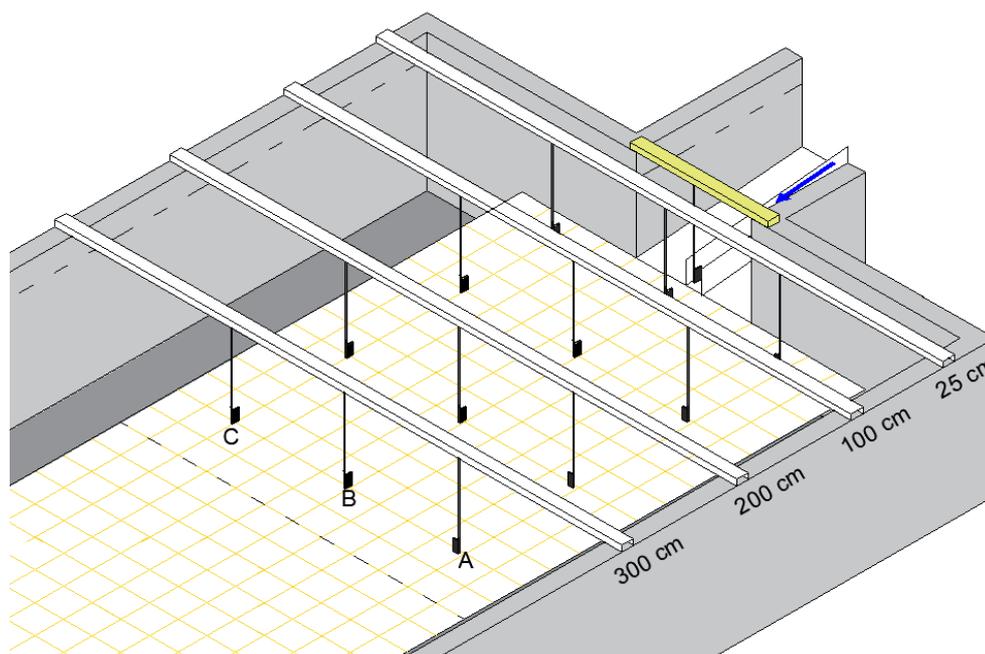
Fonte: Autor (2023)

No intervalo das medições de velocidades utilizando UVP, ou seja, entre 10 e 50 min, realizou-se a coleta de amostras da corrente utilizando os sifões para, posteriormente, realizar a análise da concentração da corrente de turbidez. As coletas iniciaram na distância 300 cm em relação ao início do desconfinamento, no eixo central e em 100 cm para a cada um dos lados (direita e esquerda), conforme Figura 26. Após a coleta das amostras nessa distância, a estrutura com as peças impressas

para coletar amostras em diferentes alturas (ver Figura 18) foi movida para a cota 200 cm, seguindo a rotina de coleta. Essa sequência ocorreu para as cotas 200, 100 e 25 cm em relação ao início do desconfinamento. Na região confinada, 5 cm antes do término deste trecho, também houve coleta de amostra da corrente de turbidez.

A coleta de amostra da corrente de turbidez no eixo central e uma das laterais (coletores B e C, respectivamente), bem como do trecho confinado, foram posicionadas paralelamente ao fluxo principal. Já o coletor A, foi posicionado perpendicularmente ao fluxo. Essa variação da posição dos coletores teve por objetivo avaliar possíveis interferências do posicionamento em que as coletas são feitas na determinação da concentração.

Figura 26 – Posições em que foram realizadas coletas da amostra da corrente de turbidez em diferentes alturas



Fonte: Autor (2023)

7.5 METODOLOGIA EXPERIMENTAL: PÓS-ENSAIO

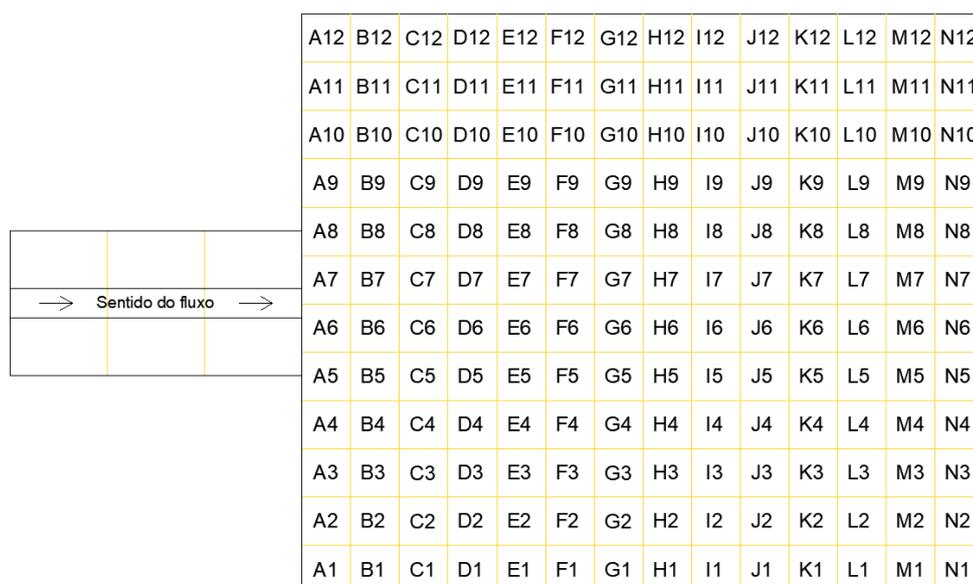
Após o término do ensaio, aguardou-se a completa sedimentação das partículas suspensas, o que levava geralmente 18 horas, para iniciar o esvaziamento do tanque. Este esvaziamento era bem lento, de forma a não ocasionar alterações nos depósitos formados. A duração média do esvaziamento do tanque foi de 72 horas.

As amostras da mistura coletadas ao longo do ensaio foram pesadas e levadas para a estufa para realização do cálculo da concentração nos diferentes tempos de ensaio e, posteriormente, a realização das análises granulométricas de cada amostra.

Finalizado o esvaziamento do tanque de ensaio, acoplou-se na haste metálica vertical, que é fixada na viga de ferro (ver Figura 15), o medidor de distância a laser ótico que fez a leitura da topografia na região desconfinada. Essas informações possibilitam comparações entre os ensaios, e análise da geometria do depósito. Após essa etapa, eram coletadas amostras do depósito em cada quadriculado/célula da chapa de ferro (ver Figura 13 e Figura 27) e realizaram-se as análises granulométricas desses materiais, de modo a comparar a sedimentação de partículas em diferentes pontos do tanque.

Com o objetivo de facilitar a identificação das amostras, foi nomeada a malha quadriculada semelhante a uma planilha de Excel, ou seja, as linhas receberam um número que variaram entre 1 e 13, e as colunas receberam letras de A a N, conforme Figura 27. Não foram coletadas amostras de sedimentos localizadas em distâncias superiores a 350 cm do início do desconfinamento, pois a altura do depósito formado foi praticamente nula.

Figura 27 – Representação esquemática da nomenclatura adotada no quadriculado da região desconfinada



A12	B12	C12	D12	E12	F12	G12	H12	I12	J12	K12	L12	M12	N12
A11	B11	C11	D11	E11	F11	G11	H11	I11	J11	K11	L11	M11	N11
A10	B10	C10	D10	E10	F10	G10	H10	I10	J10	K10	L10	M10	N10
A9	B9	C9	D9	E9	F9	G9	H9	I9	J9	K9	L9	M9	N9
A8	B8	C8	D8	E8	F8	G8	H8	I8	J8	K8	L8	M8	N8
A7	B7	C7	D7	E7	F7	G7	H7	I7	J7	K7	L7	M7	N7
A6	B6	C6	D6	E6	F6	G6	H6	I6	J6	K6	L6	M6	N6
A5	B5	C5	D5	E5	F5	G5	H5	I5	J5	K5	L5	M5	N5
A4	B4	C4	D4	E4	F4	G4	H4	I4	J4	K4	L4	M4	N4
A3	B3	C3	D3	E3	F3	G3	H3	I3	J3	K3	L3	M3	N3
A2	B2	C2	D2	E2	F2	G2	H2	I2	J2	K2	L2	M2	N2
A1	B1	C1	D1	E1	F1	G1	H1	I1	J1	K1	L1	M1	N1

Fonte: Autor (2023)

Na região confinada, também foi medida a altura do depósito formado, porém, de forma manual, através de medição com uma régua milimétrica. Após essas

medições, materiais foram coletados e submetidos a ensaios granulométricos. A análise deste depósito será descrita com maior detalhe no item 7.6 Avaliação das características do depósito.

Por fim, o tanque foi limpo e todos os arquivos do ensaio foram tratados para que fosse possível a análise e comparação entre ensaios. Estes procedimentos foram repetidos a cada ensaio realizado.

Visando facilitar o entendimento das medições de velocidade, concentração, topografia e de distribuição granulométrica ao longo do tanque de ensaio, mapas de contorno foram elaborados no *software* Surfer 23.3.202. Neste foi adotado o método de krigagem para realizar as interpolações e estimar os valores de uma variável em local não amostrado, a partir de valores de locais amostrados. Segundo Embrapa (2001), o método de krigagem usa a dependência espacial entre amostras vizinhas para estimar valores em qualquer posição dentro de um campo, com erro de estimação nulo.

7.6 AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DO DEPÓSITO

As análises granulométricas das partículas depositadas na parte confinada foram realizadas em amostras coletadas nas distâncias 0; 25; 50; 75; 100; 125; 150 cm em relação ao difusor. Além disso, nas regiões em que a altura do depósito foi superior a 5 cm, realizou-se coleta de amostra em pelo menos duas alturas.

Na parte desconfinada, a análise granulométrica na direção longitudinal foi feita mediante análises das curvas de distribuição granulométrica nas linhas 3 - direita da injeção e 7 - eixo central (ver Figura 27). Já para a análise granulométrica na direção perpendicular ao fluxo, avaliou-se as colunas C (proximal), G (meio) e K (distal). As amostras de materiais dos demais quadriculados foram feitas e serão apresentadas na forma de mapa de contorno do diâmetro médio do depósito formado.

8 RESULTADOS E OBSERVAÇÕES

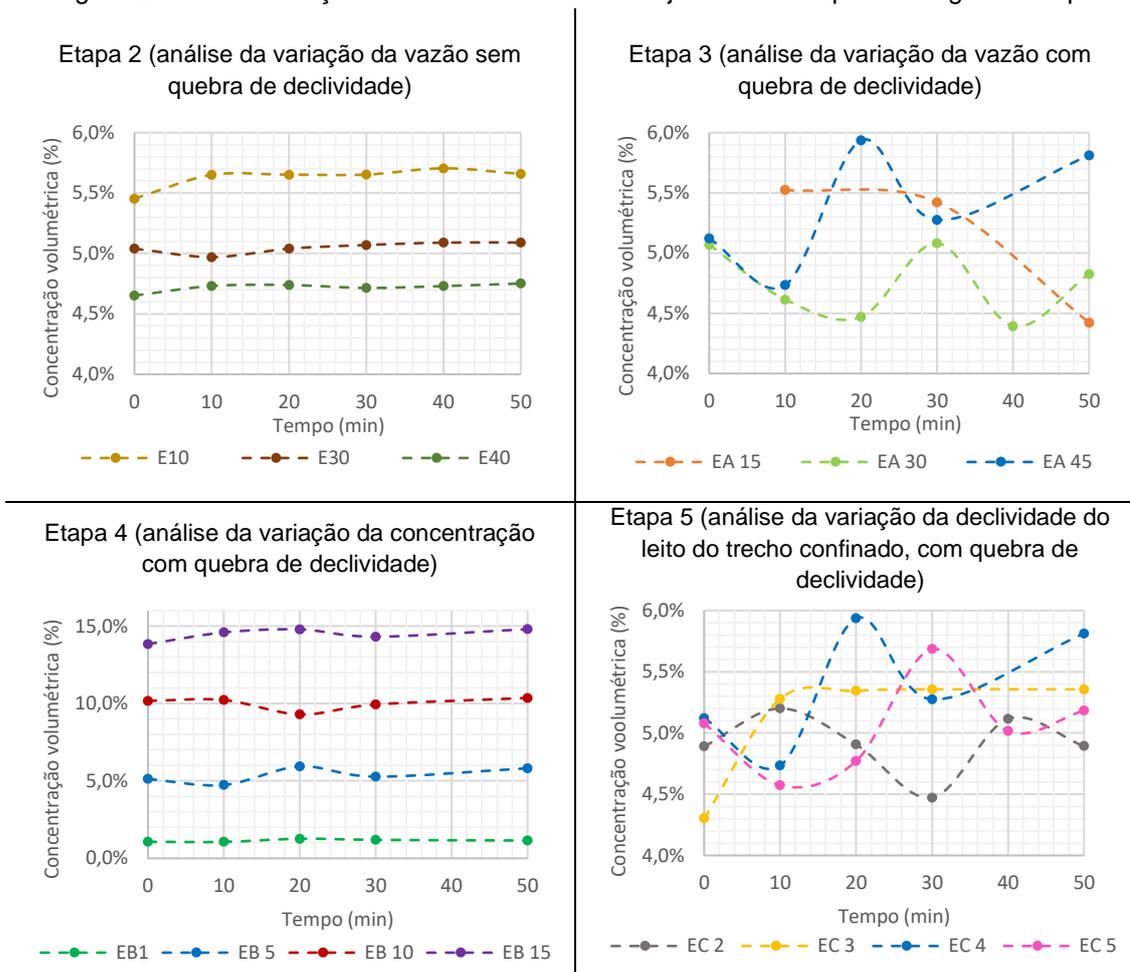
Os resultados e observações serão apresentados de acordo com o número da etapa. Uma vez que a Etapa 1 foi de ajustes e testes (uma etapa de adequações, com caráter mais qualitativo), não se realizaram ensaios de granulometria, registros fotográficos, medições de velocidades na parte desconfinada e cálculo de concentração no tanque. Diante disso, esse item conterá informações a partir da Etapa 2.

8.1 CONCENTRAÇÃO DA MISTURA INJETADA AO LONGO DO TEMPO

Na Figura 28 e Tabela 3 são apresentadas as concentrações medidas da mistura que foi injetada antes da entrada no tanque em pelo menos três diferentes instantes do ensaio. Com exceção dos ensaios EB 1, EB 10 e EB 15 nos quais as concentrações volumétricas almejadas foram de 1, 10 e 15%, respectivamente, nos demais ensaios as concentrações almejadas foram de 5%.

Pela análise do desvio padrão de cada ensaio (Tabela 3), pode-se afirmar que a concentração da mistura injetada apresentou baixa variação ao longo do tempo (máximo de 0,61%), o que garantiu uma homogeneidade ao longo do experimento. Quando comparadas a concentração almejada e a média medida, identificou-se uma diferença máxima de 0,64%, o que foi considerado satisfatória para simulação física.

Figura 28 – Concentração volumétrica da mistura injetada no tanque ao longo do tempo



Fonte: Autor (2023)

Tabela 3 – Concentrações volumétricas e desvio padrão ao longo do tempo

Etapa	Ensaio	$C_{\text{almeijada}}$	Concentração volumétrica ao longo do tempo						$C_{\text{média}}$	Desvio padrão
			0 min	10 min	20 min	30 min	40 min	50 min		
2	E10	5%	5,45%	5,65%	5,65%	5,65%	5,71%	5,66%	5,64%	0,09
2	E30	5%	5,04%	4,97%	5,04%	5,07%	5,09%	5,09%	5,05%	0,05
2	E40	5%	4,65%	4,73%	4,74%	4,71%	4,73%	4,75%	4,72%	0,04
3	EA 15	5%	-	5,53%	-	5,42%	-	4,42%	5,12%	0,61
3	EA 30	5%	5,07%	4,61%	4,47%	5,08%	4,39%	4,83%	4,74%	0,30
3, 4, 5	EA 45/ EB 5/ EC 4	5%	5,12%	4,73%	5,94%	5,28%	-	5,81%	5,38%	0,50
4	EB 1	1%	1,06%	1,06%	1,26%	1,19%	-	1,15%	1,15%	0,08
4	EB 10	10%	10,17%	10,22%	9,29%	9,93%	-	10,36%	10,04%	0,39
4	EB 15	15%	13,83%	14,59%	14,78%	14,31%	-	14,80%	14,52%	0,38
5	EC 2	5%	4,89%	5,20%	4,91%	4,47%	5,12%	4,89%	4,91%	0,25
5	EC 3	5%	4,30%	5,28%	5,34%	5,36%	-	5,36%	5,13%	0,46
5	EC 5	5%	5,08%	4,57%	4,77%	5,69%	5,02%	5,19%	5,05%	0,38

Fonte: Autor (2023)

8.2 VAZÃO MEDIDA DA MISTURA INJETADA

A Tabela 4 e a Figura 29 apresentam as séries temporais das vazões medidas e a vazão média da mistura injetada no tanque. De maneira geral, os valores médios medidos apresentaram valores muito próximos do inicialmente previsto, com variação em média da ordem de $\pm 2,4 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$. A realização do ajuste manual contribuiu para que esse valor ficasse mais restrito e próximo ao desejado (baixo desvio padrão).

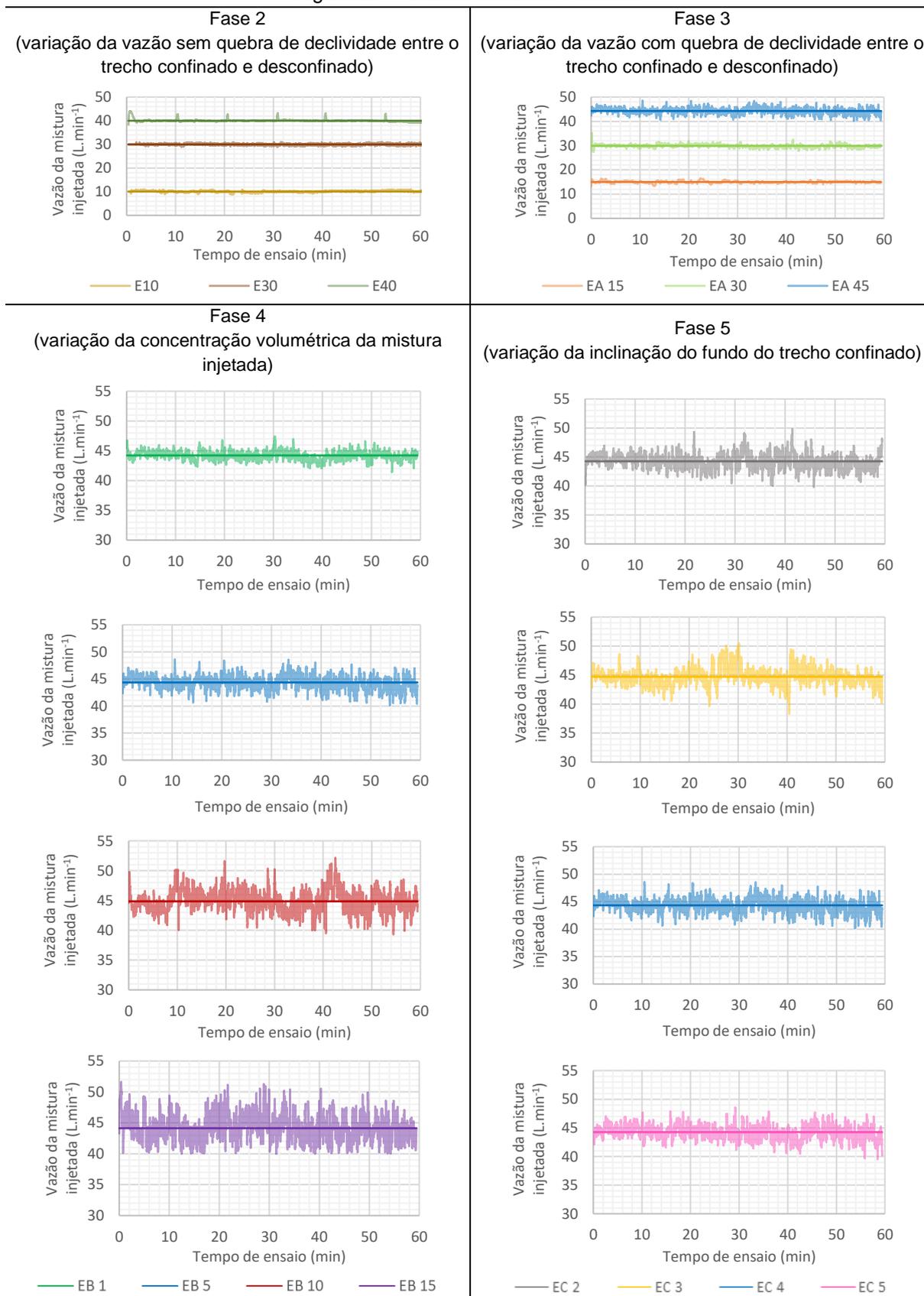
Em alguns ensaios houve picos de vazão, provavelmente gerados devido à abertura do registro lateral para coleta de amostra para análise de concentração. Estes picos de vazão indicados em alguns gráficos não significam, necessariamente, que a vazão de injeção no tanque foi maior, eles simbolizam que o medidor de vazão registrou a vazão desviada, uma vez que este dispositivo está a montante da tubulação da coleta.

Tabela 4 – Vazões almejadas e médias ao longo do tempo e, desvio padrão

Ensaio	Q_{almejada} ($\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$)	$Q_{\text{média medida}}$ ($\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$)	Desvio padrão
E10	10	10,14	0,34
E30	30	30,06	0,33
E40	40	40,01	0,60
EA 15	15	15,03	0,42
EA 30	30	29,86	0,66
EA 45/ EB 5/ EC 4	45	44,33	1,27
EB 1	45	44,20	0,76
EB 10	45	44,87	1,94
EB 15	45	44,13	2,34
EC 2	45	44,25	1,31
EC 3	45	44,71	1,54
EC 5	45	44,25	1,23

Fonte: Autor (2023)

Figura 29 – Vazões medidas e médias



8.3 EVOLUÇÃO DA CORRENTE NO TEMPO

Visando observar a maneira como ocorreu a evolução da corrente, realizou-se o registro fotográfico dos ensaios a cada 5 segundos. Na Figura 30 é apresentada a sequência fotográfica da evolução da corrente para os instantes de 5, 20, 40, 60, 80, 100 e 150 s, aproximadamente.

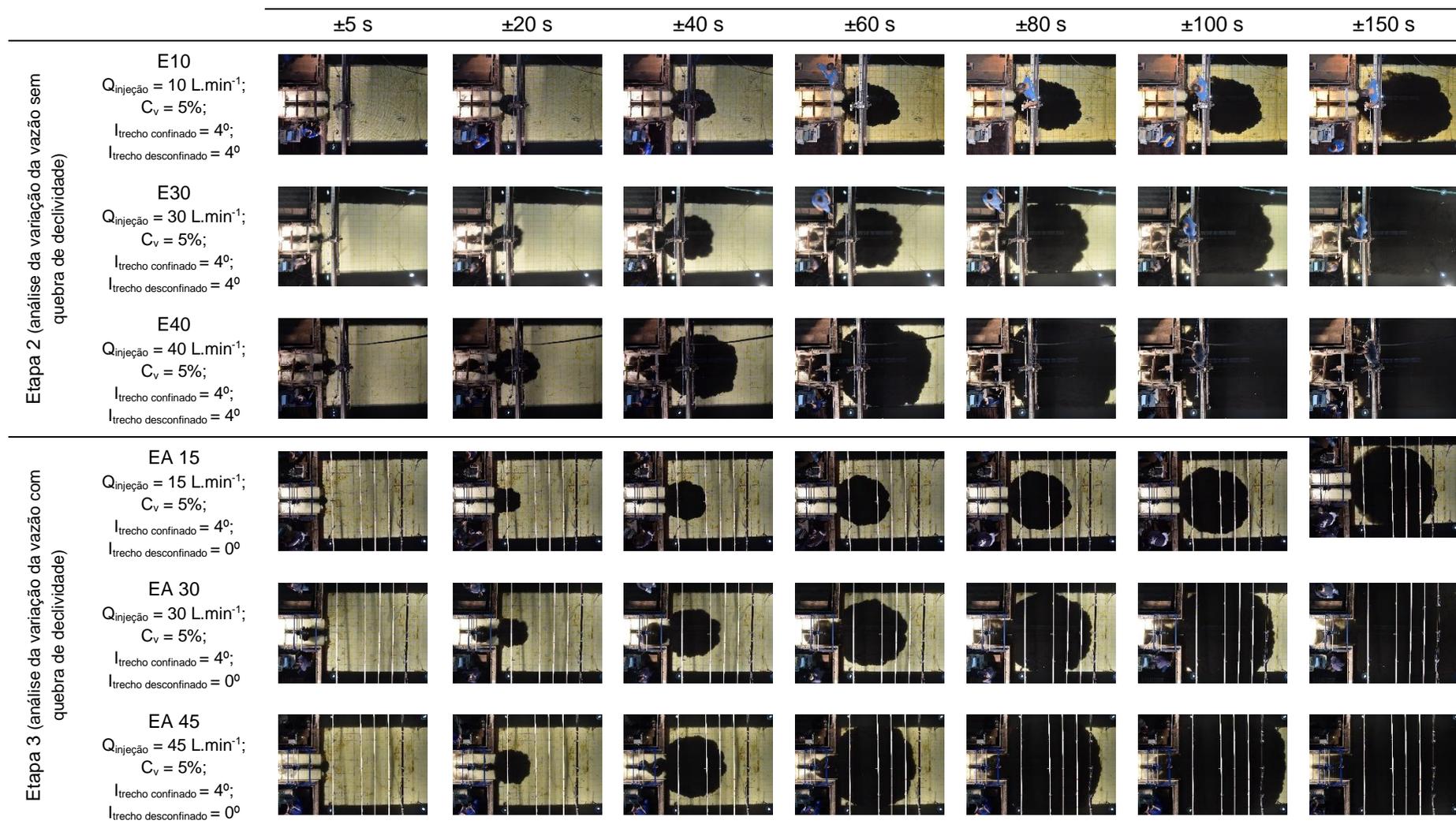
Na Etapa 2, em que os ensaios se diferenciam entre si pela variação da vazão sem que houvesse quebra de declividade entre o trecho confinado e desconfinado, notou-se que, com o aumento da vazão a corrente se expandiu de maneira mais rápida, ou seja, houve aumento da velocidade tanto na direção longitudinal, quanto na transversal. Além disso, a expansão da corrente de turbidez ocorreu de maneira mais radial à medida que se aumentou a vazão. Essa mensuração do avanço da corrente será analisada posteriormente neste trabalho. Ainda na Etapa 2, para a vazão de $10 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ (E10), a corrente de densidade não avançou sobre as extremidades laterais mais a montante da chapa metálica. Diante disso, não houve medição de velocidade pelos vetricinos localizados nas laterais (ADV 2 e 4) na distância de 50 cm em relação ao início do desconfinamento.

Na Etapa 3, na qual os ensaios foram realizados com vazões diferentes e com quebra de declividade entre a zona confinada e desconfinada, não foi possível notar nítida diferença qualitativa na geometria (fator de forma da corrente) da expansão da corrente de turbidez. Assim como na Etapa 2, o avanço da corrente ocorreu de maneira mais rápida nos ensaios que possuem maiores vazões. No experimento EA 15 também não avançou sobre os pontos iniciais da chapa metálica.

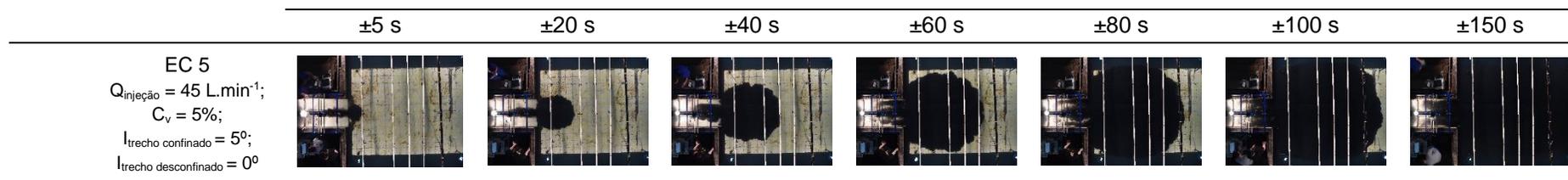
Entre os ensaios da Etapa 4, na qual há variação da concentração da mistura injetada, notou-se que para a concentração de baixa densidade (EB 1), a expansão da corrente ocorreu de maneira mais alongada (menos radial). Para as concentrações de 5, 10 e 15% não foi possível perceber uma diferença expressiva na geometria da expansão da corrente. Nestes três experimentos, nota-se que a maior velocidade de avanço ocorreu nos ensaios com maiores concentrações.

Na Etapa 5, na qual há mudança da declividade do trecho confinado, verificou-se uma semelhança na evolução da expansão das correntes para todos os ensaios. Verificou-se, porém, que os ensaios com declividade da calha intermediária (3° e 4°) avançam mais que o ensaio de 5° , o que indica uma mudança e comportamento do fluxo na região de transição calha bacia.

Figura 30 – Evolução da corrente no tempo



		±5 s	±20 s	±40 s	±60 s	±80 s	±100 s	±150 s
Etapa 4 (análise da variação da concentração com quebra de declividade)	EB 1 $Q_{\text{injeção}} = 45 \text{ L.min}^{-1}$; $C_v = 1\%$; $I_{\text{trecho confinado}} = 4^\circ$; $I_{\text{trecho desconfinado}} = 0^\circ$							
	EB 5 $Q_{\text{injeção}} = 45 \text{ L.min}^{-1}$; $C_v = 5\%$; $I_{\text{trecho confinado}} = 4^\circ$; $I_{\text{trecho desconfinado}} = 0^\circ$							
	EB 10 $Q_{\text{injeção}} = 45 \text{ L.min}^{-1}$; $C_v = 10\%$; $I_{\text{trecho confinado}} = 4^\circ$; $I_{\text{trecho desconfinado}} = 0^\circ$							
	EB 15 $Q_{\text{injeção}} = 45 \text{ L.min}^{-1}$; $C_v = 15\%$; $I_{\text{trecho confinado}} = 4^\circ$; $I_{\text{trecho desconfinado}} = 0^\circ$							
Etapa 5 (análise da variação da declividade do leito do trecho confinado, com quebra de declividade)	EC 2 $Q_{\text{injeção}} = 45 \text{ L.min}^{-1}$; $C_v = 5\%$; $I_{\text{trecho confinado}} = 2^\circ$; $I_{\text{trecho desconfinado}} = 0^\circ$							
	EC 3 $Q_{\text{injeção}} = 45 \text{ L.min}^{-1}$; $C_v = 5\%$; $I_{\text{trecho confinado}} = 3^\circ$; $I_{\text{trecho desconfinado}} = 0^\circ$							
	EC 4 $Q_{\text{injeção}} = 45 \text{ L.min}^{-1}$; $C_v = 5\%$; $I_{\text{trecho confinado}} = 4^\circ$; $I_{\text{trecho desconfinado}} = 0^\circ$							



Fonte: Autor (2023)

8.4 VELOCIDADE MÉDIA NA DIREÇÃO X – PERFIL LONGITUDINAL

Visto que existem os trechos confinado e desconfinado, os resultados dessas duas zonas foram seccionados, sendo os dados do trecho confinado apresentados nos itens 8.4.1 e do trecho desconfinado no item 8.4.2. A velocidade na direção longitudinal (eixo X) é a responsável pelo avanço da corrente de turbidez, por conta disso, será denominada de velocidade de avanço.

8.4.1 Velocidade de avanço (direção longitudinal) do trecho confinado

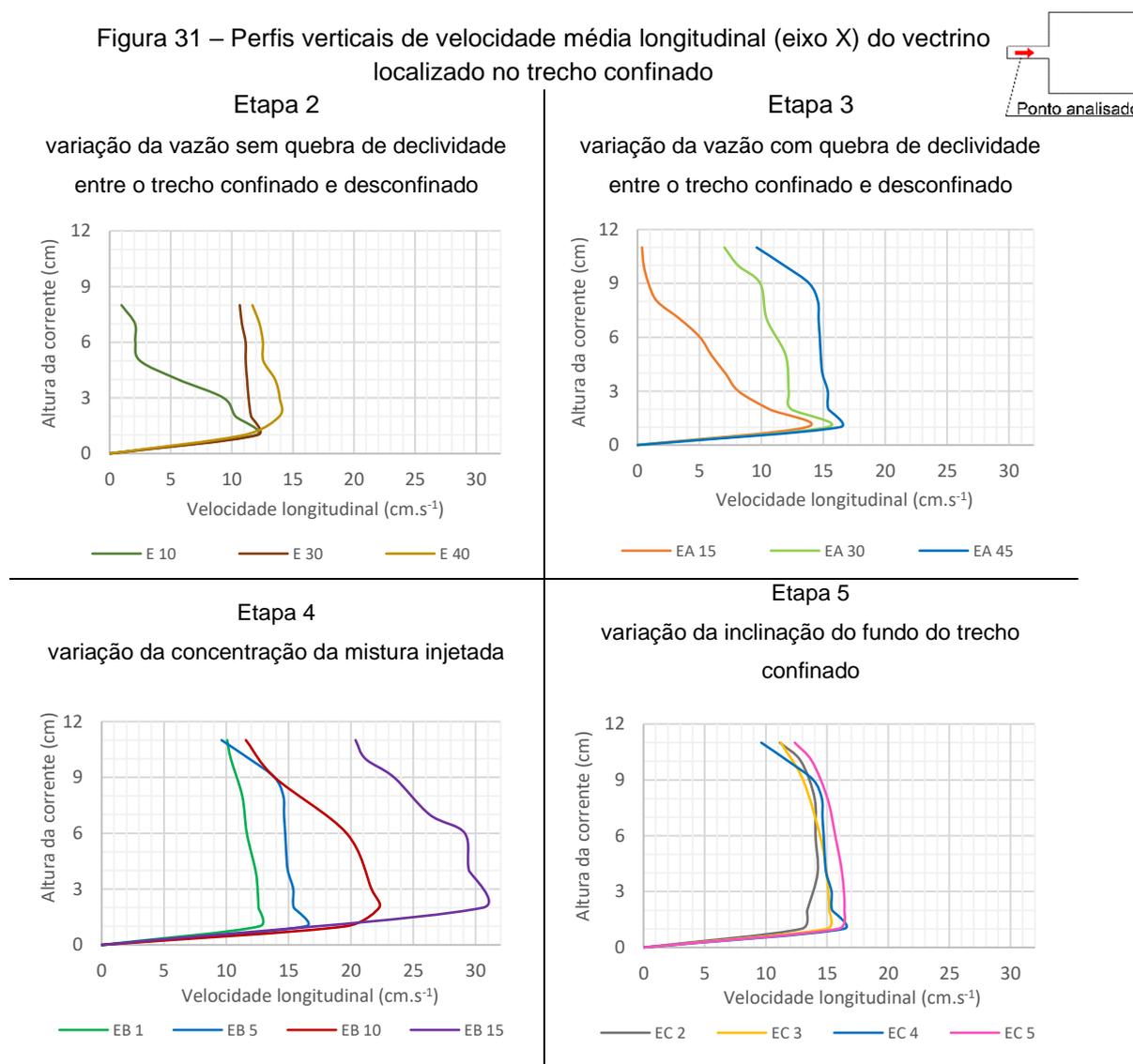
O vetricino 1 se encontra na parte confinada do tanque de ensaio, distante 1 m da saída do difusor (ver Figura 21). Nas diferentes posições ao longo da altura em que foram feitas as medidas de velocidade, foi possível notar que os perfis de velocidade verticais médios variaram bastante, exceto na Etapa 5, conforme Figura 31. As possíveis causas para a ocorrência da diferença de geometria dos perfis verticais de velocidade foram a diferença de vazões, concentrações e/ ou da expansão do jato inicial junto a saída do difusor. A partir dos perfis verticais, as velocidades médias e os desvios padrões foram obtidos por meio da integração da área dos gráficos. O valor das velocidades máximas, médias e o desvio padrão na direção X, estão apresentados na Tabela 5.

Nos ensaios E10, EA 15, EB 10 e EB 15, os perfis de velocidades apresentaram distribuição esperada de correntes de turbidez, com valor maior (nariz) junto ao fundo e valores decrescentes até a camada superior de fluido ambiente. Com isso, nota-se a altura em que houve uma clara transição entre as regiões inferior e superior da corrente de turbidez. Nestes ensaios, a região inferior da corrente apresenta menos da metade da espessura da região superior, o que vai ao encontro das observações de Kneller e Buckee (2000). A concentração volumétrica máxima ao longo da altura nestes experimentos ocorreu na região inferior da corrente. Estes perfis de concentração serão posteriormente apresentados. Ainda sobre os ensaios E10, EA 15, EB 10 e EB 15, a variação dos valores da velocidade longitudinal ao longo da altura apresentam os maiores valores entre os ensaios realizados, com desvio padrão superior a $4 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$.

Nos demais ensaios (E30, E40, EA 30, EA 45, EB 1, EC 2, EC 3 e EC 5), os valores dos perfis (Figura 31) apresentaram homogeneidade nos valores das

velocidades, indicando que houve uma maior mistura turbulenta ao longo da vertical. Com isso, a divisão entre as camadas inferior e superior não foram tão evidentes como nos demais ensaios, uma vez que a diferença entre as velocidades máxima e média foram baixas, verificada através dos baixos valores dos desvios padrões apresentados na Tabela 5.

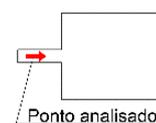
Figura 31 – Perfis verticais de velocidade média longitudinal (eixo X) do vectrino localizado no trecho confinado



Fonte: Autor (2023)

Nas etapas 2 e 3, com a variação das vazões, os valores da velocidade máxima entre os ensaios de uma mesma fase apresentaram diferenças inferiores a 2 e 2,7 cm.s⁻¹, respectivamente. Nestas etapas, o aumento da vazão teve maior impacto na velocidade da parte superior da corrente de turbidez.

Tabela 5 – Velocidades máximas e média no vectrino 1 na direção longitudinal



Etapa	Ensaio	Q _{injeção} (L.min ⁻¹)	C _v (%)	l _{trecho confinado}	l _{trecho desconfinado}	V _{máxima} (cm.s ⁻¹)	V _{média} (cm.s ⁻¹)	Desvio padrão
2	E10	10	5	4°	4°	11,96	5,55	4,35
2	E30	30	5	4°	4°	12,10	10,59	0,45
2	E40	40	5	4°	4°	13,89	11,95	1,05
3	EA 15	15	5	4°	0°	13,67	5,20	4,41
3	EA 30	30	5	4°	0°	15,36	10,67	2,65
3	EA 45*	45	5	4°	0°	16,37	13,76	1,89
4	EB 1	45	1	4°	0°	12,66	11,16	1,03
4	EB 10	45	10	4°	0°	22,26	17,30	4,35
4	EB 15	45	15	4°	0°	30,56	24,52	4,16
5	EC 2	45	5	2°	0°	14,23	12,95	1,07
5	EC 3	45	5	3°	0°	15,18	13,42	0,23
5	EC 5	45	5	5°	0°	16,42	14,49	1,59

* O ensaio EA 45 também pode ser enquadrado nas etapas 4 e 5 com a denominação de EB 5 e EC 4, respectivamente.

Fonte: Autor (2023)

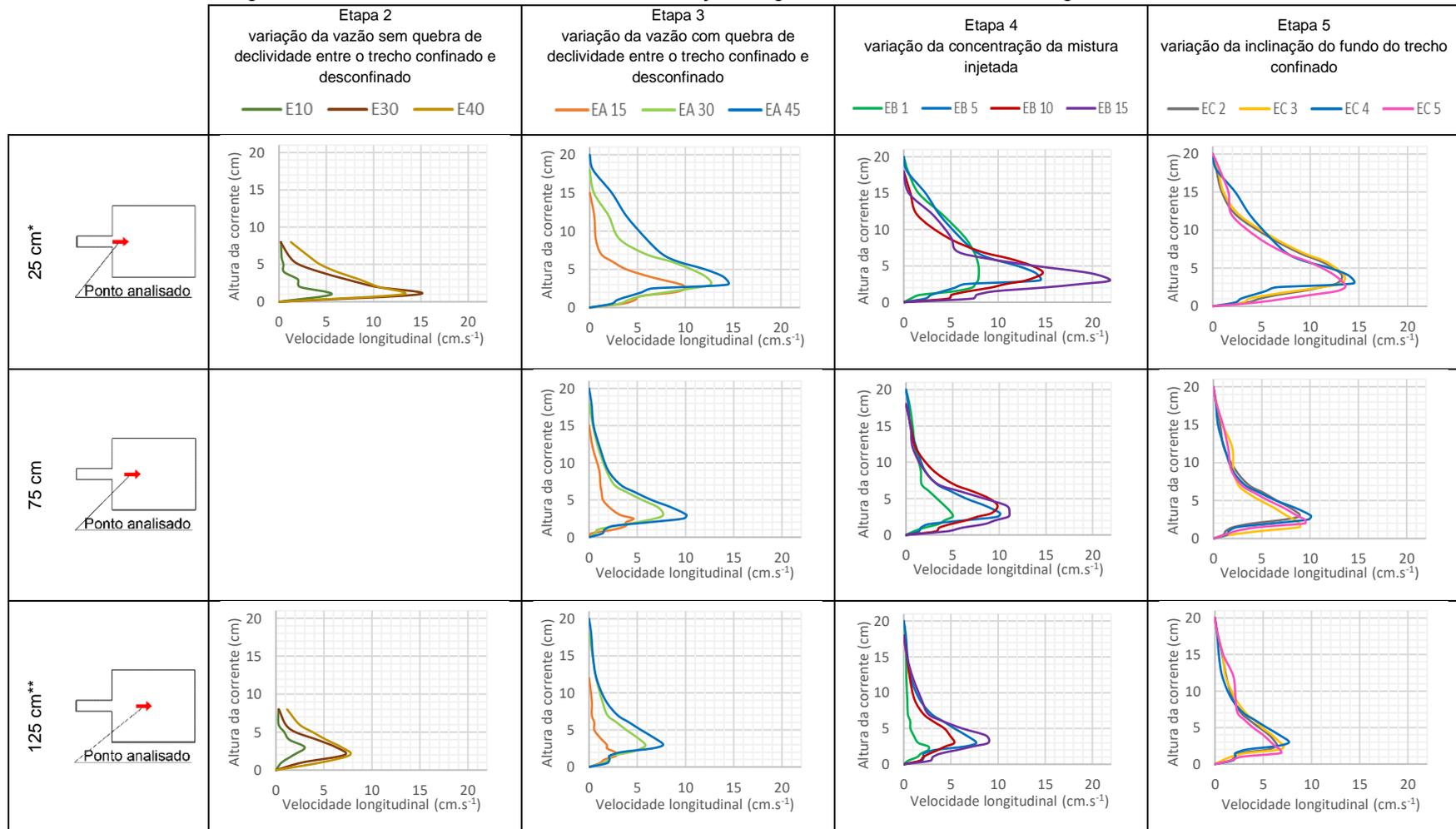
Com a variação da concentração da mistura injetada (Etapa 4), a diferença entre a velocidade máxima e média chegou a 6 cm.s⁻¹ (EB 15). Nesta etapa notou-se que o aumento da concentração da mistura injetada ocasionou maior influência na região inferior da corrente de turbidez, com velocidades máximas aumentando pelo menos 3,7 cm.s⁻¹.

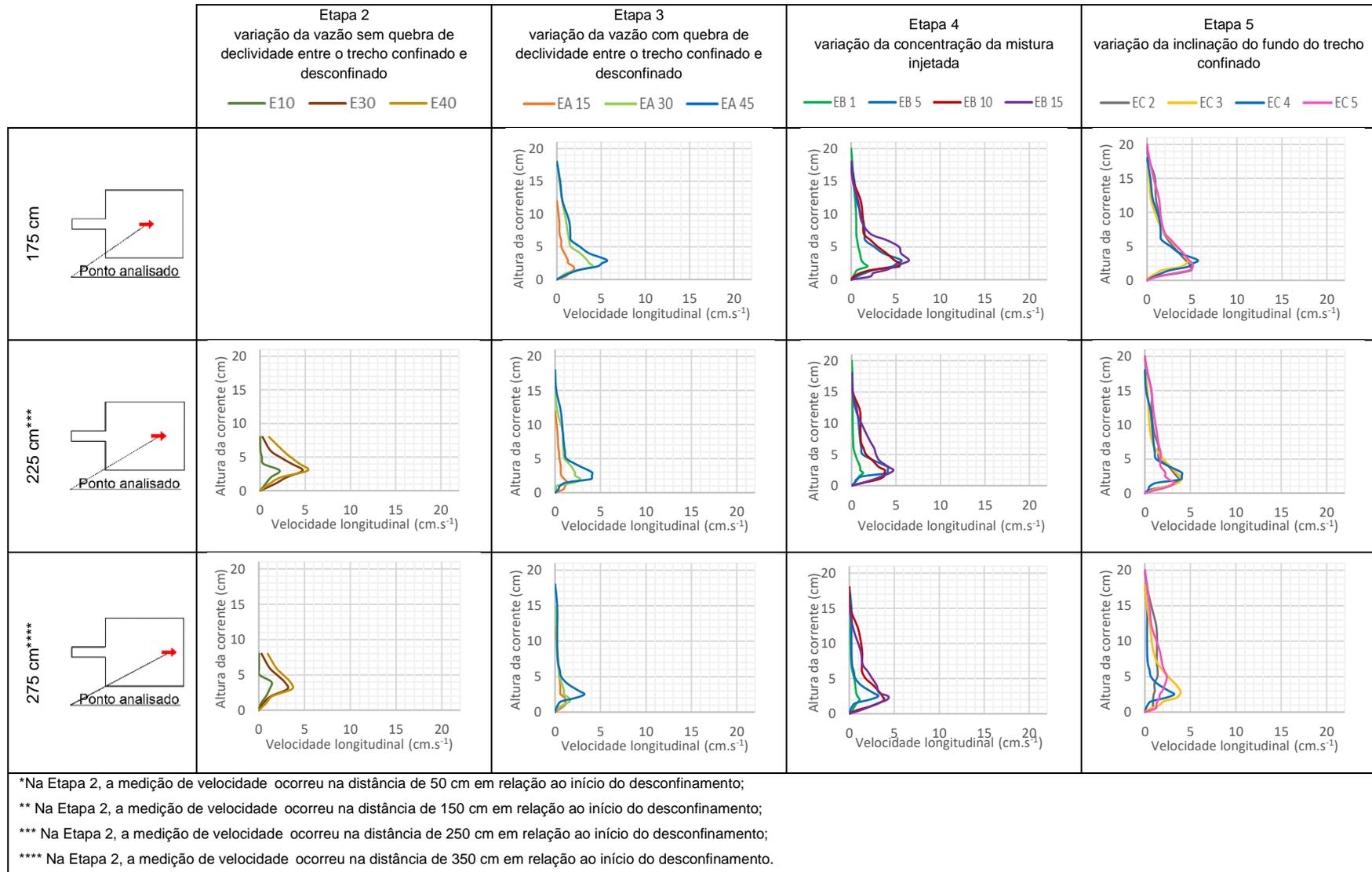
A variação da declividade do leito da região confinada (Etapa 5) teve como resultado correntes de turbidez com velocidades máximas mais elevadas, à medida que se elevou a inclinação. Esse aumento foi de até 1,19 cm.s⁻¹ quando variado 1° (EC 3 e EC 4). O desvio padrão não apresentou uma tendência de variação à medida em que foi feita a mudança da inclinação do fundo.

8.4.2 Velocidade de avanço (direção longitudinal) do trecho desconfinado

Os perfis de velocidade vertical em diferentes pontos ao longo da direção longitudinal (eixo X), no eixo central da região desconfinada, estão apresentados na Figura 32. Os valores das velocidades máximas e a velocidade média estão apresentados na Tabela 6.

Figura 32 - Perfis verticais de velocidade na direção longitudinal no eixo central da região desconfinada





Fonte: Autor (2023)

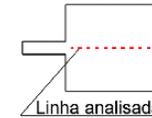


Tabela 6 – Velocidades máximas e médias na direção longitudinal no eixo central

Velocidade (cm.s ⁻¹)	Etapa 2			Etapa 3			Etapa 4			Etapa 5		
	E10	E30	E40	EA 15	EA 30	EA 45*	EB 1	EB 10	EB 15	EC 2	EC 3	EC 5
V _{máx} 25 cm	-	-	-	10,00	12,64	14,41	7,96	14,73	21,88	13,27	13,53	13,59
V _{méd} 25 cm	-	-	-	2,04	4,01	5,11	4,32	4,87	5,99	5,14	5,30	5,14
V _{máx} 50 cm	5,56	14,80	13,50	-	-	-	-	-	-	-	-	-
V _{méd} 50 cm	1,43	5,07	6,09	-	-	-	-	-	-	-	-	-
V _{máx} 75 cm	-	-	-	4,61	7,69	10,09	4,12	9,82	11,11	8,94	8,91	9,46
V _{méd} 75 cm	-	-	-	1,01	2,15	2,67	1,69	3,25	3,33	2,58	2,77	2,73
V _{máx} 125 cm	-	-	-	2,79	5,84	7,68	2,60	5,36	8,97	6,38	7,15	6,82
V _{méd} 125 cm	-	-	-	0,48	1,67	2,13	0,58	1,63	2,49	2,13	2,30	2,31
V _{máx} 150 cm	2,99	7,15	7,71	-	-	-	-	-	-	-	-	-
V _{méd} 150 cm	1,04	3,03	4,13	-	-	-	-	-	-	-	-	-
V _{máx} 175 cm	-	-	-	1,92	4,02	5,62	1,82	5,43	6,49	4,93	4,52	5,09
V _{méd} 175 cm	-	-	-	0,38	1,07	1,41	0,52	1,48	1,94	1,67	1,33	1,83
V _{máx} 225 cm	-	-	-	1,35	2,77	4,05	1,29	3,72	4,70	3,74	3,97	3,23
V _{méd} 225 cm	-	-	-	0,28	0,65	0,94	0,27	1,13	1,41	1,21	1,09	1,20
V _{máx} 250 cm	2,17	4,70	5,28	-	-	-	-	-	-	-	-	-
V _{méd} 250 cm	0,58	2,12	2,64	-	-	-	-	-	-	-	-	-
V _{máx} 275 cm	-	-	-	1,14	1,61	3,22	1,14	3,88	4,31	3,31	3,91	2,45
V _{méd} 275 cm	-	-	-	0,26	0,32	0,51	0,27	1,12	1,22	0,92	1,05	1,14
V _{máx} 350 cm	1,39	3,13	3,63	-	-	-	-	-	-	-	-	-
V _{méd} 350 cm	0,47	1,48	1,98	-	-	-	-	-	-	-	-	-

* O ensaio EA 45 também pode ser enquadrado nas etapas 4 e 5 com a denominação de EB 5 e EC 4, respectivamente.

Fonte: Autor (2023)

Na Etapa 2, em que se alterou a vazão de injeção, sem que houvesse quebra de declividade entre a região confinada e a desconfinada, a velocidade de avanço no eixo central da região desconfinada foi mensurada por meio de um ADV que se encontrava na posição central, próximo às linhas 6 e 7 (ver Figura 27). Nessa fase conforme a medição se distancia do desconfinamento do canal, os valores de velocidade (média e máxima) decrescem, ou seja, as inclinações do fundo das chapas metálicas (efeito gravitacional) não foram suficientes para manter ou acelerar a corrente. Os valores de velocidade máxima em cada perfil de velocidade vertical foram se distanciando do fundo da chapa ao longo do desconfinamento.

Na Etapa 3 modificou-se a vazão de injeção da corrente de turbidez e houve quebra de declividade entre os trechos confinado e desconfinado. Próximo às linhas 6 e 7 (ver Figura 27), os resultados apresentaram a redução da velocidade (média e máxima) da corrente de turbidez à medida que essa avançou para jusante. Os experimentos com as maiores vazões foram os que apresentaram as maiores velocidades entre os ensaios da etapa. A altura total da corrente em um mesmo ponto analisado foi maior para os ensaios de maior vazão de injeção (Figura 32). Diferentemente da Etapa 2, na Etapa 3 os valores máximos de velocidade se mantiveram praticamente a uma mesma posição no perfil vertical ao longo do eixo central, entre 2 e 4 cm.

Na Etapa 4 alterou-se a concentração da corrente de turbidez e, conforme aumentou-se o valo desse parâmetro, observou-se que a velocidade máxima e média na região do desconfinamento também aumentaram. Esta tendência também foi observada nos experimentos de Spychala (2020) e Wilkin et al. (2023). Nesta fase da presente pesquisa houve redução da velocidade da corrente de turbidez conforme essa avançou para jusante (Tabela 6). Os máximos valores de velocidade longitudinal na Etapa 4, assim como na Etapa 3, se mantiveram praticamente na mesma altura ao longo do eixo central (entre 2 e 4 cm). A espessura da corrente de turbidez reduziu conforme se aumentou a concentração da mistura injetada (Figura 32). Entre todos os ensaios realizados nesta pesquisa, o EB 15 foi o que apresentou as maiores velocidades máximas e médias, independentemente do ponto analisado, por influência da sua maior concentração volumétrica.

O ensaio EB 1 é o que apresenta menor concentração volumétrica entre todos os experimentos desta pesquisa, nele houve as maiores diferenças percentuais entre as velocidades máximas e médias, 67 e 94%, respectivamente. Esta observação entre as velocidades máximas e médias se dá devido à menor quantidade de partículas em suspensão na corrente de turbidez (menor densidade) interferir na redução da força motriz. Os resultados de Wilkin et al. (2023) também apontam para essa observação.

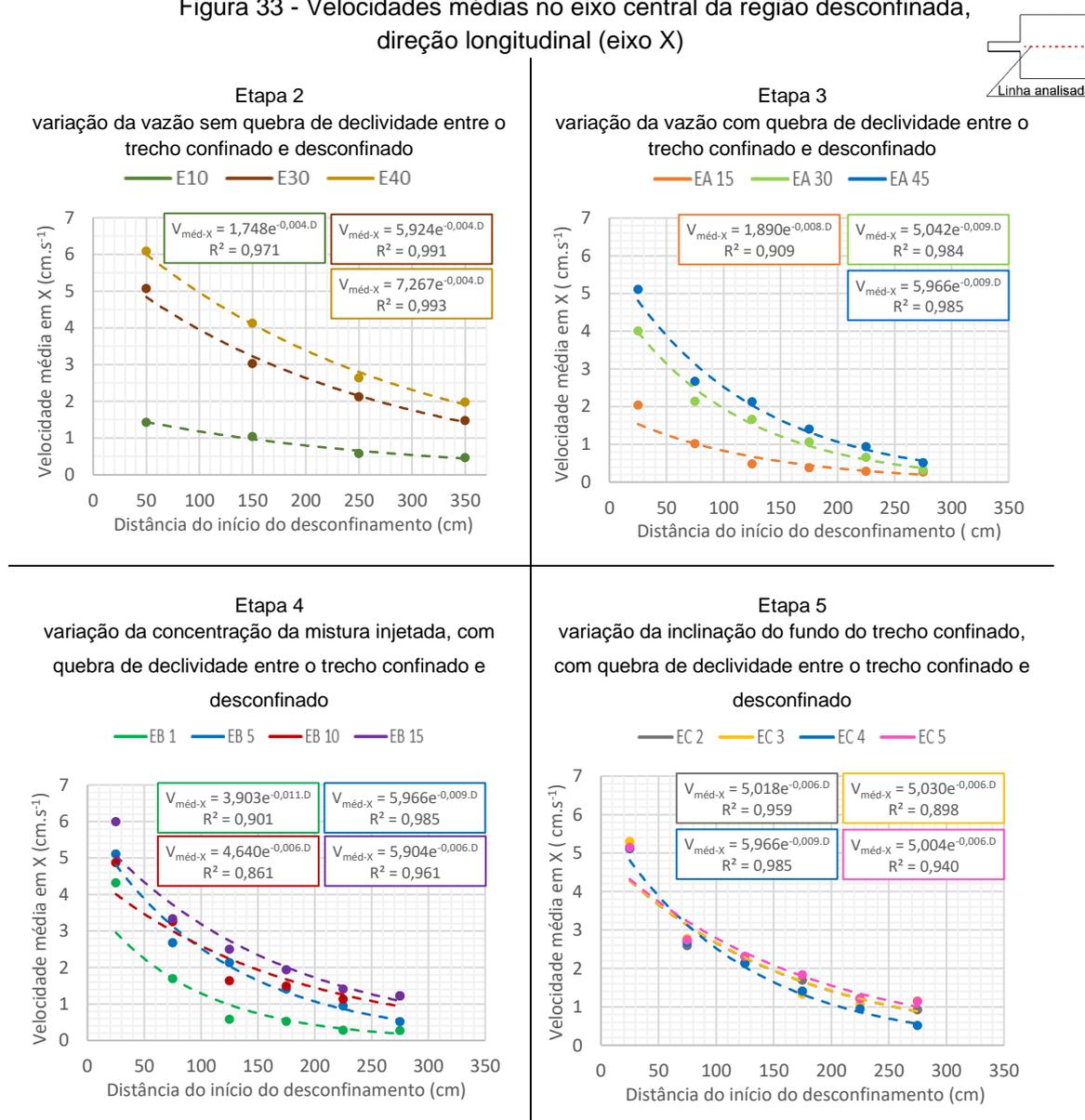
A Etapa 5 teve por objetivo avaliar possíveis efeitos que a declividade da parte confinada poderia proporcionar na caracterização hidrodinâmica dos lobos turbidíticos. Em termos de velocidade na direção longitudinal, a variação da declividade do trecho a montante do início do desconfinamento da corrente de turbidez proporcionou baixa interferência na velocidade média e máxima da região desconfinada, com perfis de velocidade verticais no eixo central longitudinal se sobrepondo em diversas alturas (Figura 32).

Na distância 275 cm em relação ao início do desconfinamento, no ensaio EC 4, a velocidade média longitudinal apresentou discrepância de mais de 80% em relação aos demais ensaios da Etapa 5 (Tabela 6), essa diferença possivelmente está relacionada ao material utilizado nesse ensaio ser diferente dos demais ensaios (no ensaio EC 4 utilizou-se o carvão SR e nos demais ensaios da etapa empregou-se o carvão 405 – ver Tabela 1). Assim como nas etapas 3 e 4, na Etapa 5 houve redução da velocidade da corrente de turbidez à medida que essa avançou para jusante. Além disso, os valores de velocidade longitudinal máximos se mantiveram praticamente na mesma espessura ao longo do eixo central (entre 2 e 4 cm).

Conforme descrito anteriormente, em todas as etapas a velocidade média da corrente de turbidez, no eixo central longitudinal da região desconfinada, reduziu à medida que avançou para a jusante do tanque de ensaio. Visando avaliar a forma como ocorreu esse decaimento de velocidade (desaceleração da corrente), foi plotado a velocidade média da corrente ao longo da distância, possibilitando o ajuste de uma lei exponencial entre eles (Figura 33). Estes ajustes apresentaram precisões consideradas satisfatórias, com coeficiente de determinação (R^2) superior a 0,86, indicando que as velocidades médias podem ser determinadas por meio das linhas de tendências exponenciais apresentadas.

Nas etapas 2 e 3, em que houve variação da vazão, a redução da velocidade longitudinal ocorreu de maneira mais intensa nos ensaios em que havia quebra de declividade (Etapa 3). Esta observação pode ser comprovada por meio do expoente da equação exponencial ajustada e, também, pela taxa de redução da velocidade longitudinal que foi de 3,9%, a cada 10 cm, para os ensaios da Etapa 2 e, para os ensaios da Etapa 3 foram 7,7% (EA 15) e 8,6% (EA 30 e EA 45).

Figura 33 - Velocidades médias no eixo central da região desconfiada, direção longitudinal (eixo X)



Spychala (2020) ao realizar experimentos em um tanque tridimensional, com quebra de declividade entre a zona confinada e desconfiada e, ao variar a vazão,

notou que os ensaios com maiores vazões apresentaram maiores velocidades máximas iniciais. Após a quebra de declividade, no entanto, apresentam uma taxa de decaimento da velocidade média mais baixa, conforme a corrente avançava para a jusante. Os resultados da Etapa 3 do presente trabalho indicaram valores diferentes de tendência de decaimento da velocidade média com menor intensidade para os ensaios de maiores vazões à medida que a corrente avançou para jusante. As razões para as divergências entre o presente trabalho com os de Spsychala (2020) se atribuem a: 1) duração dos ensaios serem distintos, o que interfere no desenvolvimento e permanência da velocidade da corrente de turbidez – a duração dos ensaios da primeira variou de 80 a 100 s, enquanto deste trabalho duraram 60 min; 2) dimensão do sedimento utilizado – no trabalho da referida autora o D_{50} foi de 133 μm , enquanto deste trabalho foi inferior a 40 μm ; 3) declividade do trecho confinado serem distintos, o que interfere na velocidade no desconfinamento devido ao efeito da gravidade – a inclinação da zona confinada da autora foi de 11° , neste trabalho foi de 4° ; 4) declividade da zona desconfinada da primeira foi de 4° , já deste trabalho foi de 0° , o que reduz os efeitos da gravidade e conseqüentemente no desenvolvimento da corrente de turbidez ao longo do trecho.

Na Etapa 4, observou-se que o aumento da concentração da mistura injetada apresenta relações diretamente proporcionais com o valor da velocidade média no eixo longitudinal. Através da Figura 33, nota-se que o aumento da concentração ocasionou equações da variação da velocidade média com menor declividade, ou seja, apresentam menor expoente. Quando analisada a taxa de redução de velocidade a cada 10 cm, tem-se para o EB 1, EB 5 e EB 10 os valores de 10,4%, 8,6% e 15,8%, respectivamente. A taxa de redução de velocidade para o ensaio EB 15 foi igual ao EB 10 (equações exponenciais apresentam o mesmo expoente).

Nos ensaios da Etapa 5, nos quais variou-se a declividade do leito do trecho confinado, verificou-se esse parâmetro não influencia significativamente o valor da velocidade média. Os valores dos coeficientes da lei ajustada (Figura 33), praticamente ficaram inalterados, exceto para o ensaio EC 4 que ficou superior. Assim, ocorreu a sobreposição das linhas da variação da velocidade longitudinal média apresentadas. A taxa de decaimento da velocidade média para os

experimentos que utilizaram o mesmo sedimento (EC 2, EC 3 e EC 5) foi de 5,8% a cada 10 cm e, para o EC 4 foi de 8,6%.

As velocidades longitudinais nas laterais do tanque foram medidas de maneira simétrica em relação ao eixo central longitudinal no lado esquerdo e no lado direito (ver Figura 24 e Figura 25). A variação destas medições para uma mesma abscissa⁵ ficou inferior a 15%, auxiliando na verificação da ordem de grandeza entre as medições das laterais. Diante disso, adotou-se as medições que ocorrem na linha 3 (ver Figura 27) para representar as velocidades no eixo longitudinal lateral. Os gráficos das velocidades longitudinais na lateral, distante 100 cm do eixo longitudinal central e, os valores das velocidades máximas e médias, são apresentas na Figura 34 e Tabela 7, respectivamente.

Na Etapa 2, na qual variou-se a vazão e não havia quebra de declividade entre as regiões confinada e desconfinada, as velocidades médias nas laterais da direção X (longitudinal) foram aumentando até a distância 350 cm do início do desconfinamento (local da última medição), ou seja, houve aceleração no trecho de 0 a 350 cm. Nessa etapa, as velocidades longitudinais máximas nas laterais ocorreram na altura entre 2 e 4 cm em relação ao leito. Assim como ocorreu no eixo central longitudinal, as velocidades médias e máximas no eixo lateral analisado também aumentaram à medida que houve aumento da vazão da injeção. No E10 não foi registrada velocidade nos vectrinos 2 e 4 (ver Figura 24) na posição 50 cm em relação ao início do desconfinamento. Isso ocorreu devido à corrente de turbidez não ter atingido essa região em nenhum momento (ver Figura 67).

Na Etapa 3, nas laterais do tanque, a velocidade longitudinal média e máxima aumentaram até a abscissa 175 cm, depois desse ponto houve desaceleração. Essa desaceleração no eixo lateral tem como causa a falta da declividade do leito, já que na Etapa 2 não houve redução das velocidades médias e máximas (no trecho analisado) conforme a corrente avançou para a jusante. Assim como no eixo longitudinal central, nas laterais analisadas do tanque, a altura em que ocorreu a velocidade longitudinal máxima se manteve entre 2 e 4 cm em relação ao leito.

A velocidade longitudinal média e máxima na Etapa 4, nas laterais do tanque, após a abscissa 175 cm, diminuíram com o avanço da corrente para jusante. Assim

⁵ Abscissa corresponde ao eixo de coordenadas horizontal, ou seja, eixo X.

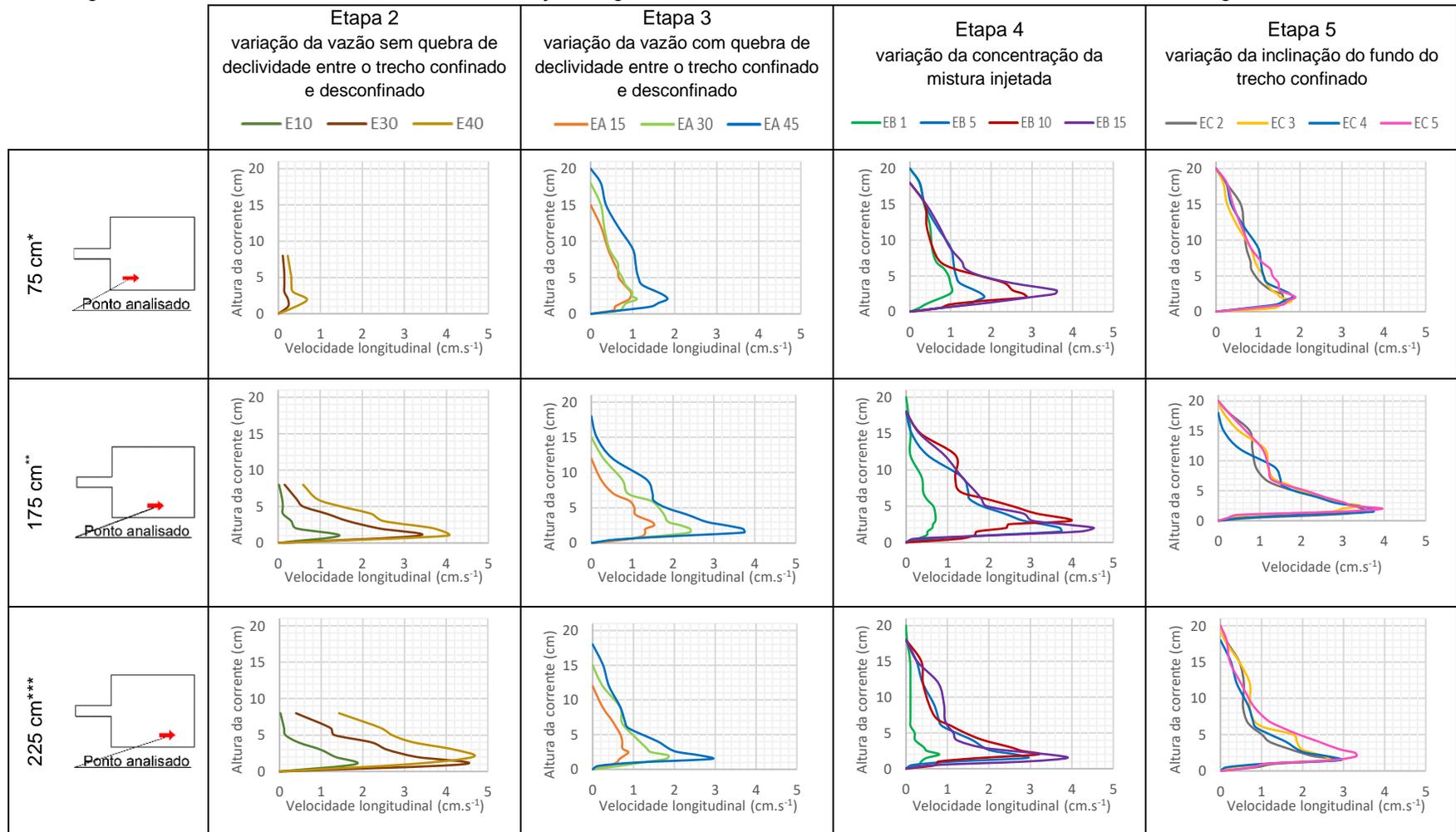
como no eixo longitudinal central, nas laterais do tanque, a altura em que ocorreu a velocidade máxima se manteve entre 2 e 4 cm. O ensaio EB 1 foi o único entre todos os ensaios realizados no qual a velocidade média decresceu, a todo momento, conforme a corrente de turbidez avançou para a jusante. Essa tendência ocorreu devido ao baixo valor da concentração da corrente de turbidez ao longo deste eixo, o que conseqüentemente reduz a gravidade reduzida (g'), reduzindo a força motriz.

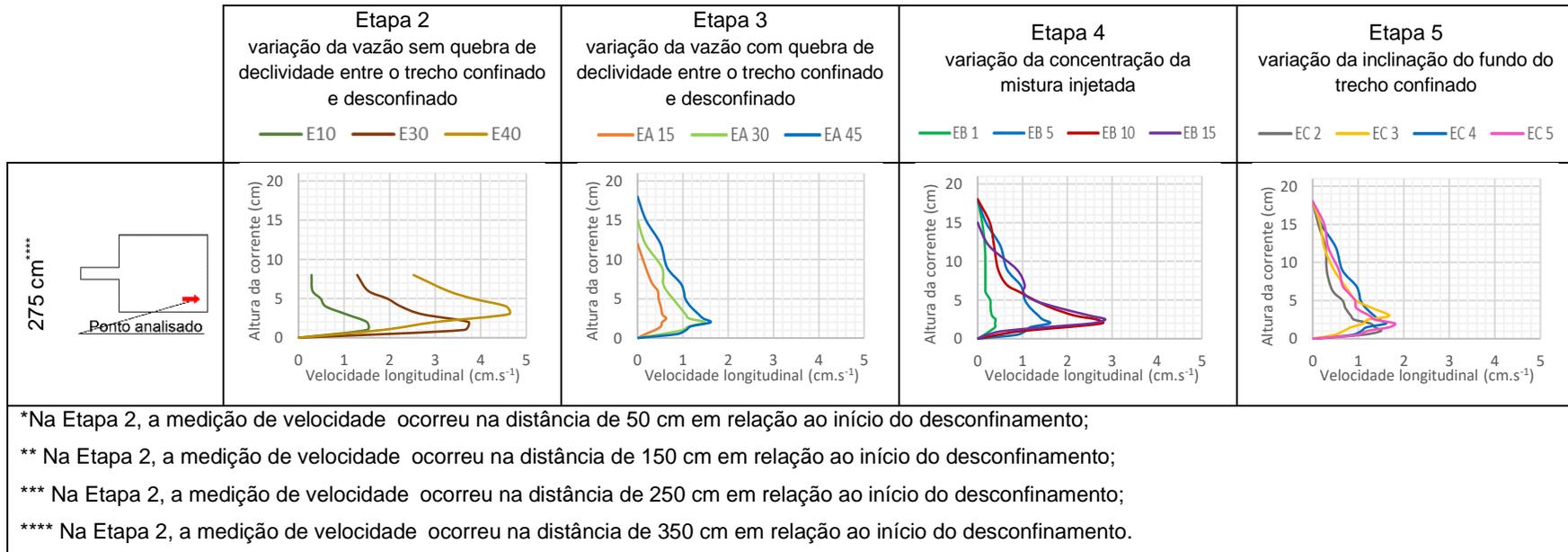
Assim como nas etapas 3 e 4, exceto experimento EB 1, na Etapa 5 a velocidade longitudinal média e máxima nas laterais do tanque, aumentou até a abscissa 175 cm e, depois deste ponto houve a redução da mesma. A altura em que ocorreu a velocidade máxima ficou entre 2 e 4 cm em relação ao leito. Visto que a variação da declividade do leito entre os ensaios não foi significativa (menos de 3°), a variação da velocidade longitudinal média e máxima foi baixa. A diferença máxima entre as velocidades máximas e médias, para uma mesma abscissa, foi de 0,65 e 0,28 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$, respectivamente. Diante disso, os perfis verticais de velocidade ficaram praticamente sobrepostos, conforme apresentado na Figura 34.

O direcionamento da variação da velocidade longitudinal média, distante 100 cm do eixo central, é apresentado na Figura 35 por meio de curvas de tendências do tipo polinomiais de grau dois, exceto para o ensaio EB 1 que foi do tipo potencial, com coeficiente de determinação (R^2) superior a 0,8, na maioria dos ensaios.

As velocidades médias na direção longitudinal do eixo lateral analisado, na Etapa 2, obtiveram uma tendência crescente à medida que a corrente de turbidez avançou para jusante (ver Tabela 7 e Figura 35). Essa tendência ocorreu devido a declividade do leito da região desconfinada ser superior a 0° e, da falta de quebra de declividade entre as regiões confinada e desconfinada (ver Figura 24). Além disso, nota-se que os valores das velocidades médias nesta linha analisada apresentam valores bem discrepantes dos demais ensaios da pesquisa. Isso ocorreu devido o equipamento utilizado na medição de velocidade na Etapa 2 ser diferente das demais etapas e, por estratégia inicial, houve medição de velocidade em sete alturas pré-definidas, o que teve como consequência a falta dos valores de velocidades em alturas superiores a 8 cm, o que impactou na obtenção da altura total da corrente. Diante disso, o valor da velocidade longitudinal média apresentado foi calculado considerando a altura da corrente de turbidez com 8 cm.

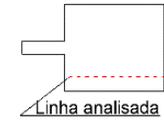
Figura 34 - Perfis verticais de velocidade na direção longitudinal no eixo lateral, distante 100 cm do eixo central, da região desconfiada





Fonte: Autor (2023)

Tabela 7 – Velocidades máximas e médias na direção longitudinal no eixo lateral, distante 100 cm do eixo central, da região desconfinada

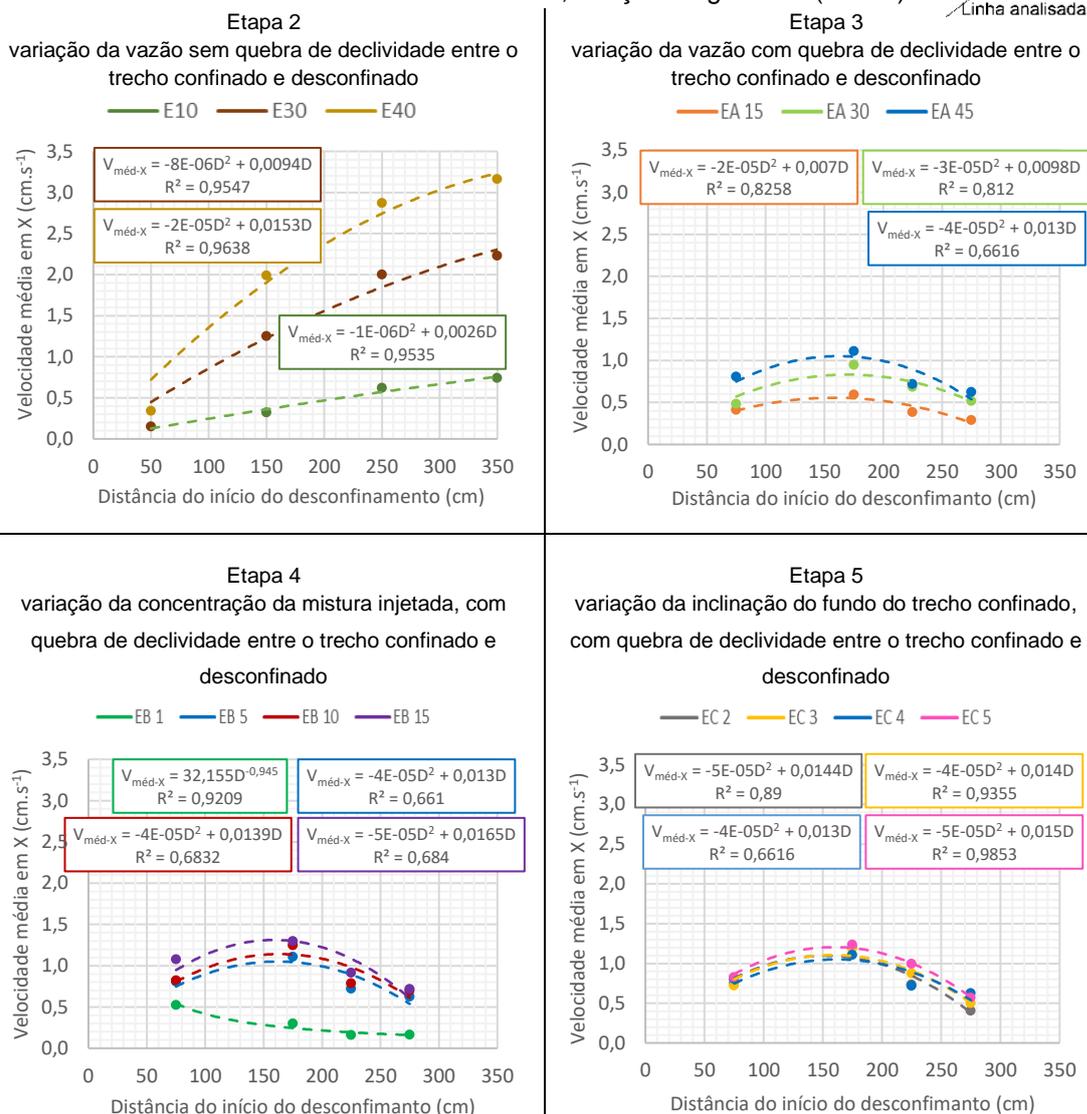


Velocidade (cm.s ⁻¹)	Etapa 2			Etapa 3*			Etapa 4			Etapa 5		
	E10	E30	E40	EA 15	EA 30	EA 45	EB 1	EB 10	EB 15	EC 2	EC 3	EC 5
V _{máx} 50 cm	-	0,23	0,68	-	-	-	-	-	-	-	-	-
V _{méd} 50 cm	-	0,15	0,34	-	-	-	-	-	-	-	-	-
V _{máx} 75 cm	-	-	-	0,96	1,10	1,82	1,04	2,86	3,60	1,62	1,80	1,89
V _{méd} 75 cm	-	-	-	0,36	0,45	0,81	0,52	0,82	1,08	0,74	0,72	0,82
V _{máx} 150 cm	1,45	3,34	4,03	-	-	-	-	-	-	-	-	-
V _{méd} 150 cm	0,32	1,25	1,99	-	-	-	-	-	-	-	-	-
V _{máx} 175 cm	-	-	-	1,54	2,42	3,74	0,71	3,98	4,53	3,58	3,43	3,95
V _{méd} 175 cm	-	-	-	0,44	0,76	1,11	0,30	1,25	1,30	1,20	1,19	1,23
V _{máx} 225 cm	-	-	-	0,88	1,86	2,92	0,50	3,16	3,89	2,90	2,65	3,30
V _{méd} 225 cm	-	-	-	0,28	0,54	0,72	0,16	0,79	0,91	0,73	0,87	1,00
V _{máx} 250 cm	1,83	4,42	4,65	-	-	-	-	-	-	-	-	-
V _{méd} 250 cm	0,62	2,00	2,87	-	-	-	-	-	-	-	-	-
V _{máx} 275 cm	-	-	-	0,63	1,49	1,61	0,40	2,78	2,85	1,50	1,68	1,81
V _{méd} 275 cm	-	-	-	0,19	0,42	0,62	0,16	0,70	0,72	0,41	0,50	0,57
V _{máx} 350 cm	1,50	3,73	4,56	-	-	-	-	-	-	-	-	-
V _{méd} 350 cm	0,74	2,23	3,16	-	-	-	-	-	-	-	-	-

* O ensaio EA 45 também pode ser enquadrado nas etapas 4 e 5 com a denominação de EB 5 e EC 4, respectivamente.

Fonte: Autor (2023)

Figura 35 - Velocidades médias eixo lateral, distante 100 cm do eixo central, direção longitudinal (eixo X)



Fonte: Autor (2023)

Na Etapa 2, a equação polinomial de segundo grau, que representa a variação da velocidade média longitudinal no eixo lateral, é indicada para o cálculo da velocidade no trecho apresentado (0 a 350 cm), cujo coeficiente de determinação (R^2) apresenta valores próximos a um (Figura 35). Se estas curvas forem utilizadas para o cálculo da velocidade médias em regiões que vão além das dimensões apresentadas, os resultados obtidos não irão apresentar boa representatividade, uma vez que as velocidades médias irão crescer até as abscissas 150, 600 e 450 cm para os ensaios E10, E30 e E40, respectivamente. Contudo, devido à sedimentação das partículas, nessas abscissas em que ocorre o ponto de inflexão da equação, provavelmente, a

corrente de turbidez, caso houvesse espaço para se desenvolver, apresentaria velocidades próximas a zero.

Nas etapas 3, 4 e 5, as velocidades longitudinais médias no eixo lateral, distante 100 cm do eixo central, seguiram uma tendência crescente até próximo à abscissa 175 cm e, após esse ponto, perfil decrescente, exceto para o experimento EB 1, que apresentou tendência decrescente da velocidade média ao longo de todo trecho avaliado, conforme Figura 35. Nesta imagem é possível notar que, com o aumento da vazão (Etapa 3) e da concentração (Etapa 4), as velocidades médias também aumentaram para um mesmo ponto em relação ao início do desconfinamento. O ponto de inflexão das equações da variação da velocidade média ocorrer próximo a abscissa 175 cm é um indicativo que, até esse ponto, a corrente ainda estava expandindo e, após esse local, há a estabilização do avanço da corrente.

Para todos os ensaios da Etapa 3, quando extrapolada a equação da linha de tendência apresentada na Figura 35, a velocidade média no eixo lateral apresenta valores nulos próximos a abscissa 350 cm. Neste local a concentração média da corrente de turbidez apresentou valores próximos a zero e o depósito formado apresentou espessura inferiores à 0,3 cm. Os valores das concentrações médias e espessura de depósito serão abordados em tópicos futuros deste trabalho.

O EA 45 (também chamado de EB 5 e EC 4 nas etapas 4 e 5, respectivamente) foi o experimento da Etapa 3 que apresentou coeficiente de determinação mais distante de um, o que sugere que os valores obtidos na equação da linha de tendência apresenta maior grau de incerteza, quando comparado os resultados obtidos nas demais equações da etapa em questão. Contudo, quando analisado o ensaio, no local em que a equação polinomial (Figura 35) aponta velocidade com valores nulos (abscissa 350 cm), nota-se a formação de depósito com espessura de, no máximo 0,27 cm, o que indica que os valores calculados na equação apresentaram resultados condizentes com a ensaio realizado.

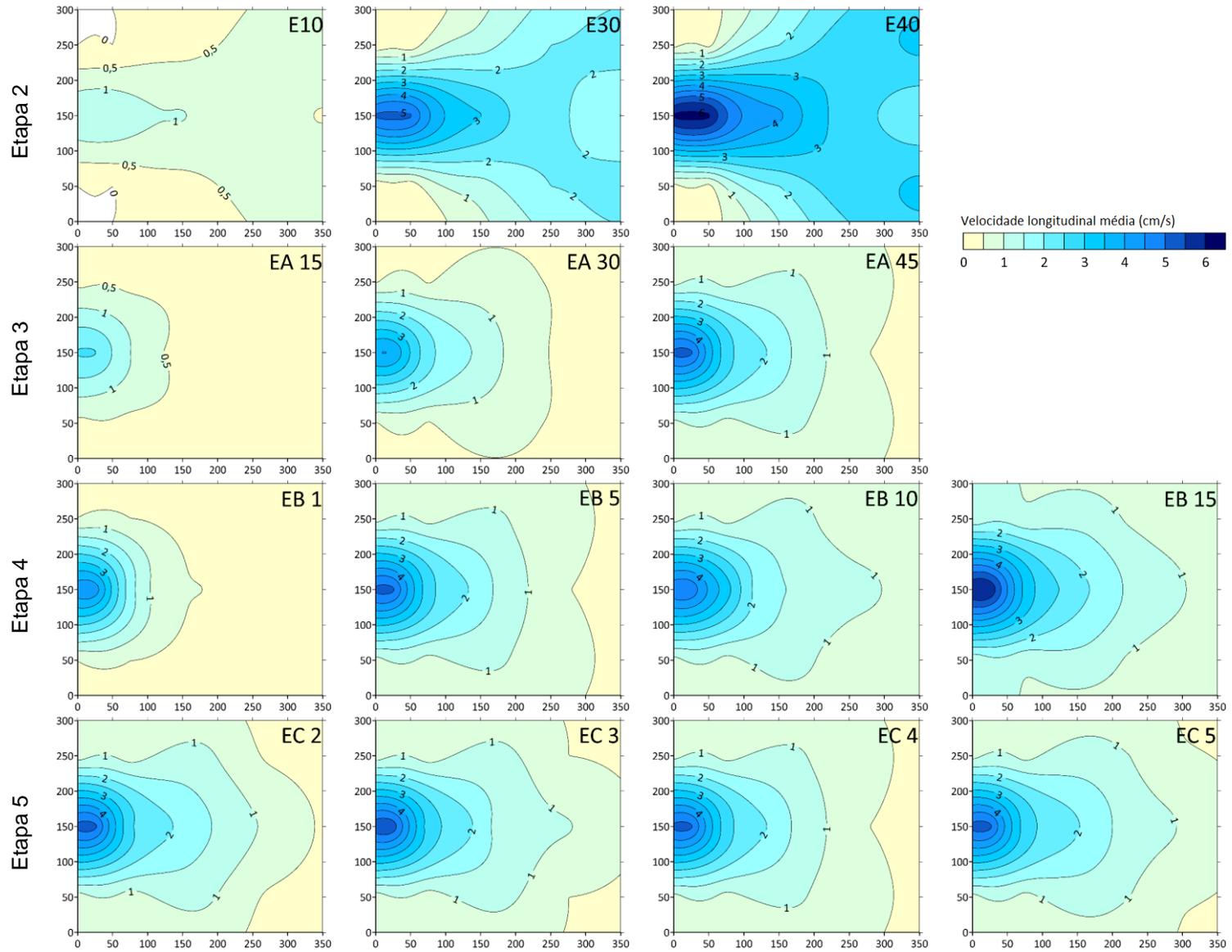
As equações das linhas de tendência da velocidade média longitudinal do eixo lateral para os ensaios da Etapa 4 (Figura 35), foram os que apresentaram menores coeficientes de determinação ($R^2 \cong 0,7$) entre todos os ensaios realizados nesta pesquisa, exceto o EB 1. Isso sugere que os valores das velocidades calculadas possuem menores precisões, devendo ser verificados e aplicados com maior cautela.

Aplicando a equação potencial de decaimento da velocidade para o EB 1 (Figura 35), o valor da velocidade média longitudinal no eixo lateral será aproximadamente $0,1 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ na abscissa 450 cm. Contudo, a concentração média da corrente (tema que será abordado em tópicos futuros), na abscissa 300 cm, é inferior a 0,1%, o que indica que caso houvesse mais espaço para se desenvolver, a corrente de turbidez provavelmente não iria atingir distâncias superiores a 350 cm. Diante disso, a equação potencial apresentada para estimar a velocidade média da corrente é recomendada para o trecho em que foram feitas as medições de velocidade, ou seja, de 75 a 275 cm. Para os demais ensaios da Etapa 4 (EB 5, EB 10 e EB 15), as equações polinomiais de grau dois (Figura 35) indicam que a velocidade média na direção longitudinal no eixo lateral, apresentam velocidade nula próxima à abscissa 350 cm. Embora estes ensaios apresentem equações com os menores coeficiente de determinação, a estimativa do local onde a velocidade é zero é condizente com os valores medidos de concentração e espessura do depósito formado (temas futuramente abordados), uma vez que estes dois parâmetros apresentaram valores próximos à zero na abscissa 350 cm.

As equações polinomiais para determinação das velocidades médias no eixo lateral, analisado para os ensaios da Etapa 5 (Figura 35), indicam que estas velocidades apresentam valores próximos à zero nas abscissas 290, 350, 350 e 315 cm para os ensaios EC 2, EC 3, EC 4 e EC 5, respectivamente. Diante disso, nota-se que a mudança da declividade do trecho confinado não forneceu uma tendência que permita relacionar a variação da inclinação *versus* aumento/ redução da abscissa em que a velocidade longitudinal é nula. Contudo, ao avaliar a concentração média e a espessura do depósito próximo às abscissas em que a equação aponta como local em que a velocidade é zero, nota-se que estes parâmetros apresentaram valores praticamente nulos, o que indica que a equação forneceu uma aproximação satisfatória.

De posse das velocidades longitudinais médias no eixo central e lateral do tanque de ensaio elaborou-se mapas de contorno para melhor compreensão da tendência da velocidade média ao longo da área analisada, conforme Figura 36. Na coordenada (0;150) é o local em que ocorre o início do desconfinamento da corrente de densidade.

Figura 36 - Mapa de contorno da velocidade longitudinal média



Fonte: Autor (2023)

O mapa de contorno apresenta uma melhor visualização das velocidades médias laterais (50 cm e 150 cm) pois, verifica-se que os picos apresentados nas etapas 3, 4 e 5, nas distâncias próximas a abscissa 175 cm (ver figura 35) são causados pelo formato da expansão mais alongado até os primeiros 100 cm, após isso apresenta formato mais radial (circular). Nos ensaios da Etapa 2 (sem quebra) os mapas de contorno apresentam uma expansão desde o início em termos de velocidade.

Através dos mapas de contorno apresentados na Figura 36 observa-se que, de maneira geral, a vazão, concentração e inclinação do leito do trecho confinado apresentam relação direta com a velocidade média longitudinal, em todos os pontos da área desconfinada analisada. O parâmetro inclinação do trecho confinado foi o que apresentou menor relação com a velocidade média pois, a variação deste parâmetro entre os ensaios não foi tão acentuada quanto à variação da vazão e concentração.

8.5 VELOCIDADE MÉDIA NA DIREÇÃO Y – PERFIL TRANSVERSAL

A apresentação dos perfis de velocidades para a direção transversal, diferentemente do exposto para a direção longitudinal, será apenas para a regiões desconfinada, uma vez que, no trecho confinado, o escoamento se comporta como unidirecional. A velocidade na direção transversal é a responsável pela expansão da corrente, diante disso, pode ser chamada de velocidade de expansão.

Na Figura 37 e Tabela 8 são apresentados os perfis verticais de velocidades na direção transversal ao longo do eixo longitudinal central e, as velocidades médias e máximas, respectivamente. Em todas as etapas do trabalho, no eixo central, a velocidade média de expansão da corrente diminuiu à medida que se avançou para a jusante do tanque de ensaios, assim como ocorreu com a velocidade média na direção longitudinal (velocidade de avanço). Do mesmo modo que ocorreu nos perfis de velocidade média na direção longitudinal, na direção transversal os perfis de velocidade apresentaram distribuição esperada para correntes de turbidez, com valor maior próximo ao fundo (nariz) e, valores decrescentes até a camada superior de fluido ambiente. A altura em que ocorreu a velocidade média máxima se manteve entre 2 e 4 cm, mesmo com a variação da vazão de injeção (etapas 2 e 3), mudança

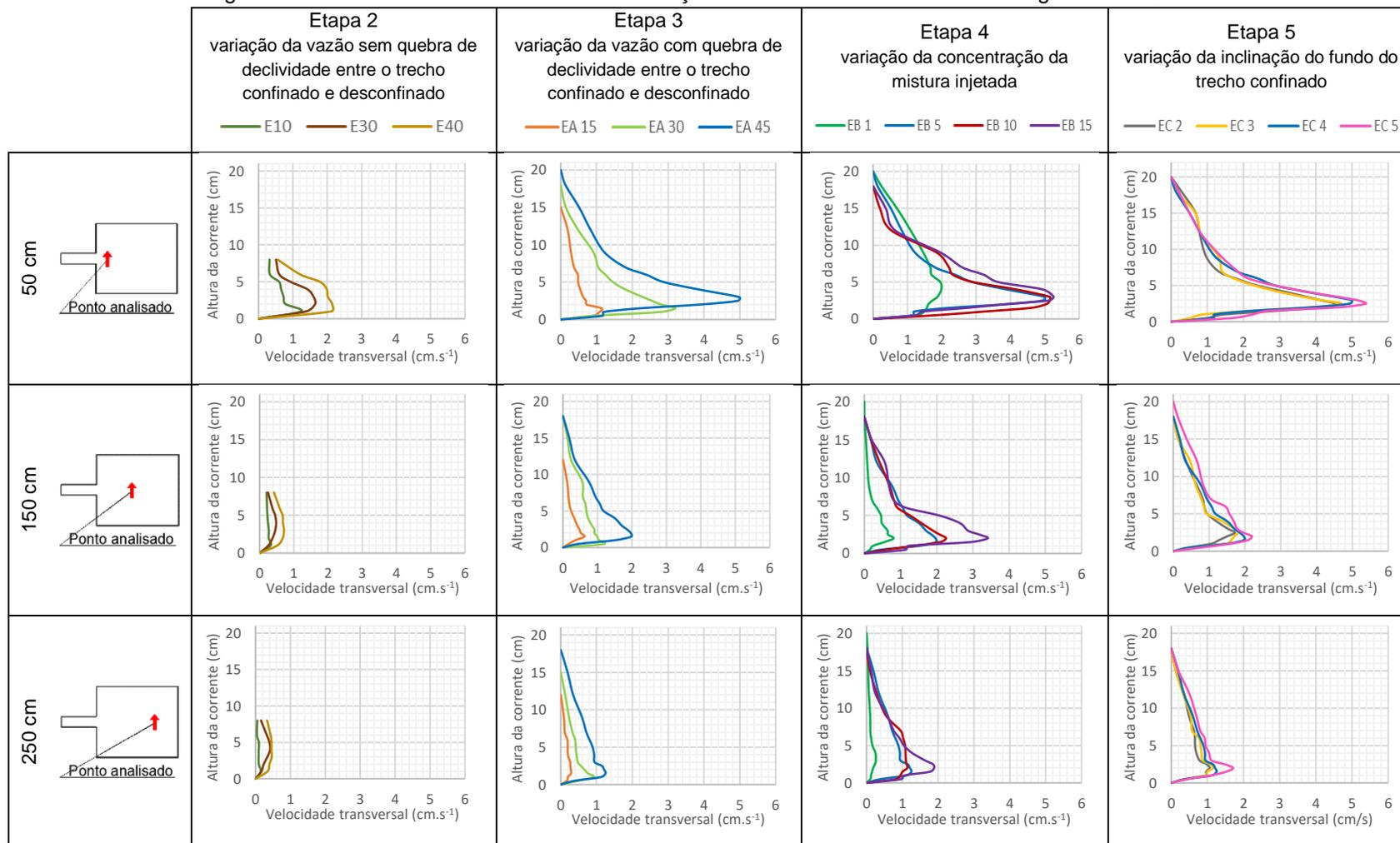
da concentração volumétrica da mistura injetada (Etapa 4) e, alteração da declividade do leito da região confinada (Etapa 5).

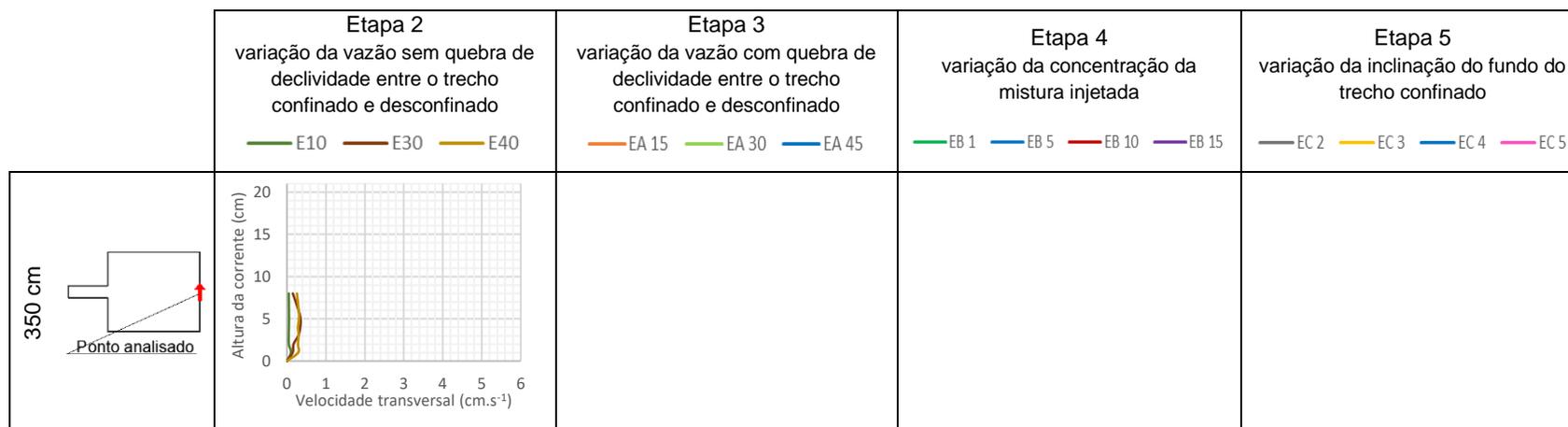
Nas etapas 2 e 3, as velocidades máximas e médias foram maiores nos experimentos com maiores vazões. A velocidade transversal média, no eixo central, na abscissa 50 cm, foi pelo menos 47% maior que as demais velocidades médias medidas desse eixo, indicando que nessa região é o local em que há maior expansão da corrente. Nos ensaios da Etapa 2, a diferença percentual entre a velocidade transversal máxima e média, de maneira geral, foram reduzidas conforme a corrente avançou para a jusante, ou seja, a velocidade ficou mais homogênea ao longo da vertical. Ainda na Etapa 2, à medida que aumentou-se a vazão, para uma mesma abscissa analisada, diminuiu-se a diferença percentual entre as velocidades máximas e médias.

Na Etapa 3, a relação média entre a velocidade média e máxima da expansão da corrente, ficou 74%, 70% e 65% para os ensaios EA 15, EA 30 e EA 45, respectivamente, ao longo do eixo longitudinal central. Com isso, nota-se que o aumento da vazão aumentou a diferença entre as velocidades médias e máximas, tornando a velocidade ao longo da vertical menos homogênea. Não foi possível observar uma tendência de aumento ou diminuição desta relação conforme a corrente se deslocou para a jusante, visto que este valor apresentou baixa variação (inferior a 10%), ora positiva, ora negativa.

Na Etapa 4, as maiores velocidades médias de expansão ocorreram nos experimentos com maiores concentrações da mistura injetada (EB 10 e EB 15). A relação média entre as velocidades longitudinais médias e máximas foram de 60%, 65%, 64% e 68% para os ensaios EB 1, EB 5, EB 10 e EB 15, respectivamente. Não foi constatado (exceto no EB 1 na abscissa 50 cm) variações superiores a 10% entre estas relações ao longo do trecho longitudinal central. Diante disso, observa-se que mesmo com o aumento da concentração, houve certa manutenção da proporção do perfil de velocidade transversal ao longo do eixo longitudinal.

Figura 37 - Perfis verticais de velocidade na direção transversal no eixo central da região desconfiinada





Fonte: Autor (2023)

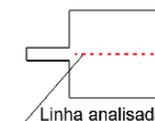


Tabela 8 – Velocidades máximas e médias na direção transversal no eixo central

Velocidade (cm.s ⁻¹)	Etapa 2			Etapa 3			Etapa 4			Etapa 5		
	E10	E30	E40	EA 15	EA 30	EA 45*	EB 1	EB 10	EB 15	EC 2	EC 3	EC 5
V _{máx} 50 cm	1,24	1,65	2,21	1,14	3,20	4,98	1,98	5,15	5,25	4,52	4,70	5,38
V _{méd} 50 cm	0,60	1,05	1,55	0,31	0,90	1,48	1,15	1,66	1,74	1,16	1,33	1,60
V _{máx} 150 cm	0,32	0,48	0,71	0,63	1,20	1,98	0,81	2,26	3,10	1,72	1,81	2,16
V _{méd} 150 cm	0,23	0,35	0,57	0,13	0,43	0,69	0,20	0,71	0,96	0,58	0,63	0,87
V _{máx} 250 cm	0,15	0,41	0,47	0,29	0,93	1,25	0,26	1,14	1,89	1,06	1,15	1,71
V _{méd} 250 cm	0,08	0,27	0,39	0,09	0,24	0,50	0,10	0,52	0,60	0,42	0,44	0,59
V _{máx} 350 cm	0,10	0,35	0,29	-	-	-	-	-	-	-	-	-
V _{méd} 350 cm	0,05	0,24	0,27	-	-	-	-	-	-	-	-	-

* O ensaio EA 45 também pode ser enquadrado nas etapas 4 e 5 com a denominação de EB 5 e EC 4, respectivamente.

Fonte: Autor (2023)

Da mesma forma que ocorreu com a velocidade média na direção longitudinal, a mudança da inclinação do leito do trecho confinado (Etapa 5) ocasionou baixa variação (desvio padrão inferior a 0,19) da velocidade média na direção transversal, para um mesmo ponto analisado. A relação média entre as velocidades médias e máximas foram de 67%, 66%, 65% e 65% para os ensaios EC 2, EC 3, EC 4 e EC 5, respectivamente. Diante disso, nota-se que, conforme aumentou-se a declividade do leito do trecho confinado, menos homogêneo ficou a velocidade ao longo da vertical. Em relação a proporção entre estas velocidades ao longo do eixo longitudinal central, houve redução desta medida conforme a corrente avançou para jusante.

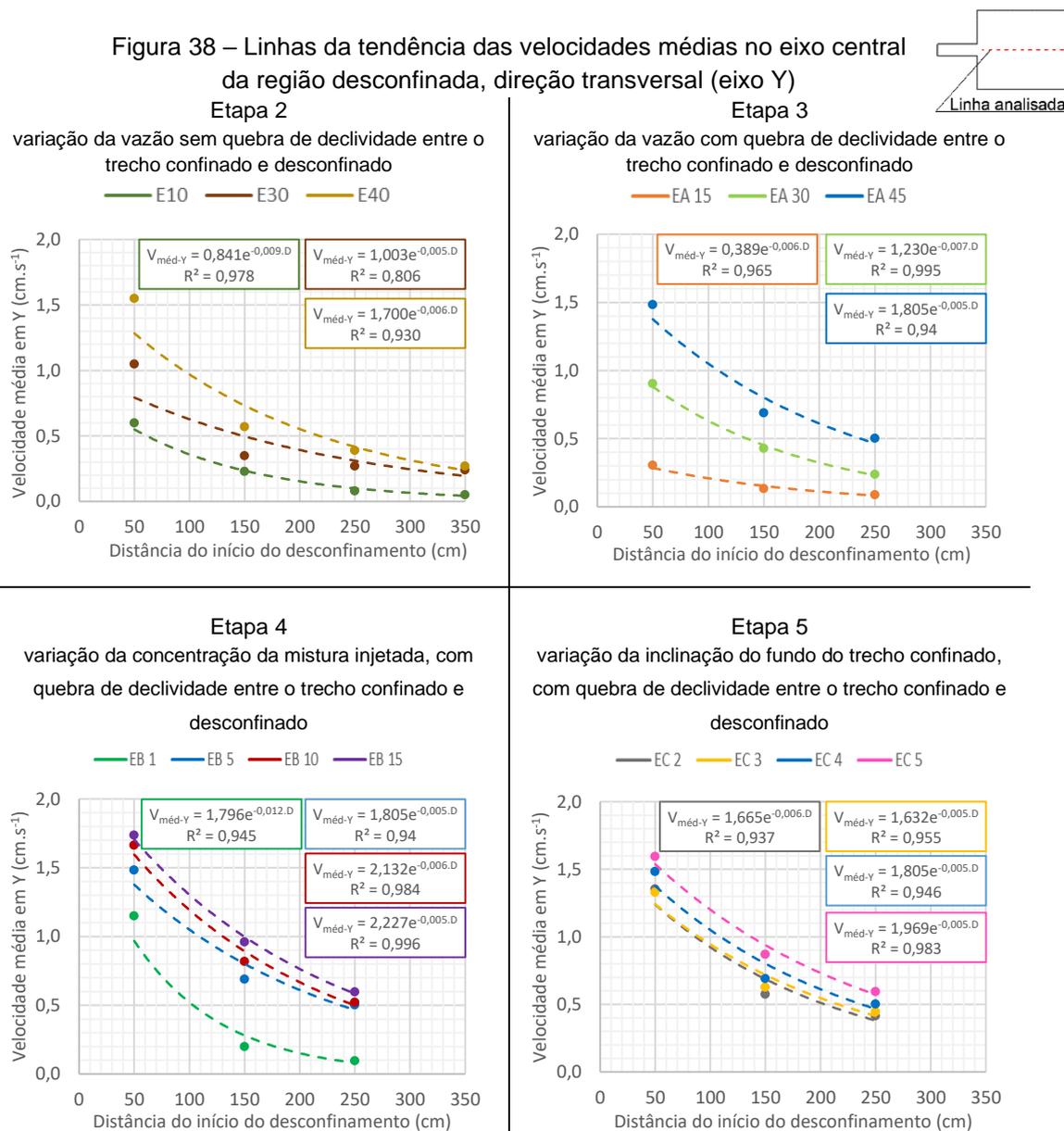
Na Figura 38 é apresentado as linhas de tendência (todas com equações do tipo exponencial) da variação da velocidade média na direção transversal, no eixo longitudinal central do tanque. Estas equações apresentam coeficientes de determinação (R^2) superiores a 0,9, exceto para o ensaio E30 que foi 0,8, o que indicam que quando empregadas, os resultados apresentam valores representativos.

Utilizando as equações da variação da velocidade média apresentadas na Figura 38, na Etapa 2, a taxa de desaceleração da velocidade transversal média, a cada 10 cm, foi de 8,6%, 4,9% e 5,8% para os ensaios E10, E30 e E40, respectivamente. Visto que não houve uma tendência (crescente ou decrescente) de variação dessa taxa, não foi possível observar qualquer tipo de comportamento deste parâmetro. Aplicando as equações da Figura 38, tem-se que nas abscissas 240, 460 e 470 cm a velocidade de expansão da corrente de turbidez atinge valores inferiores a $0,1 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ para os ensaios E10, E30 e E40, respectivamente, ou seja, a corrente apresenta reduzida expansão na direção transversal a partir destes locais. Diante destes resultados, pode-se afirmar a velocidade resultante⁶ responsável pelo deslocamento e avanço da corrente, a partir destas abscissas, é predominantemente dependente da componente da velocidade longitudinal (V_x).

Utilizando as equações da Figura 38, nos ensaios EA 15, EA 30 e EA 45, a partir das abscissas 240, 360 e 580 cm, respectivamente, a velocidade de expansão da corrente apresenta valores inferiores a $0,1 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$, ou seja, a partir destes pontos a velocidade resultante responsável pelo deslocamento da corrente de turbidez iria ser

⁶ A velocidade resultante é composta pela soma vetorial da velocidade longitudinal (V_x) e transversal (V_y)

predominantemente composta pela velocidade longitudinal, caso houvesse espaço suficiente para o desenvolvimento. A taxa de desaceleração da velocidade transversal média, a cada 10 cm, foi de 5,8%, 6,8% e 4,9% para os ensaios EA 15, EA 30 e EA 45, respectivamente. Diante disso, assim como ocorrido na Etapa 2, não foi possível estabelecer um comportamento/ padrão que relaciona a variação de vazão com a taxa de decaimento da velocidade transversal.



Fonte: Autor (2023)

Na Etapa 4, com variação da concentração, a taxa de desaceleração da velocidade transversal, a cada 10 cm, de maneira geral, foi maior para os ensaios com

menor concentração da mistura injetada, sendo 11,3%, 4,9%, 5,8% e 4,9% para os experimentos EB 1, EB 5, EB 10 e EB 15, respectivamente. O fato de o EB 5 ter apresentado taxa de variação inferior ao EB 10, pode ser explicado devido ao sedimento empregado neste experimento (carvão SR) ser diferente dos demais ensaios da etapa (carvão 405). Quando empregado a equação da variação da velocidade média transversal ao longo do eixo longitudinal central (Figura 38) para estimar a influência desta na velocidade resultante, obtém-se que a primeira velocidade apresenta contribuições nesta segunda até a abscissa 240, 580, 510 e 620 cm, para os ensaios EB 1, EB 5, EB 10 e EB 15, respectivamente. Com esses dados, nota-se que, de maneira geral, o aumento da concentração contribui para o maior alcance da velocidade de expansão nas correntes de turbidez.

A variação da inclinação do leito do trecho confinado (Etapa 5) proporcionou decaimento percentual da velocidade transversal semelhantes entre a maioria dos experimentos desta fase. Esse decaimento, a cada 10 cm, corresponde a 5,8% para o EC 2 e 4,9% para os demais ensaios (EC 3, EC 4 e EC 5). Essa diferença da taxa de decaimento da velocidade transversal está relacionada a menor velocidade da corrente de turbidez do EC 2 no trecho confinado, o que teve como consequência no valor da velocidade tanto transversal (V_Y) como longitudinal (V_X), no trecho desconfinado. Quando aplicada a equação da velocidade média transversal, no eixo longitudinal central (Figura 38), tem-se que, caso houvesse espaço para o desenvolvimento da corrente, a partir da abscissa 470, 560, 580 e 590 cm, para os experimentos EC 2, EC 3, EC 4 e EC 5, respectivamente, a corrente de turbidez apresentaria velocidade de expansão inferior a $0,1 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$. Diante desses resultados, a variação da inclinação do leito do trecho confinado, de maneira geral, não influenciou na taxa de desaceleração da velocidade de expansão das correntes de turbidez. Contudo, quanto maior a diferença entre a declividade do trecho confinado e desconfinado, maior será o alcance da velocidade transversal (V_Y).

Os perfis verticais de velocidade na direção longitudinal, no eixo lateral – distante 100 cm do eixo longitudinal central, são apresentados na Figura 39. Nesse eixo as velocidades médias na direção transversal, de maneira geral, apresentaram pico próximo a abscissa 150 cm (Tabela 9). Nos experimentos E10 e EA 15 não foi possível obter os valores de velocidade transversal na distância 50 cm pois, a corrente

de turbidez não atingiu essa região (ver Figura 67), em função das baixas vazões de injeção das correntes.

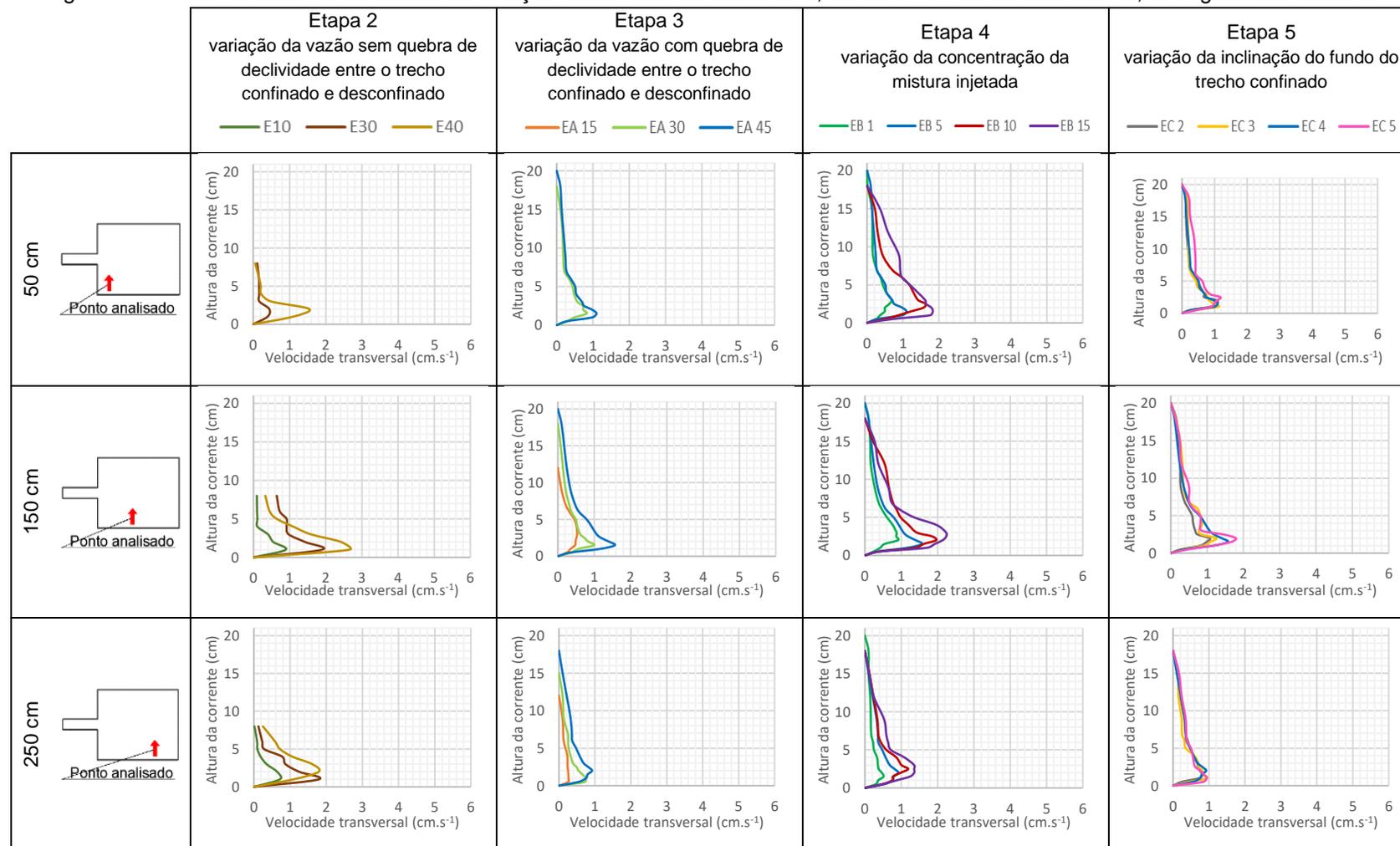
Assim como nos perfis de velocidade média na direção transversal - eixo central, no eixo lateral analisado, os perfis de velocidade apresentaram maiores velocidades junto ao fundo, com pico entre a altura 2 e 4 cm e, após essa altura, os valores das velocidades médias decresceram até a camada superior de fluido ambiente

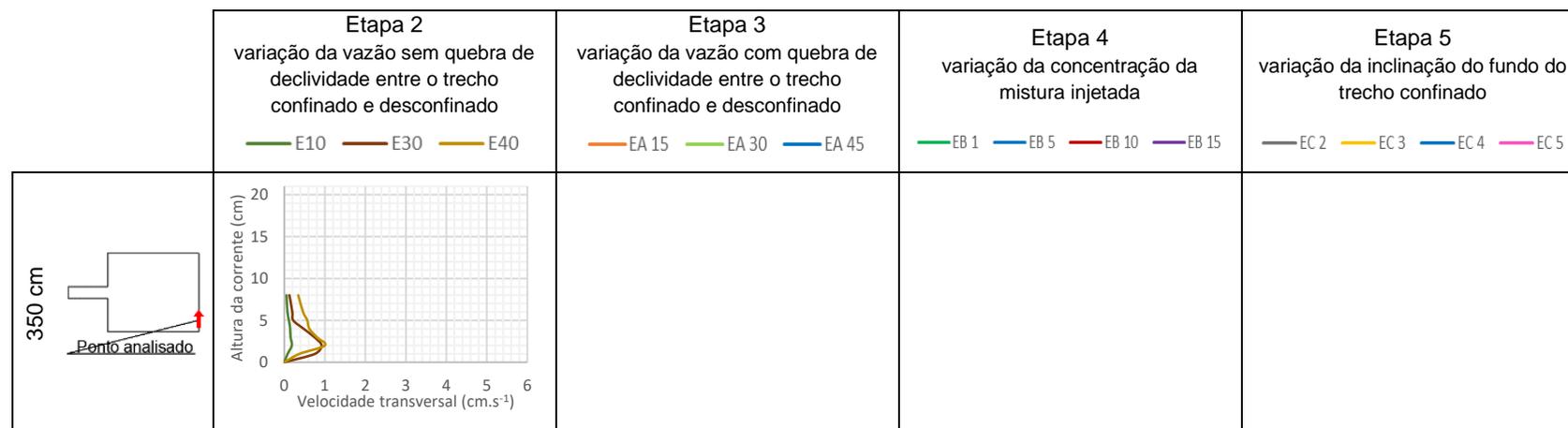
O aumento da vazão (etapas 2 e 3), independentemente de haver quebra de declividade entre as regiões confinada e desconfinada, ocasionou maiores velocidades máximas e médias. Nesta direção, o aumento da concentração da mistura injetada (Etapa 4) e da declividade do leito do trecho confinado (Etapa 5) teve, de maneira geral, velocidades máximas e médias maiores, para uma mesma abscissa analisada.

Visando equacionar a variação da velocidade média transversal no eixo lateral, a equação do tipo polinomial de grau dois foi a que mais se ajustou aos valores medidos, conforme Figura 40. Com este tipo de equação, o coeficiente de determinação (R^2) ficou acima de 0,8 em 77% dos ensaios realizados, o que proporciona confiabilidade nos dados calculados. A Etapa 4, na qual variou-se a concentração da mistura injetada, foi a que apresentou os menores valores de R^2 .

Na Etapa 2, na qual variou-se a vazão em um ambiente sem quebra de declividade entre os trechos confinado e desconfinado, enquanto no eixo lateral a velocidade média longitudinal (ver Figura 35) apresentou tendência crescente ao longo de todo eixo longitudinal analisado (0 a 350 cm), a velocidade média transversal apresentou tendência crescente até próximo da abscissa 200 cm (Figura 40). Aplicando as equações para determinação da velocidade média transversal, obtém-se que caso houvesse espaço suficiente para o desenvolvimento da corrente, na abscissa 390, 420 e 380 cm a velocidade média atingiria valores nulos, deixando de contribuir com a velocidade resultante do escoamento, para os ensaios E10, E30 e E40, respectivamente.

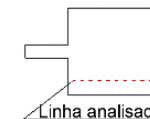
Figura 39 - Perfis verticais de velocidade na direção transversal no eixo lateral, distante 100 cm do eixo central, da região desconfiada





Fonte: Autor (2023)

Tabela 9 – Velocidades máximas e médias na direção transversal no eixo lateral, distante 100 cm do eixo central, da região desconfinada

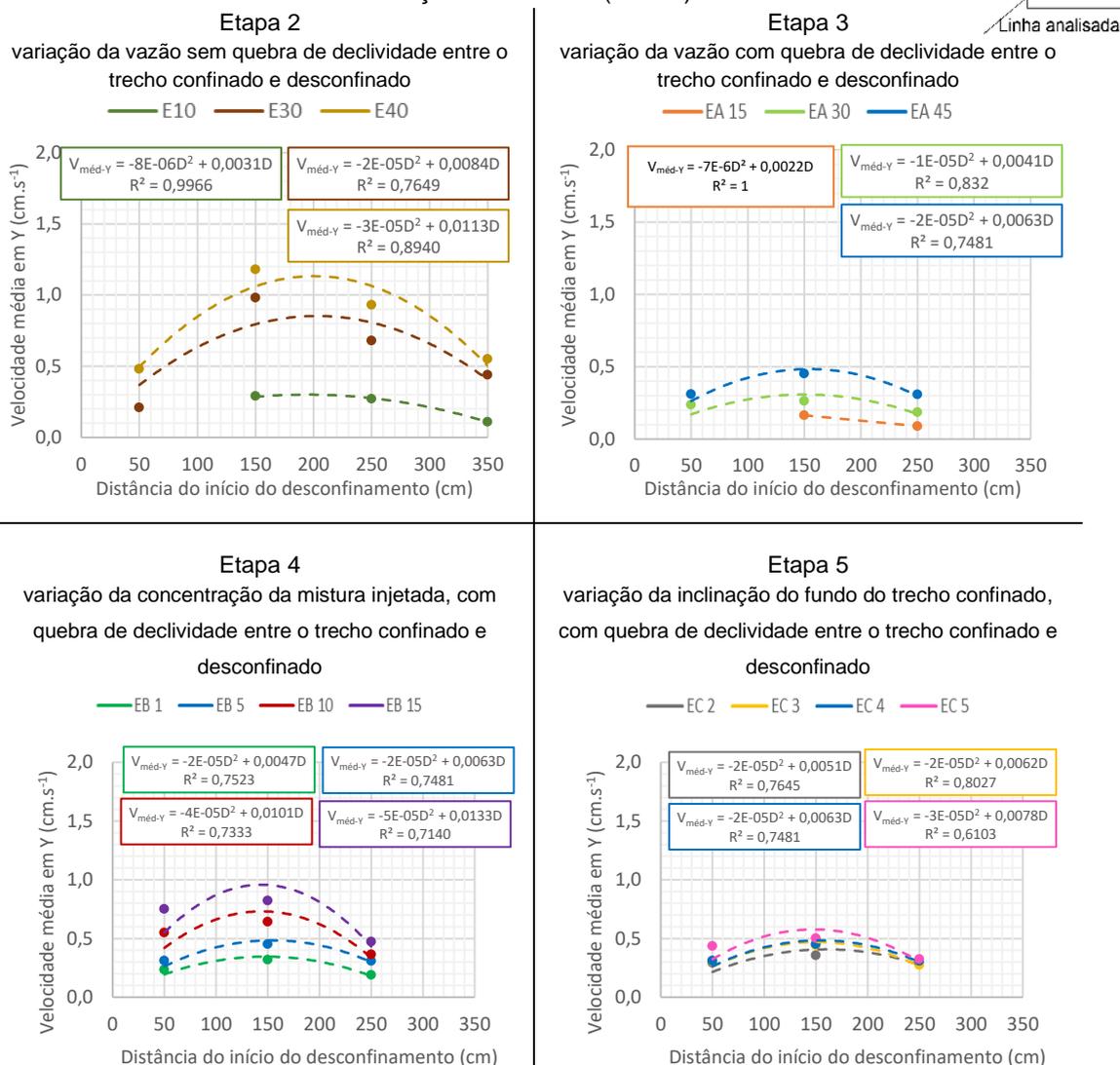


Velocidade (cm.s ⁻¹)	Etapa 2			Etapa 3			Etapa 4			Etapa 5		
	E10	E30	E40	EA 15	EA 30	EA 45*	EB 1	EB 10	EB 15	EC 2	EC 3	EC 5
V _{máx} 50 cm	-	0,44	1,55		0,82	1,10	0,68	1,63	1,83	1,09	1,12	1,19
V _{méd} 50 cm	-	0,21	0,48		0,24	0,31	0,23	0,55	0,75	0,29	0,31	0,44
V _{máx} 150 cm	0,89	1,90	2,65	0,53	1,00	1,57	0,91	1,97	2,24	1,07	1,25	1,79
V _{méd} 150 cm	0,29	0,98	1,18	0,16	0,26	0,45	0,32	0,64	0,82	0,35	0,44	0,50
V _{máx} 250 cm	0,72	1,80	1,79	0,27	0,75	0,92	0,52	1,19	1,36	0,82	0,94	0,94
V _{méd} 250 cm	0,27	0,68	0,93	0,09	0,19	0,31	0,19	0,36	0,47	0,29	0,27	0,32
V _{máx} 350 cm	0,18	0,92	1,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-
V _{méd} 350 cm	0,11	0,44	0,55	-	-	-	-	-	-	-	-	-

* O ensaio EA 45 também pode ser enquadrado nas etapas 4 e 5 com a denominação de EB 5 e EC 4, respectivamente.

Fonte: Autor (2023)

Figura 40 - Velocidades médias eixo lateral, distante 100 cm do eixo central, direção transversal (eixo Y)



Fonte: Autor (2023)

A variação da vazão em um ambiente com quebra de declividade entre as zonas confinada e desconfinada (Etapa 3) apresentou velocidade média transversal, com sentido ascendente até próximo da abscissa 160 cm e, após este ponto, esta velocidade apresentou tendência decrescente, no eixo lateral analisado (Figura 40). Nesta etapa, e neste eixo, a velocidade média longitudinal também apresentou comportamento semelhante, com crescimento até a abscissa 175 cm (ver Figura 35). Quando extrapolada as equações das linhas de tendências da Etapa 3, a velocidade transversal média, no eixo lateral, apresenta valores nulos próximos a abscissa 310, 410 e 320 cm, para os experimentos EA 15, EA 30 e EA 45, respectivamente.

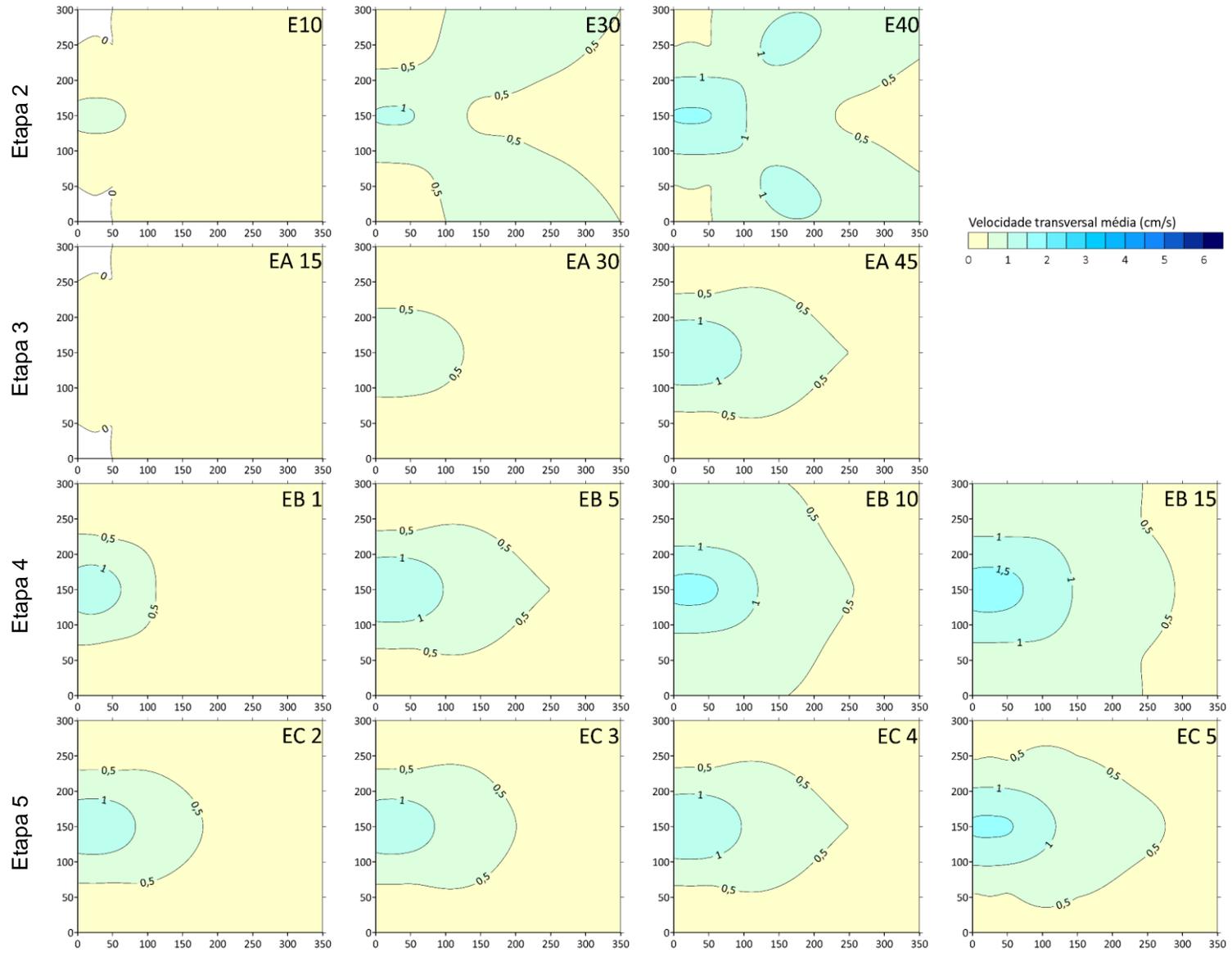
Com a variação da concentração da mistura injetada (Etapa 4) a tendência da velocidade transversal média foi crescente até a abscissa 150 cm e, após este ponto decrescente (Figura 40). Quando extrapolada as equações das linhas de tendência da velocidade média transversal, obtém-se que esta velocidade, caso houvesse espaço suficiente para o completo desenvolvimento, apresentaria valor nulo para os ensaios EB 1, EB 5, EB 10 e EB 15 nas abscissas 235, 320, 255 e 265 cm, respectivamente. A discrepância do valor calculado para o EB 5 ocorre devido ao sedimento utilizado neste ensaio apresentar maior porcentagem de partículas finas. Com esses alcances nota-se que entre as abscissas 250 cm e 350 cm (alcance calculado da velocidade longitudinal), aproximadamente, a velocidade resultante da corrente de turbidez provém exclusivamente da velocidade longitudinal.

Na Etapa 5, as equações polinomiais (Figura 40) para determinação das velocidades transversais médias, no eixo lateral analisado, apontaram valores nulos próximo às abscissas 255, 310, 320 e 260 cm para os ensaios EC 2, EC 3, EC 4 e EC 5, respectivamente, caso houvesse espaço suficiente para o completo desenvolvimento da corrente de turbidez. Nota-se que, nos três primeiros valores calculados, a tendência é de aumento do alcance da velocidade transversal média, conforme se eleva a inclinação do trecho confinado. Contudo, no EC 5 essa propensão é rompida, o que pode ser explicado pelo baixo valor do coeficiente de determinação ($R^2 = 0,61$), o que sugere que a equação apresentada para calcular a velocidade transversal média apresenta menor representatividade, quando comparado com os demais experimentos da etapa.

Assim como feito para as velocidades longitudinais médias, elaborou-se o mapa de contorno para ilustrar a distribuição das velocidades transversais médias, Figura 41. Na coordenada (0;150) é o local em que ocorre o início do desconfinamento da corrente de densidade. A escala adotada foi a mesma utilizada nos mapas de contorno da velocidade longitudinal média (Figura 36), de modo a permitir comparação entre as componentes da velocidade de avanço (velocidade longitudinal) e de expansão (velocidade transversal).

Nas etapas 3, 4 e 5, a geometria de avanço da velocidade de expansão ocorre de maneira alongada, conforme aumenta a vazão, concentração e declividade do leito do trecho confinado, respectivamente. Já na Etapa 2, houve comportamento distinto entre os eixos longitudinais central e lateral, não sendo possível atribuir uma geometria para tal expansão.

Figura 41 - Mapa de contorno da velocidade transversal média



Fonte: Autor (2023)

Buscando relacionar os valores das velocidades médias longitudinais e transversais, no eixo longitudinal central, criou-se a Figura 42. Nesta, na Etapa 2, nas regiões mais próximas ao início do desconfinamento, a velocidade transversal é mais significativa na velocidade resultante, ou seja, é o trecho em que a velocidade de expansão da corrente apresenta maiores valores em relação a velocidade longitudinal.

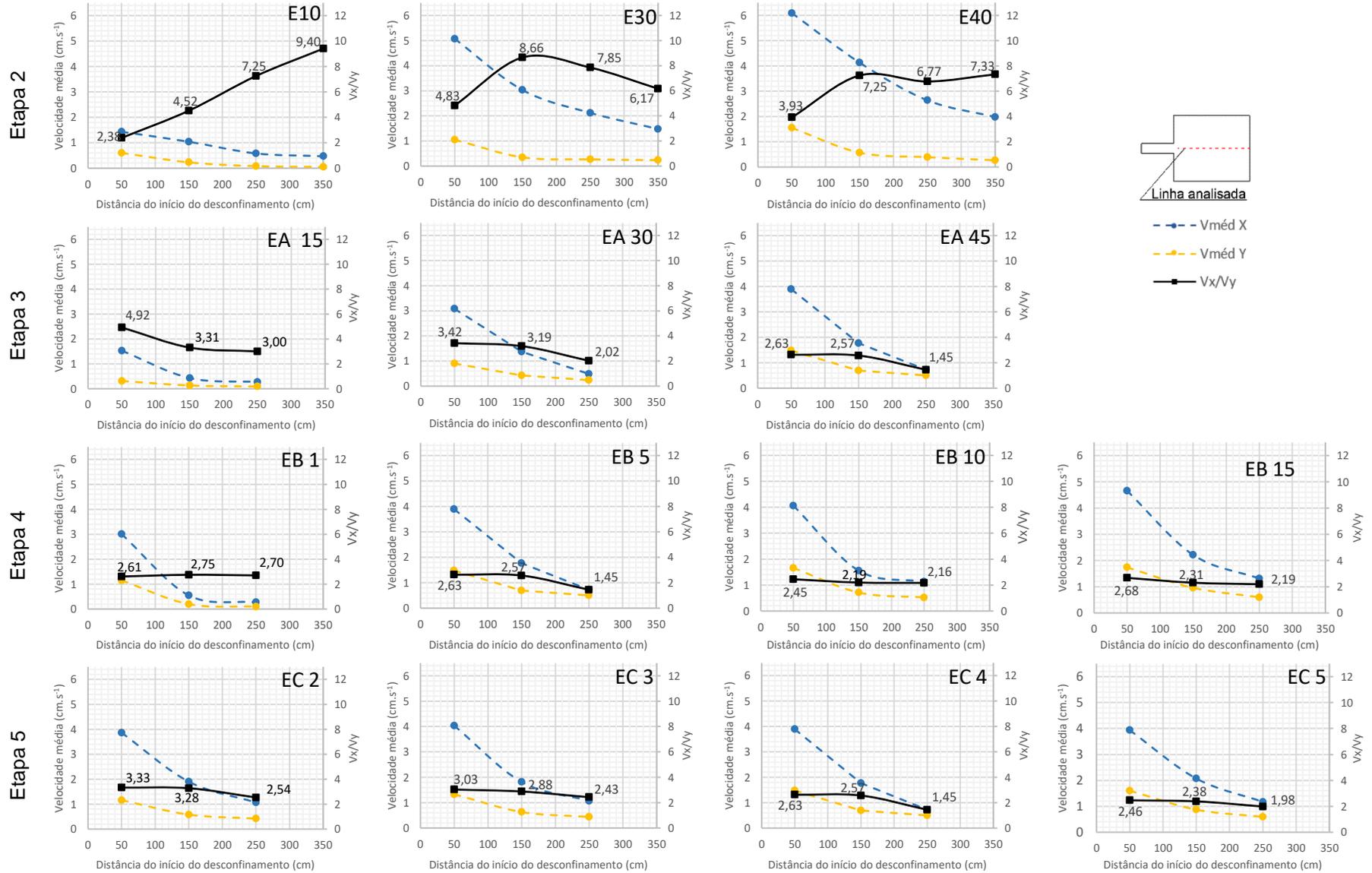
A relação entre V_x/V_Y no ensaio E10 aumentou à medida que se avançou para jusante do tanque, ou seja, a velocidade de expansão da corrente apresentou cada vez menor peso na velocidade resultante da corrente. Nos ensaios E30 e E40, após 150 cm, a influência da velocidade transversal média na velocidade resultante diminuiu e tendeu a uma estabilização. Vale ressaltar que nos ensaios da Etapa 2 o perfil de velocidade vertical foi feito através da medição de velocidades em sete diferentes alturas, o que acabou tendo como consequência a não determinação da altura da corrente, uma vez que as leituras de velocidade foram feitas em pontos previamente definidos. Diante disso, a velocidade média tanto na direção X, quanto na Y, foi realizada adotando a altura da corrente como sendo 8 cm (altura da medição mais alta). Sendo assim, as velocidades médias da Etapa 2 correspondem a velocidade média da corrente até a altura de 8 cm. Na Etapa 3, na qual variou a vazão de injeção em um ambiente com quebra de declividade entre a região confinada e desconfinada, a parcela da velocidade de avanço média (velocidade longitudinal média) apresentou menor peso na velocidade resultante, conforme a corrente avançou para a jusante. Para o EA 15, nas distâncias de 50, 150 e 250 cm, a velocidade longitudinal foi responsável por 98%, 96% e 95% da velocidade resultante, respectivamente. No EA 30, para as distâncias 50, 150 e 250 cm a velocidade longitudinal correspondeu a 96%, 94% e 90%, respectivamente, da velocidade resultante. No EA 45, para as mesmas distâncias, a relação entre a velocidade transversal média e a resultante foi de 93%, 92% e 82%, respectivamente. Diante disso, o aumento da vazão ocasionou redução da relação da velocidade longitudinal frente à transversal, para uma mesma abscissa analisada e, ao longo do eixo longitudinal central, para uma mesma vazão, a relação V_x/V_Y diminuiu com o avanço da corrente.

Na Etapa 4, com a variação da concentração da mistura injetada e manutenção da vazão de injeção, notou-se que na distância de 50 cm em relação ao início do

desconfinamento, a velocidade longitudinal média foi a responsável por 93% (com variação máxima $\pm 1\%$) da velocidade resultante, para todos os experimentos da referida fase. Para a distância de 150 e 250 cm, essa relação passou a ser 92%, com variação máxima $\pm 2\%$, exceto para o EB 5 na distância de 250 cm que a relação foi de 82%. Essa discrepância de resultado para o EB 5 ocorre devido este ensaio ter sido realizado com sedimentos de menor granulometria (carvão SR). Considerando estes resultados, tem-se que a variação da concentração não alterou a influência/peso das velocidades médias de avanço/ expansão na velocidade resultante.

O aumento da declividade do leito da região confinada (Etapa 5), para uma mesma abscissa analisada, de maneira geral, teve como consequência a redução da relação entre a velocidade média na direção longitudinal e transversal (V_x/V_y), ou seja, a velocidade de expansão (V_y) apresentou maior peso na velocidade resultante da corrente de turbidez. Para a distância 50 cm a velocidade longitudinal média correspondeu a 96%, 95%, 93% e 93% da velocidade resultante, para os ensaios EB 1, EB 5, EB 10 e EB 15, respectivamente. Na distância 150 cm, para as mesmas distâncias analisadas, o peso da velocidade de avanço na velocidade resultante foi de 96%, 94%, 93% e 92%, para os ensaios EB 1, EB 5, EB 10 e EB 15, respectivamente. A última abscissa analisada foi a 250 cm e, neste local, a relevância da velocidade longitudinal média, frente à velocidade resultante, foi de 93%, 92%, 82% e 89%, para os ensaios EB 1, EB 5, EB 10 e EB 15, respectivamente. Diante destes dados, nota-se que a velocidade longitudinal apresenta menor parcela na velocidade resultante, à medida que aumenta a inclinação do leito da região confinada e, conforme a corrente avança para a jusante.

Figura 42 - Relações entre as velocidades médias longitudinais e transversais ao longo da região desconfina - eixo central longitudinal

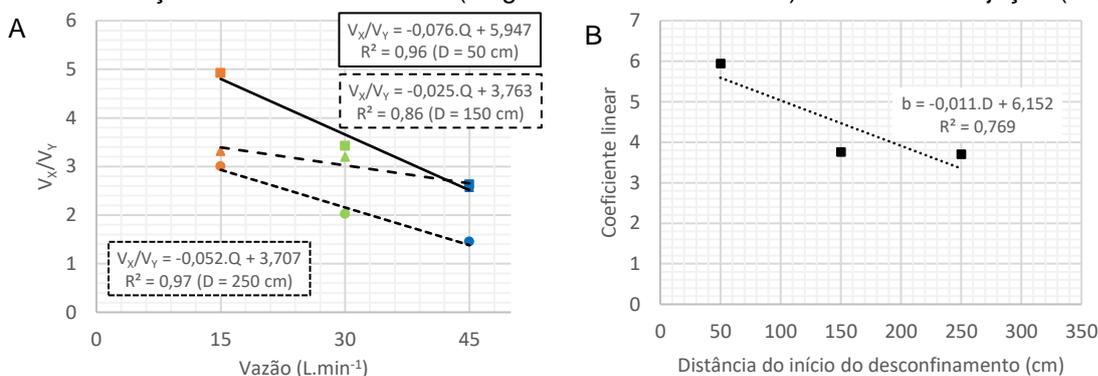


Fonte: Autor (2023)

Através dos dados de V_x/V_y apresentados na Figura 42, buscou-se equacionar essa relação com os parâmetros variados de cada etapa (vazão para a Etapa 3, concentração para a Etapa 4 e inclinação do leito do trecho confinado para a Etapa 5). Não foi feita essa análise para a Etapa 2 pois as velocidades médias destes experimentos correspondem à velocidade média para os primeiros 8 cm da altura da corrente de turbidez e não a velocidade média da corrente, como medido nas demais etapas deste trabalho.

Na Etapa 3, ao relacionar as velocidades de avanço e de expansão com a vazão, obteve-se na equação linear o melhor tipo de ajuste com os dados que foram medidos, conforme Figura 43 (A). Embora a linearização para a diferentes distâncias em que foram feitas as medições de velocidade ter apresentado equações de inclinações distintas, com coeficiente angular variando de -0,025 a -0,076, considerou que este coeficiente, para uma equação geral, pode ser expresso pela média para equações das três distâncias (50, 150 e 250 cm). Adotou-se que o coeficiente linear pode ser representado por uma equação de primeiro grau, que depende dos coeficientes lineares para as distâncias em que se fez as medições, obtendo-se a relação apresentada na Figura 43 (B).

Figura 43 – Relação entre as velocidades (longitudinais e transversais) e a vazão de injeção (Etapa 3)



Fonte: Autor (2023)

Diante das considerações feitas anteriormente e buscando uma equação que estabeleça relação entre a vazão e as velocidades, chegou-se à Equação 6.

$$\frac{V_x}{V_y} = -0,051 \cdot Q_{\text{injeção}} - 0,011 \cdot D + 6,152 \quad (\text{Equação 6})$$

Onde:

V_x é velocidade de média de avanço da corrente de turbidez (cm.s^{-1});

V_y é velocidade de média de expansão da corrente de turbidez (cm.s^{-1});

$Q_{\text{injeção}}$ é a vazão da corrente de turbidez (L.min^{-1});

D é a distância em relação ao início do desconfinamento (cm).

Aplicando a Equação 6 e comparando com os dados apresentados na Figura 42, obtém-se precisão acima de 76%, o que é considerado satisfatório para experimentos físicos.

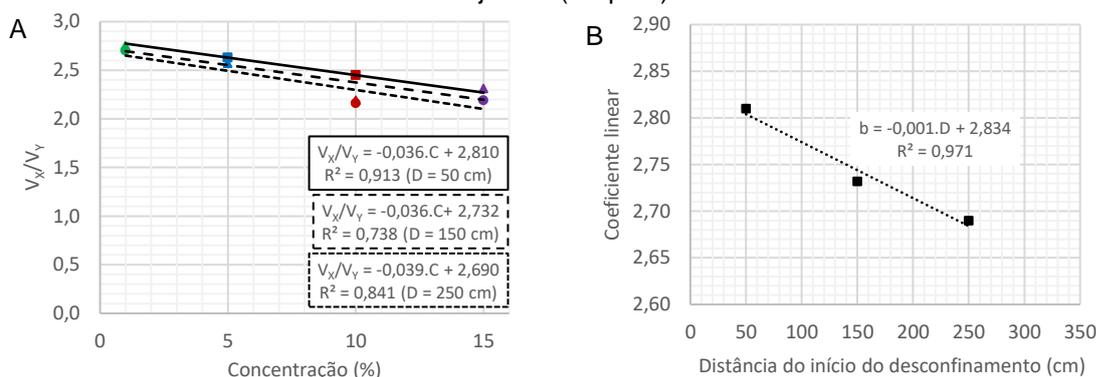
Tabela 10 – Precisão da Equação 6

$Q_{\text{injeção}}$ (L.min^{-1})	D (cm)	V_x/V_y (Equação 6)	V_x/V_y (Figura 42)	Precisão
15	50	5,00	4,92	98%
15	150	3,90	3,31	89%
15	250	2,80	3,00	88%
30	50	4,04	3,42	84%
30	150	2,94	3,19	93%
30	250	1,84	2,02	93%
45	50	3,08	2,63	80%
45	150	1,98	2,57	86%
45	250	0,88	1,45	76%

Fonte: Autor (2023)

Ao relacionar concentração da mistura injetada com as velocidades de avanço e de expansão com a concentração (Etapa 4), assim como na Etapa 3, a equação linear foi a que apresentou melhor ajuste, conforme Figura 44 (A). Nesta tentativa de linearização foi desconsiderada a relação V_x/V_y no ensaio EC 5 na distância 250 cm pois, neste local, a relação apresentava elevada discrepância com os demais dados para a referida abscissa (maior que 60%). Na mesma lógica em que foi feito na determinação da Equação 6, na equação geral da Etapa 4, considerou-se que o coeficiente angular corresponde à média dos coeficientes angulares das equações da Figura 44 (A). O coeficiente linear foi obtido através da equação de primeiro grau, que depende da distância, em relação ao início do desconfinamento Figura 44 (B).

Figura 44 – Relação entre as velocidades (longitudinais e transversais) e a concentração da mistura injetada (Etapa 4)



Fonte: Autor (2023)

Neste contexto, chegou-se à Equação 7, a qual relaciona as velocidades longitudinais e transversais das correntes de turbidez, com a concentração e a distância, em relação ao início do desconfinamento.

$$\frac{V_x}{V_y} = -0,037.C_{\text{injeção}} - 0,001.D + 2,834 \quad (\text{Equação 7})$$

Onde:

V_x é velocidade de média de avanço da corrente de turbidez (cm.s^{-1});

V_y é velocidade de média de expansão da corrente de turbidez (cm.s^{-1});

$C_{\text{injeção}}$ é a concentração de injeção da corrente de turbidez (%);

D é a distância em relação ao início do desconfinamento (cm).

Na Tabela 11 é apresentada a precisão da Equação 7, a qual foi superior a 80% em 92% dos dados, o que foi considerado satisfatório.

Tabela 11 – Precisão da Equação 7

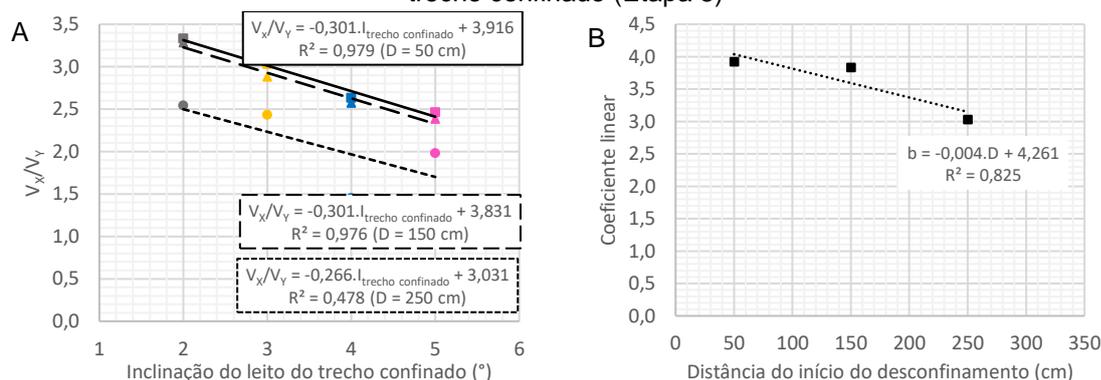
$C_{\text{injeção}}$ (%)	D (cm)	V_x/V_y (Equação 7)	V_x/V_y (Figura 42)	Precisão
1	50	2,75	2,61	95%
1	150	2,65	2,75	96%
1	250	2,55	2,70	94%
5	50	2,60	2,63	99%
5	150	2,50	2,57	97%
5	250	2,40	1,45	60%

Cinjeção (%)	D (cm)	V_x/V_y (Equação 7)	V_x/V_y (Figura 42)	Precisão
10	50	2,41	2,45	99%
10	150	2,31	2,19	95%
10	250	2,21	2,16	98%
15	50	2,23	2,68	83%
15	150	2,13	2,31	92%
15	250	2,03	2,19	93%

Fonte: Autor (2023)

Assim como nas etapas anteriores, a equação do tipo linear também foi a que mais se ajustou na busca por equacionar dados que relacionam velocidade e inclinação do leito do trecho confinado, conforme apresentado na Figura 45. o coeficiente angular e linear foi obtido da mesma maneira que nas etapas 3 e 4.

Figura 45 – Relação entre as velocidades (longitudinais e transversais) e a inclinação do leito do trecho confinado (Etapa 5)



Fonte: Autor (2023)

Diante do exposto, obteve-se a Equação 8, a qual relaciona as velocidades de avanço e de expansão das correntes de turbidez, com a inclinação do leito do trecho confinado e a distância.

$$\frac{V_x}{V_y} = -0,289 \cdot I_{\text{trecho confinado}} - 0,004 \cdot D + 4,261 \quad (\text{Equação 8})$$

Onde:

V_x é velocidade de média de avanço da corrente de turbidez ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$);

V_Y é velocidade de média de expansão da corrente de turbidez (cm.s^{-1});

$I_{\text{trecho confinado}}$ é a inclinação do leito da região confinada (%);

D é a distância em relação ao início do desconfinamento (cm).

Na Tabela 12 é apresentada a precisão da Equação 8, a qual foi superior a 90% em 92% dos dados, o que foi considerado satisfatório.

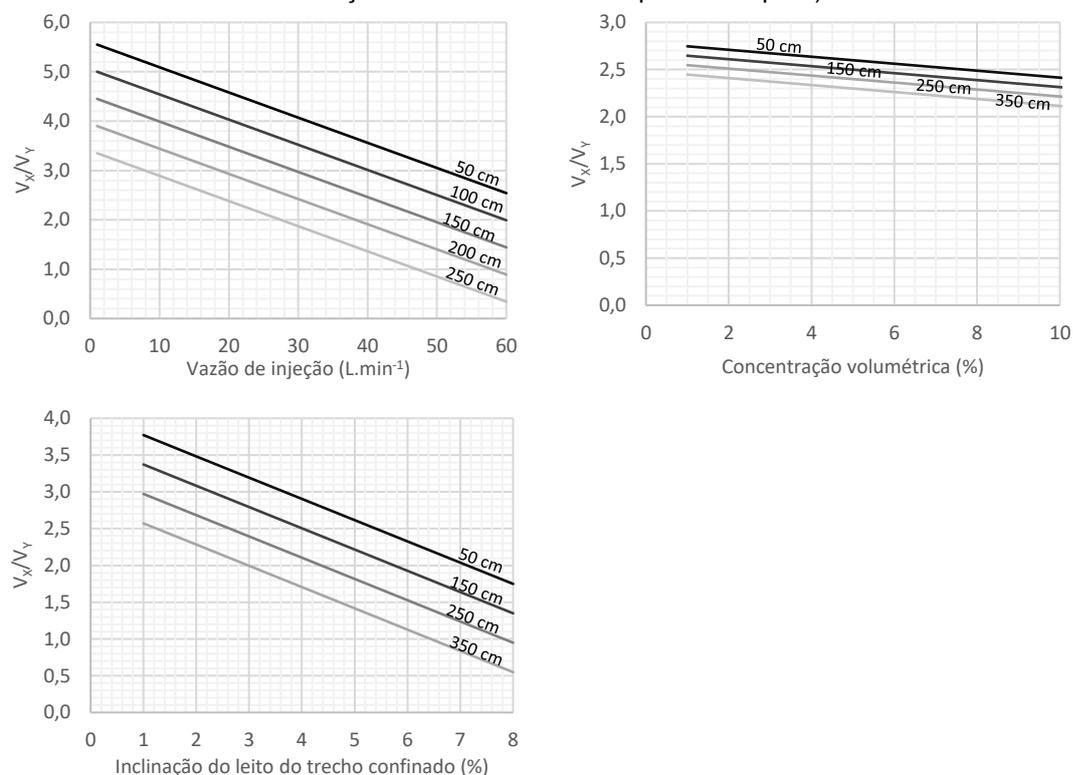
Tabela 12 – Precisão da Equação 8

$I_{\text{trecho confinado}}$ (%)	D (cm)	V_x/V_Y (Equação 8)	V_x/V_Y (Figura 42)	Precisão
2	50	3,48	3,33	96%
2	150	3,08	3,28	94%
2	250	2,68	2,54	95%
3	50	3,19	3,03	95%
3	150	2,79	2,88	97%
3	250	2,39	2,43	99%
4	50	2,91	2,63	91%
4	150	2,51	2,57	97%
4	250	2,11	1,45	69%
5	50	2,62	2,46	94%
5	150	2,22	2,38	93%
5	250	1,82	1,98	92%

Fonte: Autor (2023)

Aplicando os dados das equações 6, 7 e 8, chegou-se às relações apresentadas na Figura 46. Nesta é possível observar que, entre os parâmetros variados nesta pesquisa (vazão nas etapas 2 e 3, concentração na Etapa 4 e, inclinação do leito do trecho confinado na Etapa 5), a concentração é a que menos interfere na relação entre as velocidades de avanço e de expansão.

Figura 46 – Relações das velocidades de avanço e de expansão (V_x/V_y) com os parâmetros que variaram ao longo das etapas 3, 4 e 5 (vazão para a Etapa 3, concentração para a Etapa 4 e, inclinação do trecho confinado para a Etapa 5)



Fonte: Autor (2023)

8.6 CONCENTRAÇÃO DA CORRENTE DE TURBIDEZ

A medição da concentração da corrente de turbidez no trecho confinado ocorreu no final desta região, cerca de 150 cm do difusor. Já concentração da corrente de turbidez na região desconfinada foi mensurada ao longo do eixo central longitudinal e em dois eixos laterais longitudinais, distantes simetricamente (ver Figura 26). As medições, ocorreram nas distâncias 25, 100, 200 e 300 cm em relação ao início do desconfinamento. A medição da concentração foi realizada a partir da Etapa 3. Na Figura 47 são apresentados os perfis de concentração medidos ao longo da altura da corrente de turbidez e o perfil que relaciona a concentração volumétrica medida pela concentração volumétrica injetada.

A concentração da corrente de turbidez, na região confinada, apresentou, de maneira geral, valores mais próximos da concentração da mistura preparada para injeção, junto ao fundo do tanque (Figura 47). Nas etapas 3 e 5 a concentração

volumétrica da mistura injetada foi de 5% e, na Etapa 4 foi de 1%, 5%, 10% e 15% para os ensaios EB 1, EB 5, EB 10 e EB 15, respectivamente.

Na Etapa 3, na região confinada, com o aumento da vazão, houve maiores valores de concentração em todas as alturas do ponto analisado, indicando redução da sedimentação de partículas nos primeiros 150 cm da injeção, para um mesmo intervalo de tempo. Entre o leito e a altura de 1 cm, a corrente de turbidez apresentou concentrações mais elevadas, com valores de até 46%, 75% e 80% da concentração da mistura injetada, para os ensaios EA 15, EA 30 e EA 45, respectivamente. Após a altura de 1 cm, a concentração da mistura foi reduzindo até atingir a concentração na altura de 10 cm de 1%, 1% e 6% da concentração injetada, para o EA 15, EA 30 e EA 45, respectivamente.

Na Etapa 4, na região confinada, com o aumento da concentração volumétrica da mistura injetada, foi possível notar que houve maiores valores deste parâmetro também no primeiro centímetro, próximo ao fundo. Nesta altura, a concentração medida da corrente de turbidez foi de até 31%, 80%, 69% e 99% em relação a concentração da mistura injetada, para os ensaios EB 1, EB 5, EB 10 e EB 15, respectivamente. Vale ressaltar que no EB 5 foi utilizado sedimento com maior porcentagem de finos, o que contribui para o carreamento das partículas em suspensão para regiões mais distais e, manutenção da concentração. O ensaio EB 1 apresentou a menor variação da concentração ao longo da vertical (variação de 11% em 10 cm), reflexo da baixa concentração da mistura ($C_v = 1\%$), o que contribui para a turbulência manter a concentração mais homogênea (em termos percentuais). Visto que no EB 10, na região confinada, na região inferior da corrente de turbidez, a relação da concentração volumétrica da mistura medida e volumétrica injetada destoou da tendência observada nos demais ensaios da etapa (Figura 47), que o aumento da concentração eleva a relação em questão, acredita-se que houve uma imprecisão na medição da concentração volumétrica medida no EB 10 nas alturas inferiores a 2,5 cm.

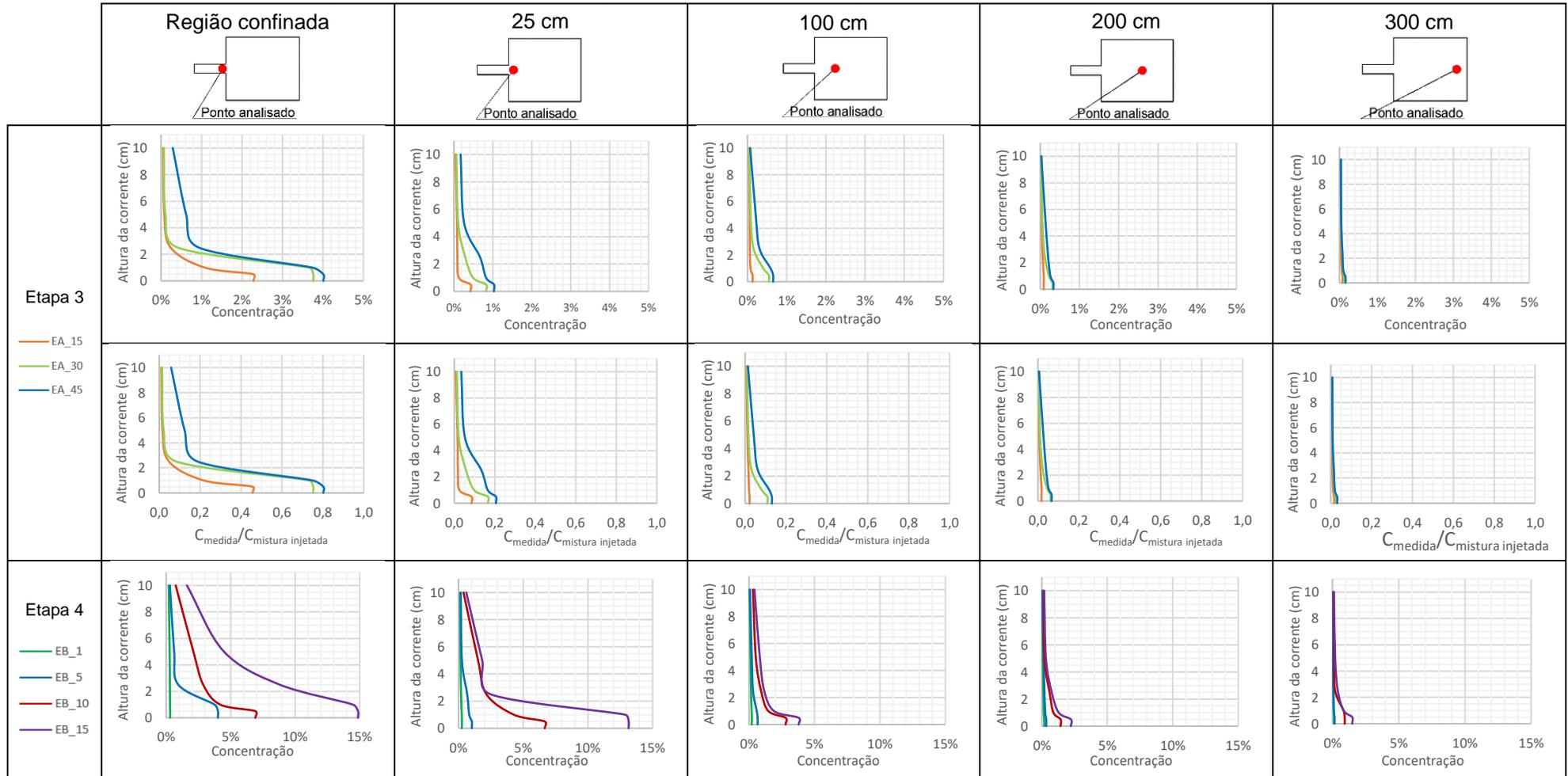
A mudança da declividade do fundo do trecho confinado (Etapa 5) ocasionou na região confinada, correntes de turbidez com maiores valores de concentração, principalmente próximos à altura de 1 cm. Nesta altura a concentração volumétrica da corrente de turbidez foi de aproximadamente 69%, 74%, 80% e 95% da concentração

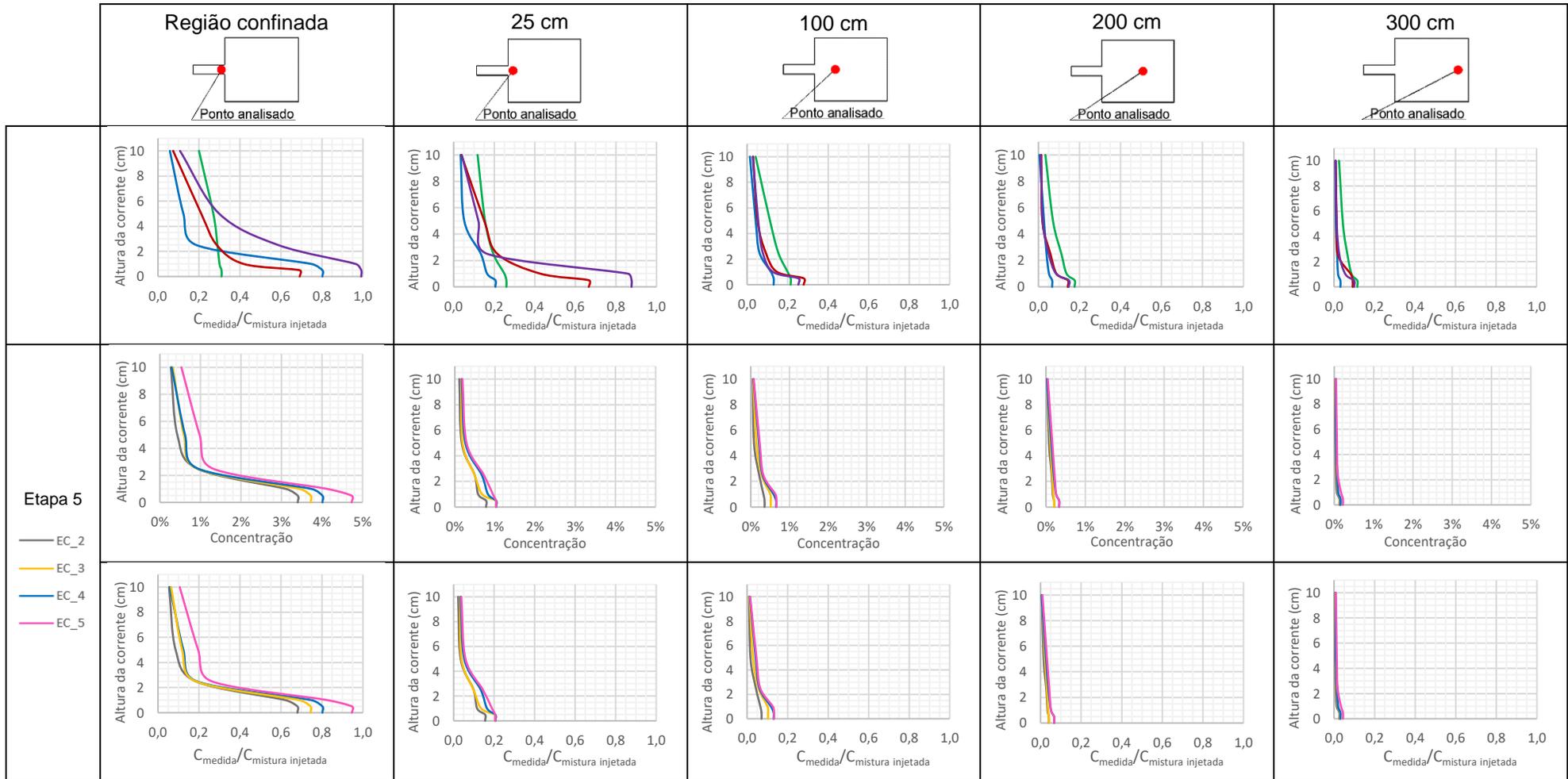
da mistura injetada, o que é um indicativo que o aumento da inclinação do leito contribuiu para a menor sedimentação das partículas no trecho inicial e, conseqüentemente, maior carreamento das partículas para as regiões distais.

Com o aumento da vazão, Etapa 3, para um mesmo ponto analisado, a concentração na região desconfinada ao longo da vertical no eixo central longitudinal também aumentou (Figura 47). À medida que a corrente avançou para jusante, houve queda da concentração devido à sedimentação das partículas. A redução mais intensa da concentração ocorreu nos primeiros 100 cm, local onde estão localizados os maiores lobos turbidíticos. Quando analisada a relação concentração medida com a concentração injetada, obtém-se que, na altura 0,5 cm, essa relação apresentou os maiores valores, sendo o local onde as concentrações foram máximas. Nesta altura, ao longo do eixo longitudinal central, quando analisada a região confinada e os primeiros 25 cm do desconfinamento, a relação concentração medida e injetada para o ensaio EA 15 passou de 46% para 9% (redução de 37%). No EA 30, essa relação passou de 75% para 17%, o que totaliza redução de 58%. Já no EA 45, essa relação foi de 80% para 21%, ou seja 59% de queda. Com estes dados nota-se que, nos ensaios com maiores vazões, o desconfinamento causou as maiores reduções percentuais da concentração. No trecho desconfinado, entre as abscissas 25 e 100 cm, a redução da concentração máxima foi constante para todos os ensaios da etapa, com valor de 8%.

No trecho desconfinado, o aumento da concentração da mistura injetada (Etapa 4) ocasionou a elevação deste parâmetro principalmente nos 2 cm mais próximos à placa. Ao passo que a corrente de turbidez se deslocava para a jusante, as concentrações em todos os pontos ao longo da vertical reduziram devido a sedimentação das partículas. Assim como na etapa anterior, a redução da concentração média foi mais intensa nos primeiros 100 cm em relação ao início do desconfinamento. Foi nesta região que se formaram os maiores lobos turbidíticos e a maior parte dos sedimentos foram depositados, assunto este que será abordado em tópicos posteriores desta pesquisa. As maiores concentrações foram medidas na altura de 0,5 cm em relação ao leito.

Figura 47 – Perfil vertical de concentração no eixo longitudinal central: Etapa 3 - variação da vazão com quebra de declividade entre o trecho confinado e desconfinado; Etapa 4 - variação da concentração da mistura injetada; Etapa 5 - variação da inclinação do fundo do trecho confinado





Fonte: Autor (2023)

Quando analisada a relação concentração máxima medida e concentração da mistura injetada, obtém-se que no EB 1, no desconfinamento, a redução da relação, em valores percentuais, corresponde a 5%, o que é um valor baixo quando comparado com os demais ensaios desta pesquisa. Essa mesma porcentagem de decaimento da concentração máxima ocorreu quando analisadas as abscissas 100, 200 e 300 cm. O EB 1 foi o que apresentou a menor variação da concentração máxima e mínima ao longo da vertical, com redução máxima de 18% em 10 cm. Esta baixa variação da concentração tanto ao longo da altura da corrente, quanto ao longo do eixo longitudinal central, ocorre devido ao EB 1 apresentar a menor concentração ($C_v = 1\%$), o que contribui para a turbulência manter a concentração mais homogênea (em termos percentuais). Conforme descrito, no EB 5 (também chamado de EA 45), a variação da relação das concentrações máxima medida e injetada apresentou maior valor no desconfinamento, com redução de 59%.

Nos ensaios com maiores concentrações, EB 10 e EB 15, no desconfinamento, a variação da relação entre as concentrações máxima medida e injetada não foram tão significativas quando comparadas com os demais ensaios, apresentando redução de 2% e 11%, respectivamente. Contudo, entre a distância de 25 e 100 cm, essa redução foi de 39% e 63%, as maiores para estes ensaios. Com essa informação, entende-se que os sedimentos depositaram principalmente ao longo das abscissas 25 e 100 cm e, com possível erosão/baixa sedimentação entre o desconfinamento e a abscissa 25 cm.

Na Etapa 5, com a mudança da declividade do fundo do trecho confinado, os perfis de concentração da região desconfinada ao longo do eixo central longitudinal apresentaram geometrias similares, porém, conforme aumentou a inclinação do fundo, maiores foram os valores de concentração em todos os pontos ao longo da altura da corrente (Figura 47). Assim como nas etapas anteriores, à medida que a corrente de turbidez se deslocou para a jusante, as concentrações em todos os pontos ao longo da vertical diminuíram. A maior redução da concentração também ocorreu nos primeiros 100 cm em relação ao início do desconfinamento, o que já havia sido notado nos experimentos anteriores.

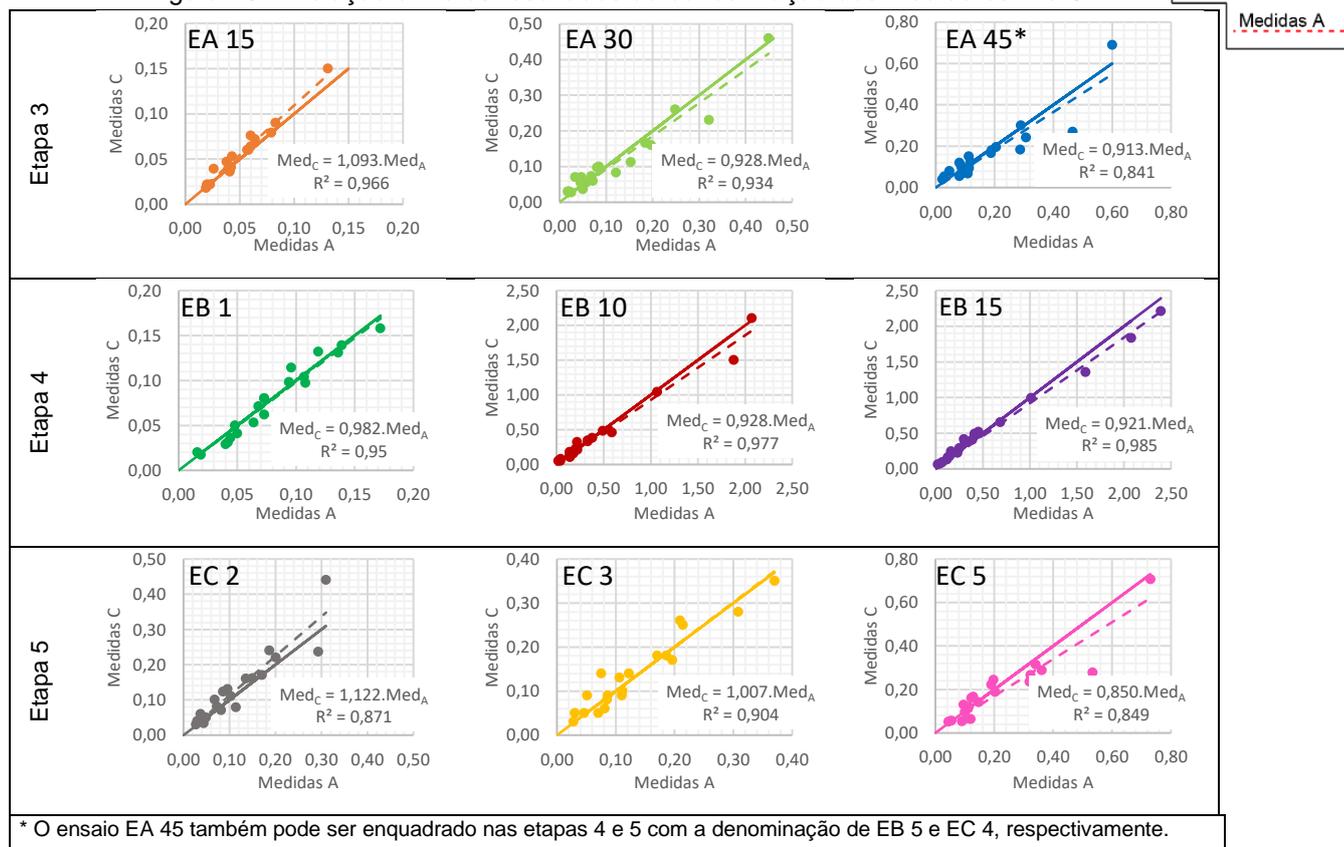
Ao analisar a variação da relação concentração volumétrica máxima medida e concentração volumétrica da mistura injetada, da região confinada até a abscissa 25 cm do trecho desconfinamento, nota-se que essa relação no EC 2 passou de 68%

para 16%, o que corresponde a uma redução de 52%; no EC 3, esses valores foram de 74% para 20%, ou seja 54% de redução; no ensaio EC 4 a variação foi de 59%, com o valor da relação passando de 80% para 21%; no EC 5, a relação passou de 95% para 21%, apresentando a maior redução entre os ensaios da Etapa 5, que foi de 74%. Diante dessas reduções, observa-se que a elevação da inclinação do leito do trecho confinado ocasionou maiores perdas percentuais da concentração volumétrica no desconfinamento. Esse resultado era esperado, uma vez que os ensaios com maiores declividades do leito da região confinada apresentaram maiores velocidades no desconfinamento e, na Etapa 3, já havia sido observado que, com o aumento da vazão (consequentemente aumento da velocidade), a redução da relação concentração volumétrica máxima medida e a concentração volumétrica da mistura injetada haviam sido maiores. Entre a abscissa 25 e 100 cm essa relação foi de $9 \pm 1\%$, o que evidencia a perda de concentração de maior intensidade no local em que ocorreu o desconfinamento.

Nos eixos laterais analisados, distantes 100 cm do eixo longitudinal central, as concentrações medidas, para uma mesma distância em relação ao início do desconfinamento, apresentaram, de maneira geral, resultados semelhantes. Isso é, os valores do medidor A (direita) foram parecidos com os do medidor C (esquerda), conforme Figura 48. Nesta imagem, a linha pontilhada representa a linha de tendência do tipo linear da relação entre os resultados de concentração dos medidores A e C e, a linha contínua corresponde a linha identidade ($X = Y$). Visto que estas duas linhas estão apresentando baixa divergência (coeficiente angular entre 0,85 e 1,122), isto é máximo de 15% de erro (ver Anexo C), considerou-se que a posição em que foi feita a coleta de amostra da corrente de densidade pouco influenciou na determinação da concentração. Diante disso, neste trabalho, para efeitos de simplificação, adotou-se que a concentração do medidor A é igual a concentração do medidor C.

Os perfis verticais de concentração no eixo longitudinal lateral, distante 100 cm do eixo central longitudinal, são apresentados na Figura 49. Nesta imagem, exceto para os ensaios EB 10 e EB 15, a concentração máxima ocorre próximo a abscissa 100 cm e, conforme se distancia deste ponto, a concentração reduz para todos os pontos ao longo da vertical. Nos ensaios EB 10 e EB 15, a concentração máxima da corrente de turbidez ocorreu na abscissa 25 cm.

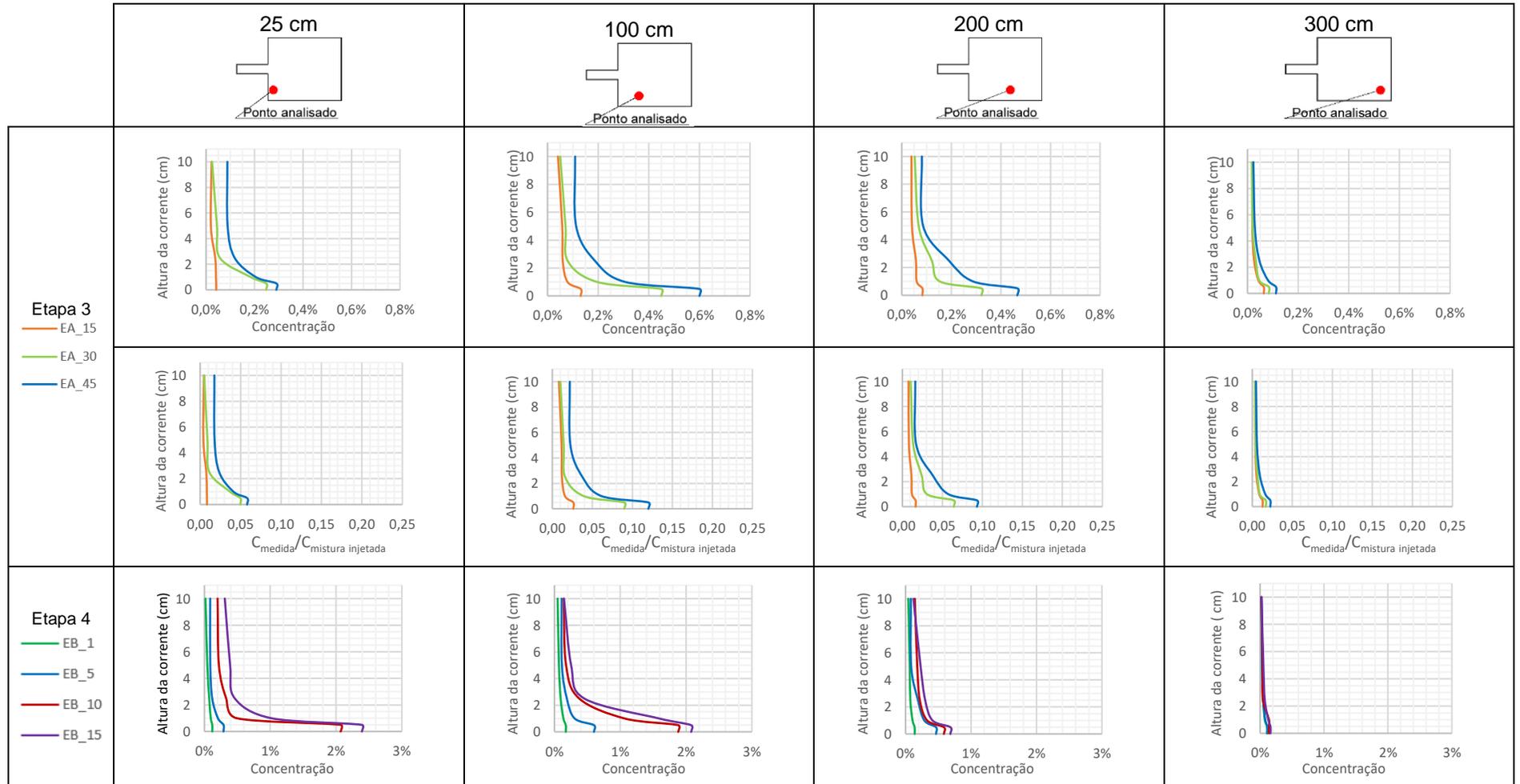
Figura 48 – Relação entre os resultados de concentração dos medidores A e C

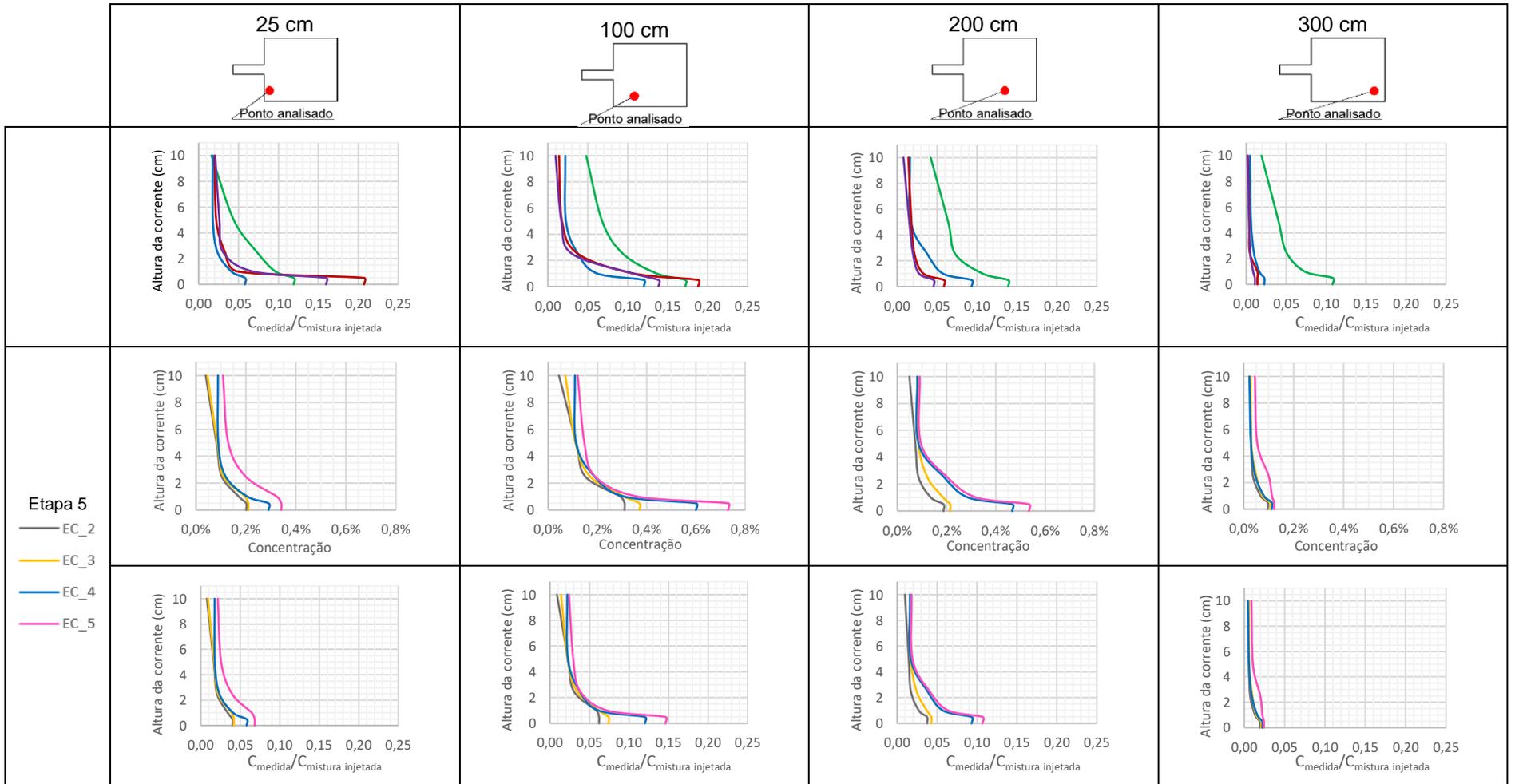


Fonte: Autor (2023)

Na Etapa 3, na qual houve mudança da vazão de injeção, diferentemente do que ocorreu no eixo central longitudinal, na qual houve considerável variação da relação entre a concentração volumétrica máxima medida e, a concentração volumétrica da mistura injetada, no eixo lateral essa variação foi baixa, com valores inferiores a 2%, 4% e 6% para os ensaios EA 15, EA 30 e EA 45, respectivamente, essas taxas ocorreram entre as abscissas 25 e 100 cm (Figura 49). Nesta fase, nas regiões mais distais (após a abscissa 200 cm), no eixo longitudinal lateral, a relação entre a concentração volumétrica máxima medida e a concentração volumétrica da mistura injetada apresentou valores inferiores a 2%. Essa baixa relação ocorreu, pois, a maior parte do material em suspensão já havia sido depositada nas regiões mais próximas ao desconfinamento, o que será abordado em tópicos futuros de espessura dos depósitos e registro fotográfico do depósito formado.

Figura 49 – Perfil vertical de concentração, no eixo longitudinal lateral, distante 100 cm do eixo longitudinal central: Etapa 3 - variação da vazão com quebra de declividade entre o trecho confinado e desconfinado; Etapa 4 - variação da concentração da mistura injetada; Etapa 5 - variação da inclinação do fundo do trecho confinado





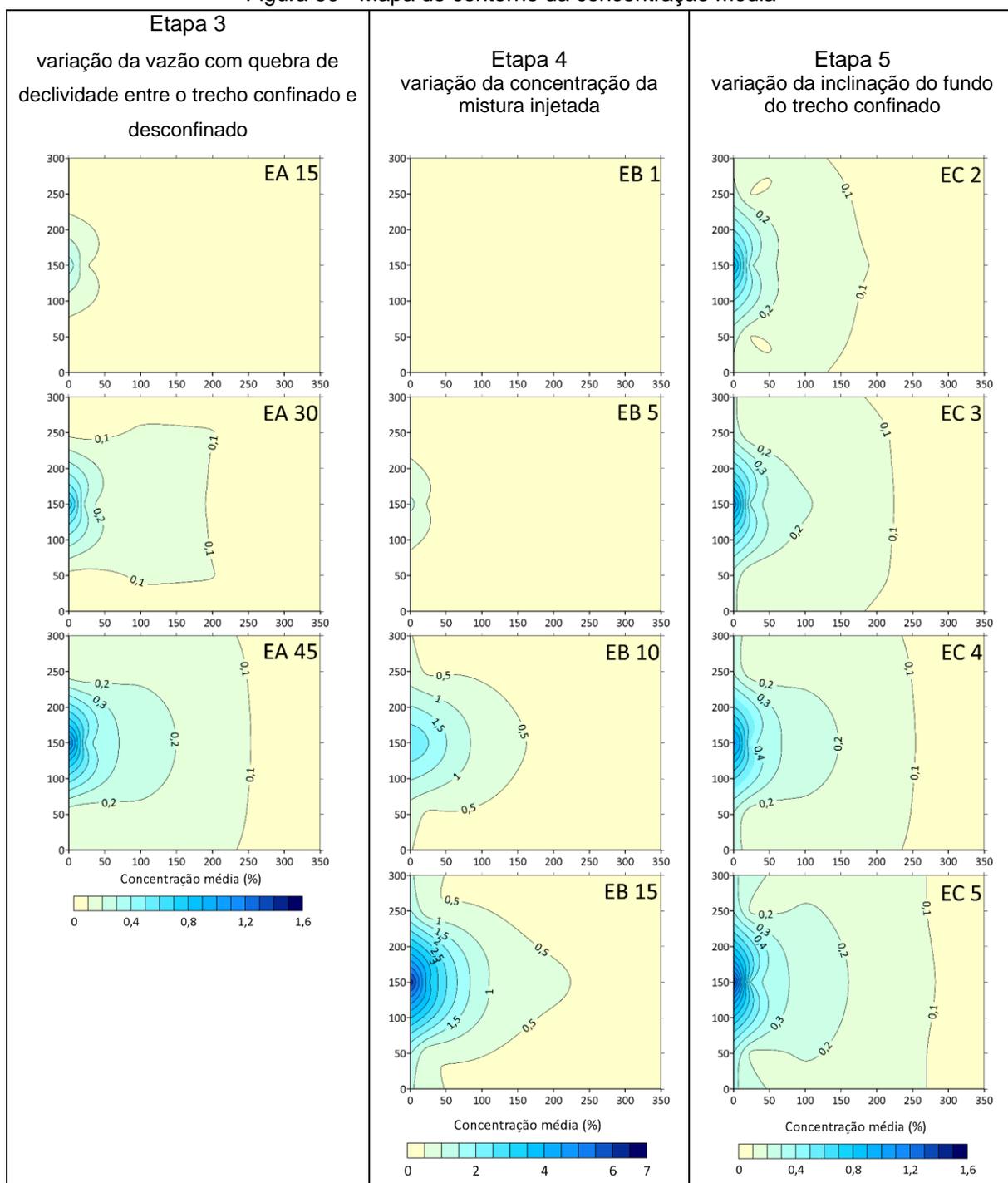
Fonte: Autor (2023)

A variação da concentração da mistura injetada (Etapa 4) aumentou a concentração da corrente de turbidez nas regiões laterais, elevando a relação da concentração volumétrica máxima medida e concentração volumétrica injetada (Figura 49). No eixo lateral analisado, essa relação apresentou a maior redução entre as abscissas 25 e 100 cm. No EB 1, na abscissa 25 cm, essa taxa foi de 12% e, na abscissa 100 cm foi 17%, variação de 5%. Já no EB 5, para essas mesmas distâncias, a relação foi de 6% e 12%, respectivamente, ou seja, 6% de variação. O EB 10 e EB 15, diferentemente de todos os demais ensaios desta pesquisa, apresentaram valores desta taxa maiores para a abscissa 25 cm e, conforme a corrente se deslocou para a jusante, essa relação diminuiu. No EB 10 e EB 15, na distância de 25 cm, a relação foi de 16% e 21%, respectivamente. Na distância 100 cm, essa taxa foi para 14% e 19%, o que corresponde a uma redução de 2% para ambos os ensaios. Nesta etapa, observou-se que o EB 1, por apresentar a menor concentração volumétrica da mistura injetada (1%), e, apresentar a mesma vazão de injeção dos demais ensaios da etapa ($45 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$), foi o ensaio na qual a corrente de turbidez transportou a maior quantidade de sedimentos para as regiões distais, em termos proporcionais à concentração da mistura injetada.

Na Etapa 5, a variação da inclinação do leito do trecho confinado gerou, no eixo lateral longitudinal, para as declividades de 2° e 3° , variações de concentração semelhantes, com relação entre a concentração volumétrica máxima medida e a concentração volumétrica da mistura injetada variando 2% a cada 100 cm. Nestes ensaios, essa relação foi máxima para a abscissa 100 cm, apresentando valores de 6% e 7% para o EC 2 e EC 3, respectivamente. No EC 4 e EC 5, a relação entre a concentração volumétrica máxima medida e a concentração volumétrica da mistura injetada apresentou valores máximos de 12% e 15%, respectivamente, com redução de 6% e 8% na abscissa 25 cm. Quando analisado o trecho entre 100 e 200 cm, essa redução diminuiu para 3% e 4%, respectivamente.

De posse das concentrações ao longo do eixo central e lateral, calculou-se a concentração média por meio da área do perfil de concentração e elaborou-se o mapa de contorno da concentração média, o qual é apresentado na Figura 50. Nesta imagem é possível notar a geometria em que ocorreu a redução da concentração média ao longo do tanque de ensaio. Os locais em que ocorreram as maiores concentrações são coincidentes com as regiões de maiores espessuras de depósito formado, assunto que será apresentado nos tópicos futuros deste trabalho.

Figura 50 - Mapa de contorno da concentração média



Fonte: Autor (2023)

Nos mapas de contorno da concentração média (Figura 50), nos ensaios da Etapa 3, nota-se que, à medida que se aumentou a vazão, variou-se a concentração média principalmente nos trechos próximos ao início do desconfinamento, o que sugere que o aumento de vazão tem impacto na concentração dos trechos mais proximais do desconfinamento dos cânions submarinos. A variação da concentração

da mistura injetada (Etapa 4), assim como a variação da vazão na Etapa 3, teve maior influência na concentração média nos trechos próximos ao início do desconfinamento. Devido à escala empregada nos mapas de contorno de concentração média ser a mesma em todos os ensaios dentro de uma mesma etapa, na Figura 50 não é possível avaliar a variação da concentração média no ensaio EB 1. Nos ensaios da Etapa 5, conforme aumentou-se a inclinação, a corrente de turbidez apresentou maior concentração média para uma mesma abscissa.

8.6.1 Concentração da corrente de turbidez ao longo da vertical

Neste item os mapas de contorno foram fracionados de modo a permitir a visualização da concentração nas alturas de 0,5; 1,0; 2,5; 5,0 e 10 cm em relação ao fundo. Uma vez que o objetivo desse tópico consiste em apresentar a variação da concentração ao longo da vertical, foram adotadas escalas individuais para cada ensaio, com o limite superior igual ao valor máximo da concentração no experimento em questão. Em todos os ensaios realizados a concentração máxima ocorreu no final do trecho confinado (início do trecho desconfinado), na altura de 0,5 cm em relação ao fundo do tanque.

No ensaio EA 15, independentemente da altura analisada, a concentração da corrente foi inferior a 0,1% a partir da abscissa 150 cm, ou seja, a maior parte dos sedimentos foram depositados no trecho confinado e/ ou na região mais proximal do início do desconfinamento, conforme Figura 51. Além disso, nota-se que, após a altura de 2,5 cm, a variação da concentração volumétrica foi baixa, com valores próximos à zero. Nas alturas mais inferiores da corrente de turbidez (≤ 1 cm), a redução da concentração foi mais acentuada no eixo longitudinal central, quando comparada com as regiões laterais.

Ao avaliar diferentes alturas da corrente de turbidez do ensaio EA 30, é possível notar, assim como ocorrido no EA 15, que a concentração volumétrica, após a altura de 2,5 cm, apresentou valores próximos à zero, com pequena variação ao longo da vertical, conforme Figura 52. Neste experimento é possível notar que a concentração se tornou mais homogênea ao longo da vertical após a abscissa 250 cm, em relação ao início do desconfinamento.

Figura 51 - Mapa de contorno da concentração em diferentes alturas – EA 15

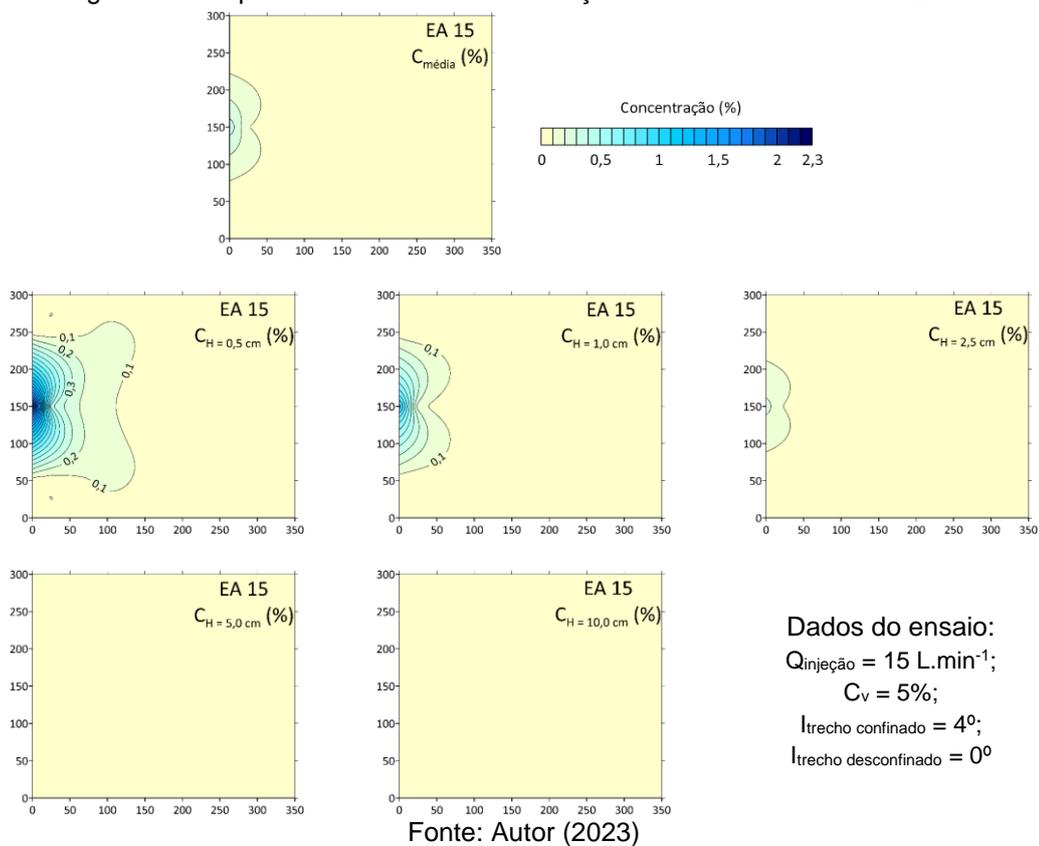
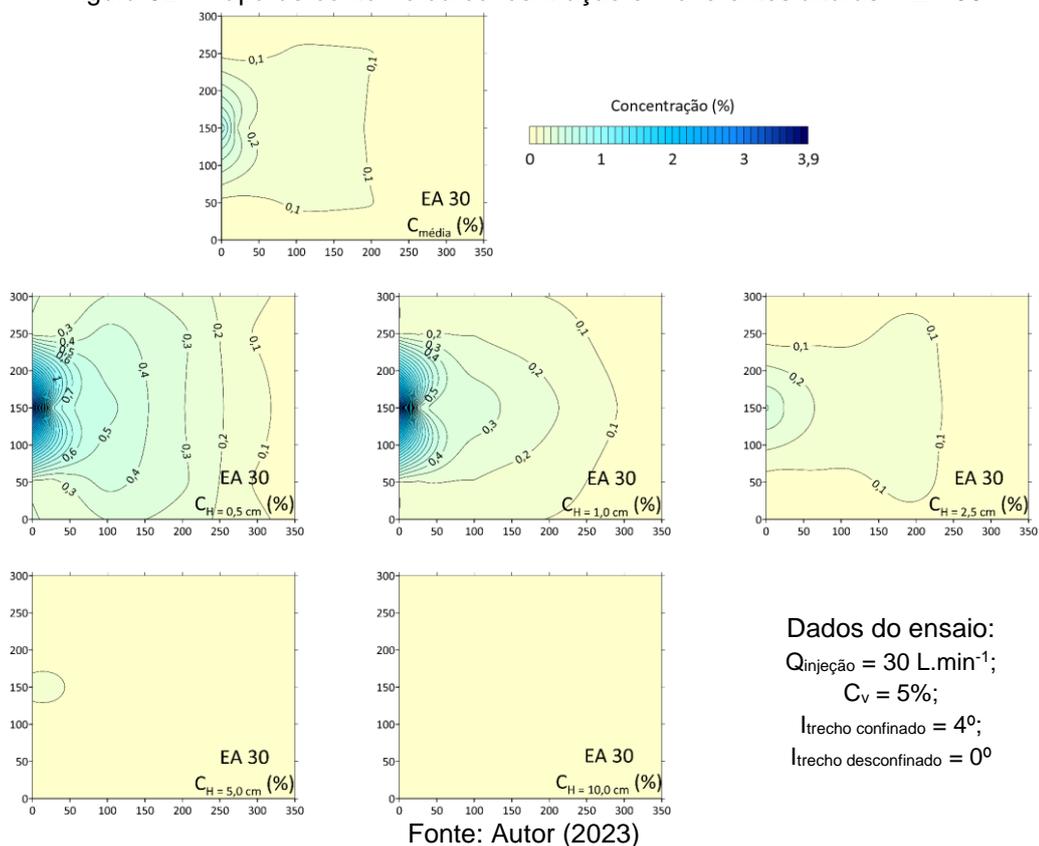
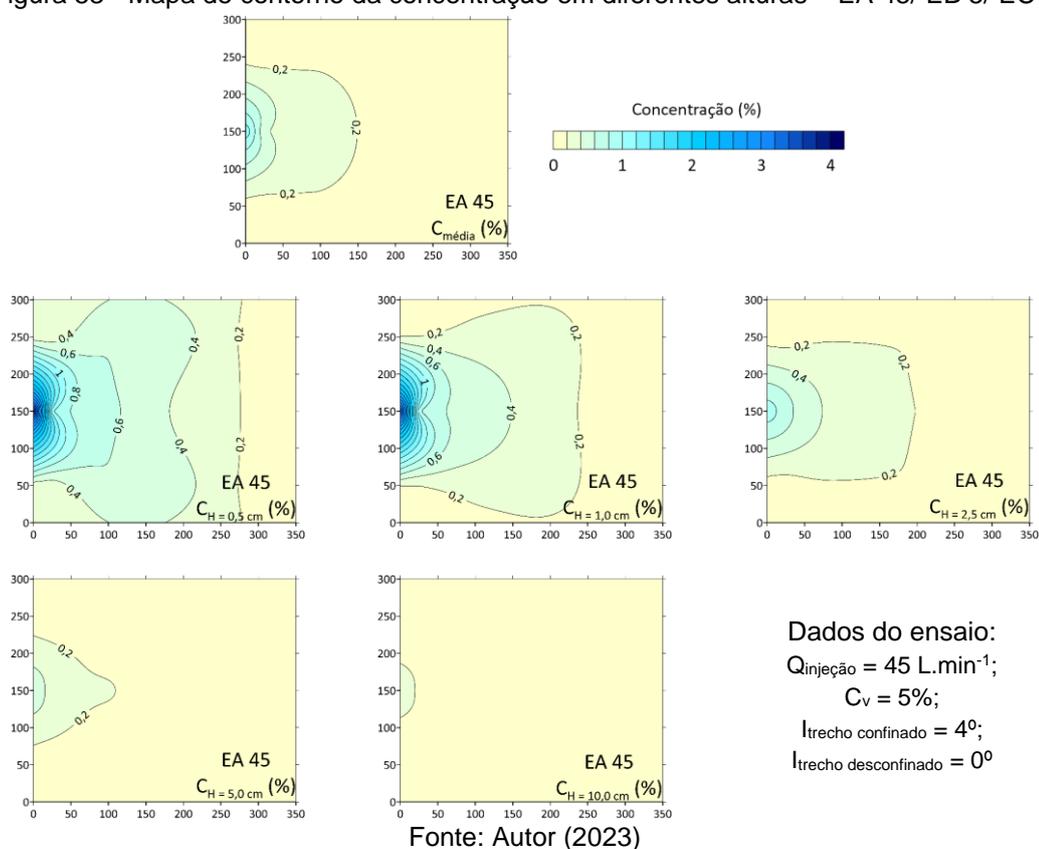


Figura 52 - Mapa de contorno da concentração em diferentes alturas – EA 30



No ensaio EA 45 (EB 5/ EC 4) os valores da concentração nas alturas 0,5 e 1,0 cm foram próximas, com diferença máxima de 0,27%. Após a altura de 5 cm, a concentração ao longo da vertical se tornou praticamente homogênea, conforme Figura 53. A concentração máxima deste ensaio se assemelhou com a concentração máxima do experimento EA 30 e, ambas, ocorreram na altura de 0,5 cm em relação ao fundo do canal. A corrente de turbidez apresentou concentrações praticamente homogêneas ao longo da vertical, após a abscissa 300 cm.

Figura 53 - Mapa de contorno da concentração em diferentes alturas – EA 45/ EB 5/ EC 4

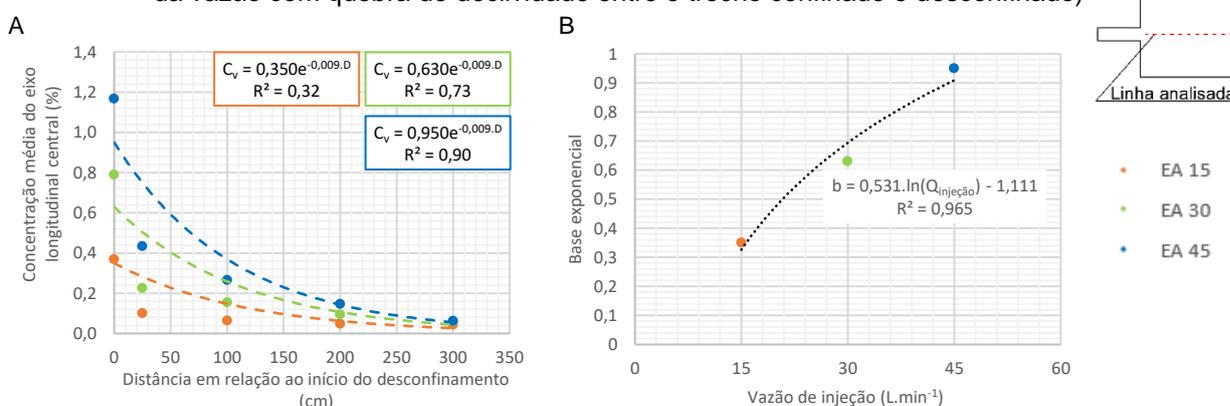


Visando comparar os dados de concentração média ao longo do eixo longitudinal central entre os ensaios da Etapa 3, elaborou-se a Figura 54 (A). Nesta imagem os valores médios da concentração volumétrica dos ensaios EA 30 e EA 45 foram cerca de 2 e 3 vezes, respectivamente, superiores aos dados do EA 15. Na região mais a montante, essa relação aumentou. Uma equação geral foi proposta relacionando a concentração média da corrente de turbidez, em função da vazão, adicionando-se linhas de tendência com expoentes iguais (obtidos por meio do ajuste da intersecção da equação com o eixo Y) e, obteve-se coeficiente de determinação (R^2) acima de 0,7 para os ensaios EA 30 e EA 45, o que foi considerado satisfatório.

No EA 15, este coeficiente apresentou valor de 0,30, uma vez que houve elevada diminuição da concentração no desconfinamento, impedindo a obtenção de melhor ajuste para o expoente que se adequou melhor aos demais ensaios da etapa.

Dado que, após os ajustes, o expoente para os três ensaios da Etapa 3 é o mesmo (Figura 54 – A), a base para a equação geral da concentração média foi obtida através da linha de tendência que relacionou a vazão de injeção com a base exponencial das equações das linhas de tendência para cada ensaio realizado, conforme Figura 54 (B).

Figura 54 – Variação da concentração média ao longo do eixo longitudinal central – Etapa 3 (variação da vazão com quebra de declividade entre o trecho confinado e desconfinado)



Fonte: Autor (2023)

Diante dos ajustes e dados da Figura 54, obteve-se a equação 9, que relaciona a concentração média da corrente de turbidez no eixo longitudinal central com a vazão de injeção e a distância.

$$C_{\text{média}} = [0,531 \cdot \ln(Q_{\text{injeção}}) - 1,111] \cdot e^{-0,009 \cdot D} \quad (\text{Equação 9})$$

Onde:

$C_{\text{média}}$ é concentração volumétrica média da corrente de turbidez (%);

$Q_{\text{injeção}}$ é vazão de injeção da corrente de turbidez ($\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$);

D é a distância em relação ao início do desconfinamento (cm).

Na Tabela 13 é apresentada a precisão da Equação 9, a qual foi superior a 70% em 53% dos dados, o que não foi considerado satisfatório. Estes dados apontam que a equação proposta apresenta as piores precisões nas abscissas 25 e 100 cm, trecho em que ocorre a maior redução da concentração, devido ao desconfinamento.

Contudo, a Equação 9 pode ser empregada para estimar a concentração da corrente em situações nas quais a precisão acima de 50% é considerada satisfatória.

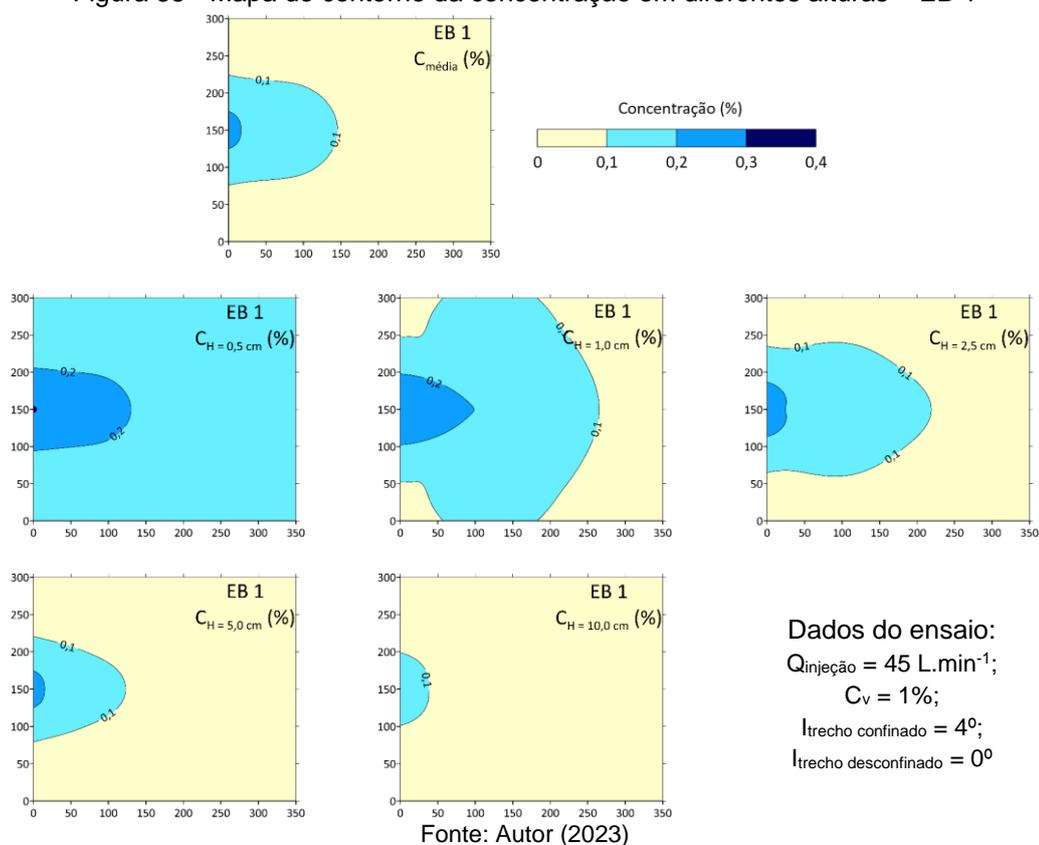
Tabela 13 – Precisão da Equação 9 (as células em verde são as que apresentaram resultado satisfatório e, as em vermelho, não satisfatório)

$Q_{\text{injeção}}$ (L.min ⁻¹)	D (cm)	$C_{\text{média}}$ (Equação 9)	$C_{\text{média}}$ (medido)	Precisão
15	0	0,33	0,37	88%
15	25	0,26	0,10	39%
15	100	0,13	0,06	49%
15	200	0,05	0,05	92%
15	300	0,02	0,04	50%
30	0	0,70	0,79	88%
30	25	0,55	0,23	41%
30	100	0,28	0,16	57%
30	200	0,08	0,09	99%
30	300	0,03	0,06	54%
45	0	0,91	1,17	78%
45	25	0,73	0,44	61%
45	100	0,37	0,27	73%
45	200	0,15	0,15	100%
45	300	0,06	0,06	99%

Fonte: Autor (2023)

No ensaio EB 1, as concentrações em todas as alturas da corrente de turbidez apresentaram valores inferiores a 0,4%, conforme Figura 55. As maiores concentrações volumétricas foram medidas no trecho mais próximo ao desconfinamento, entre as abscissas 0 e 100 cm, local em que foram formados os depósitos com maiores espessuras. Nas regiões mais distais (abscissa > 200 cm), a concentração volumétrica apresentou valores próximos à zero, independentemente da altura analisada.

Figura 55 - Mapa de contorno da concentração em diferentes alturas – EB 1



As concentrações ao longo da vertical da corrente de turbidez no ensaio EB 10 apresentaram grandes variações, principalmente nos primeiros 100 cm em relação ao início do desconfinamento, conforme Figura 56. No início do desconfinamento, a diferença de concentração volumétrica ao longo da altura da corrente de turbidez chegou a ser 6,17%. Conforme a corrente se desloca no eixo central longitudinal, as diferenças de concentrações ao longo da altura diminuem, de modo que na abscissa 300 cm, esse valor é de 0,84%.

No EB 15, os maiores valores de concentrações volumétricas ocorreram entre as alturas de 0 e 2,5 cm, principalmente no trecho mais próximo do início do desconfinamento, entre as abscissas 0 e 150 cm (Figura 57). No desconfinamento a diferença de concentração ao longo da altura foi de 13,26% e, conforme se deslocou para jusante, este valor diminuiu, chegando a 1,38% na abscissa 300 cm.

Figura 56 - Mapa de contorno da concentração em diferentes alturas – EB 10

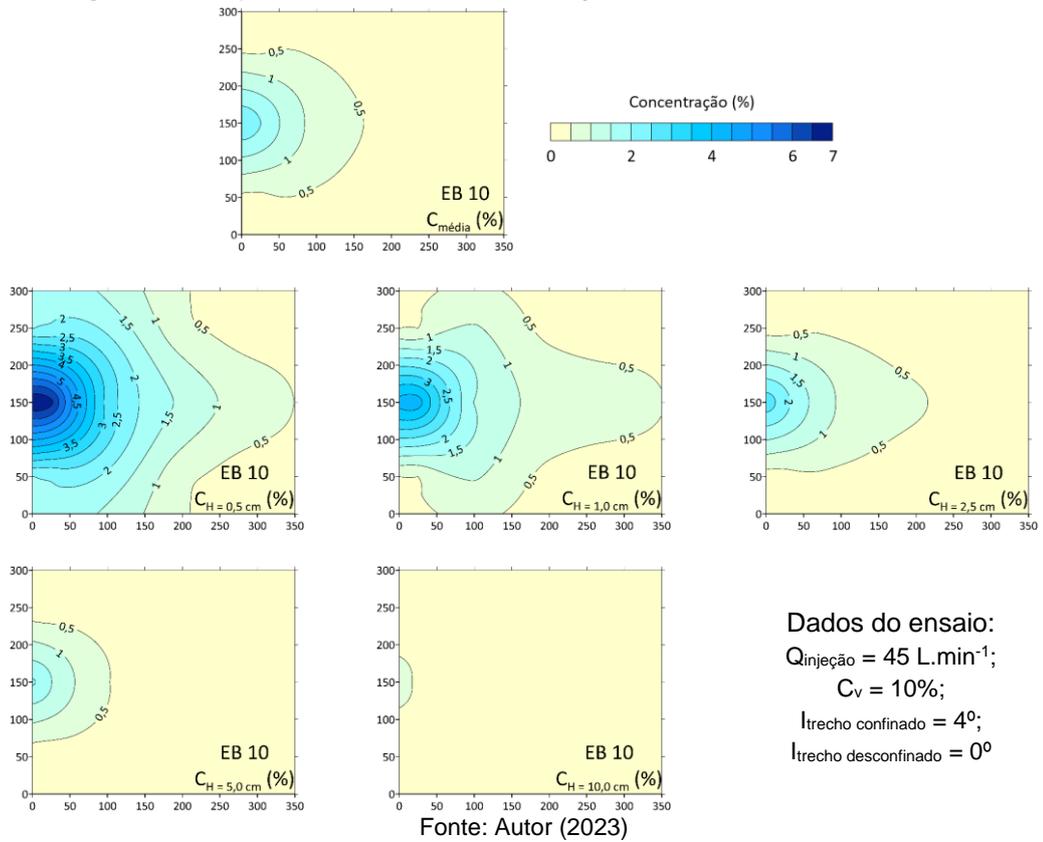
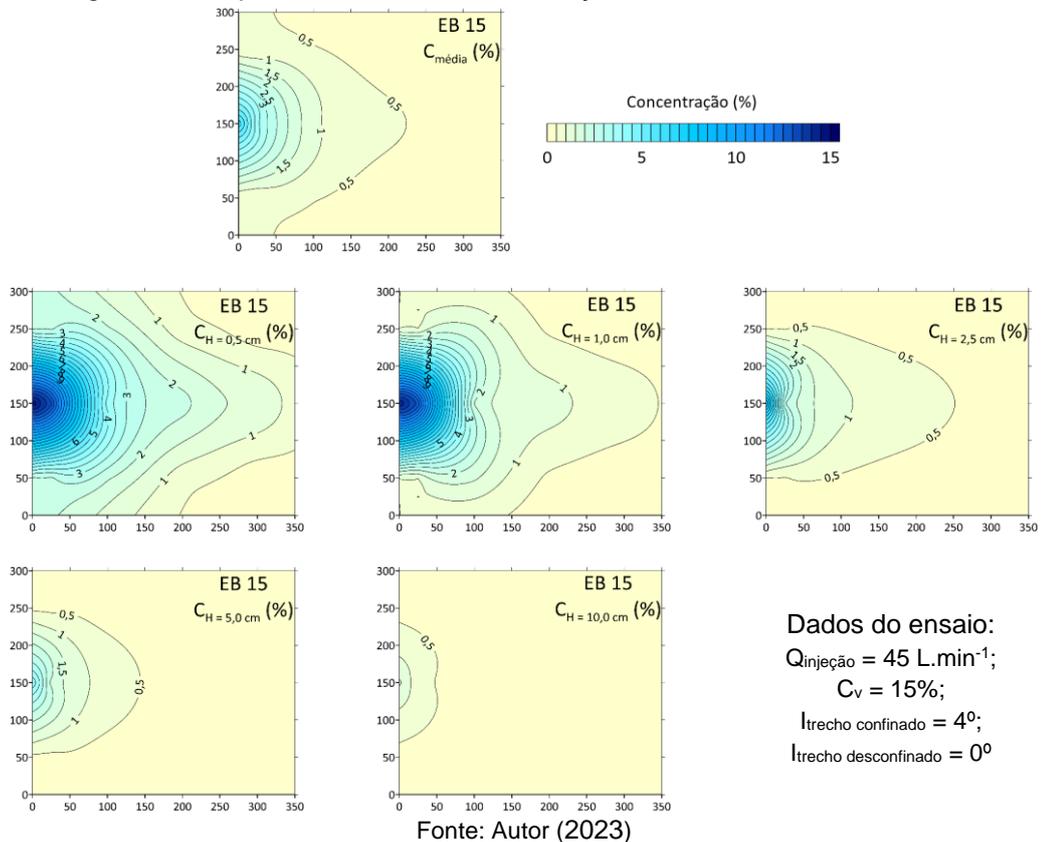


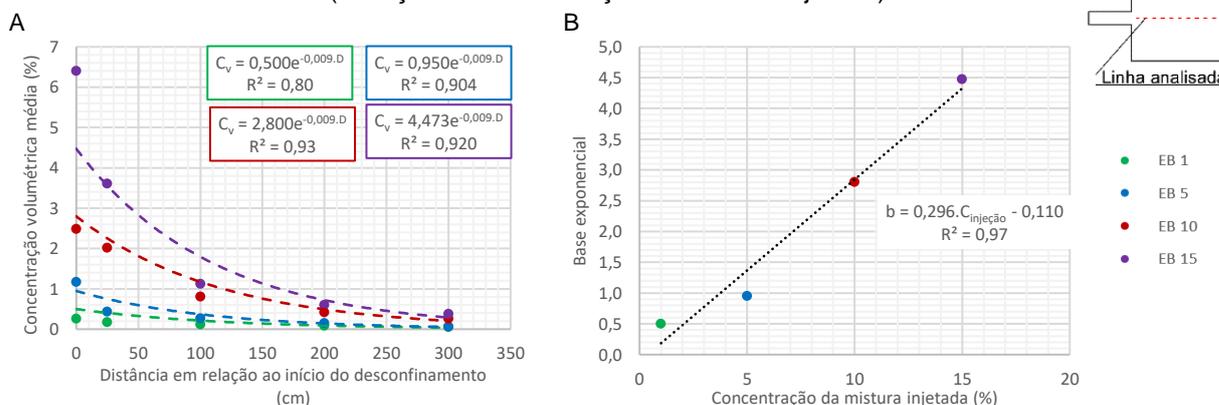
Figura 57 - Mapa de contorno da concentração em diferentes alturas – EB 15



Comparando os valores de concentração volumétrica média no eixo longitudinal central, e utilizando o EB 1 como referência, o EB 5, EB 10 e EB 15 apresentaram, em média, concentrações superiores em cerca de 2, 7 e 10 vezes, respectivamente. Com esses dados, é possível afirmar que o decaimento da concentração não ocorre de maneira linear com o aumento da concentração da mistura de injeção. Na Figura 58 (A) é apresentada a curva de tendência do tipo exponencial da redução da concentração volumétrica média ao longo do desconfinamento, nos ensaios da Etapa 4. Essas curvas foram ajustadas da mesma maneira que foi feito para os ensaios da Etapa 3, através da definição da intersecção da linha de tendência com o eixo Y. Na Etapa 4, as curvas de tendência apresentaram coeficientes de determinação superiores a 0,8, tornando a equação com elevada representatividade.

Visando gerar uma equação que relacione a concentração volumétrica média da corrente em função da concentração de injeção e da distância, plotou-se as bases exponenciais em função da concentração de injeção e obteve-se a relação apresentada na Figura 58 (B).

Figura 58 – Variação da concentração média ao longo do eixo longitudinal central – Etapa 4 (variação da concentração da mistura injetada)



Fonte: Autor (2023)

Empregando-se a relação da base exponencial obtida na Figura 58 (B) e adotando expoente ajustado na Figura 58 (A), obteve-se a Equação 10, que relaciona a concentração volumétrica média da corrente de turbidez no eixo longitudinal central com a concentração da mistura injetada e a distância.

$$C_{\text{média}} = (0,296 \cdot C_{\text{injeção}} - 0,11) \cdot e^{-0,009 \cdot D} \quad (\text{Equação 10})$$

Onde:

$C_{m\acute{e}dia}$ é a concentração volumétrica média da corrente de turbidez (%);

$C_{injetada}$ é a concentração da mistura injetada (%);

D é a distância em relação ao início do desconfinamento (cm).

A precisão da Equação 10 é apresentada na Tabela 14, que foi superior a 70% em 55% dos dados. A equação geral proposta apresentou baixa exatidão (inferior a 70%), principalmente para o EB 5. Para ensaios com maiores concentrações de injeção (EB 10 e EB 15), o acerto médio da equação foi de 80%, o que foi considerado como uma precisão com significativa representatividade.

Tabela 14 – Precisão da Equação 10 (as células em verde são as que apresentaram resultado satisfatório e, as em vermelho, não satisfatório)

$C_{inje\c{c}ao}$ (%)	D (cm)	$C_{m\acute{e}dia}$ (Equação 10)	$C_{m\acute{e}dia}$ (medido)	Precisão
1	0	0,19	0,26	71%
1	25	0,15	0,17	87%
1	100	0,08	0,12	63%
1	200	0,03	0,08	36%
1	300	0,01	0,05	23%
5	0	1,37	1,17	85%
5	25	1,09	0,44	40%
5	100	0,56	0,27	48%
5	200	0,23	0,15	65%
5	300	0,09	0,06	69%
10	0	2,85	2,49	87%
10	25	2,28	2,02	89%
10	100	1,16	0,81	70%
10	200	0,47	0,42	89%
10	300	0,19	0,26	73%
15	0	4,33	6,41	68%
15	25	3,46	3,61	96%
15	100	1,76	1,12	64%
15	200	0,72	0,60	85%
15	300	0,29	0,38	77%

Fonte: Autor (2023)

Nos ensaios da Etapa 5, os quais se diferenciaram em relação à declividade do fundo do tanque no trecho confinado, o valor máximo da diferença de concentração

volumétrica média entre os ensaios, foi de 0,55%, ou seja, as concentrações médias longitudinais, ao longo do eixo central, apresentaram valores próximos entre os ensaios. Em todos os ensaios dessa etapa, a maior redução da concentração ocorreu nos primeiros 100 cm em relação ao início do desconfinamento.

Os mapas de contorno da concentração ao longo da vertical dos ensaios EC 2, EC 3 e EC 5, são apresentados na Figura 59, Figura 60 e Figura 61, respectivamente. Nas laterais do tanque de ensaio, a concentração da corrente de turbidez apresentou valores próximos entre os ensaios, em uma mesma abscissa analisada. Além disso, considerando uma mesma altura da corrente para os diferentes experimentos da etapa, é possível notar semelhanças entre as geometrias da curva de concentração da corrente.

Em todos os ensaios da Etapa 5, as maiores variações de concentração ao longo da altura da corrente ocorreram nos primeiros 2,5 cm em relação ao leito do canal. Após a abscissa 250 cm, a diferença da concentração da corrente de turbidez para as alturas analisadas ocorreu de maneira menos significativa, com diferença máxima de 0,18%.

Figura 59 - Mapa de contorno da concentração em diferentes alturas – EC 2

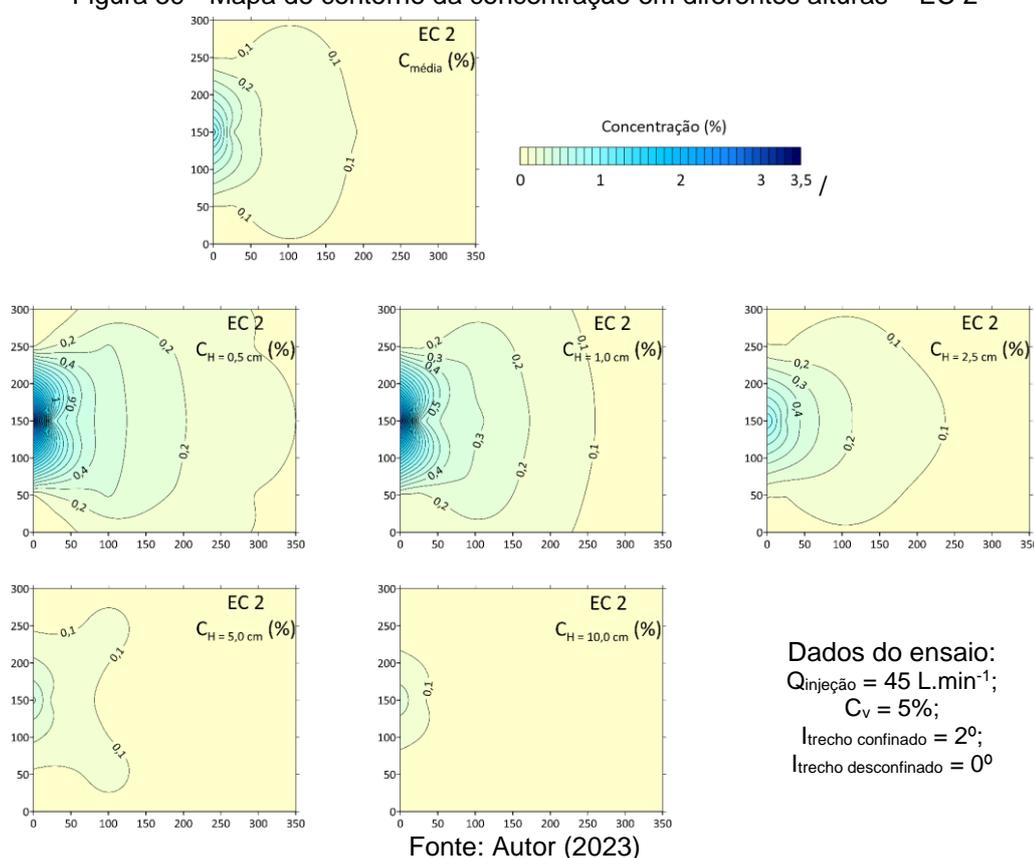


Figura 60 - Mapa de contorno da concentração em diferentes alturas – EC 3

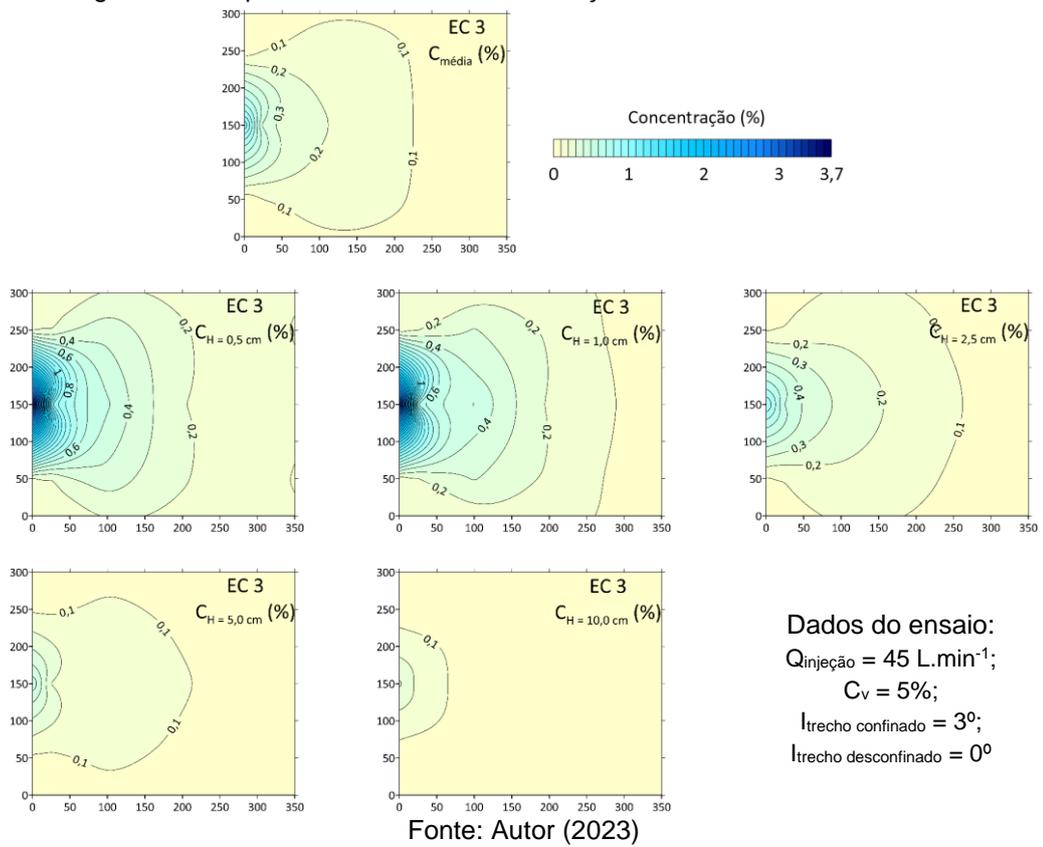
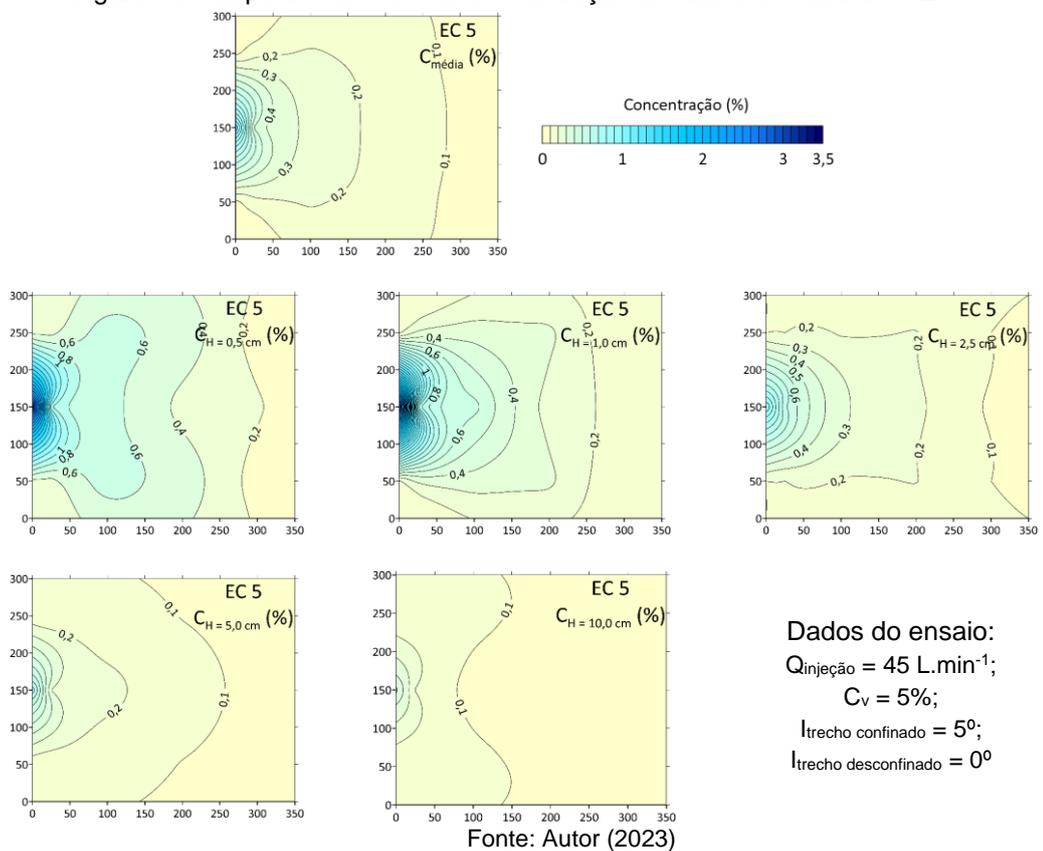


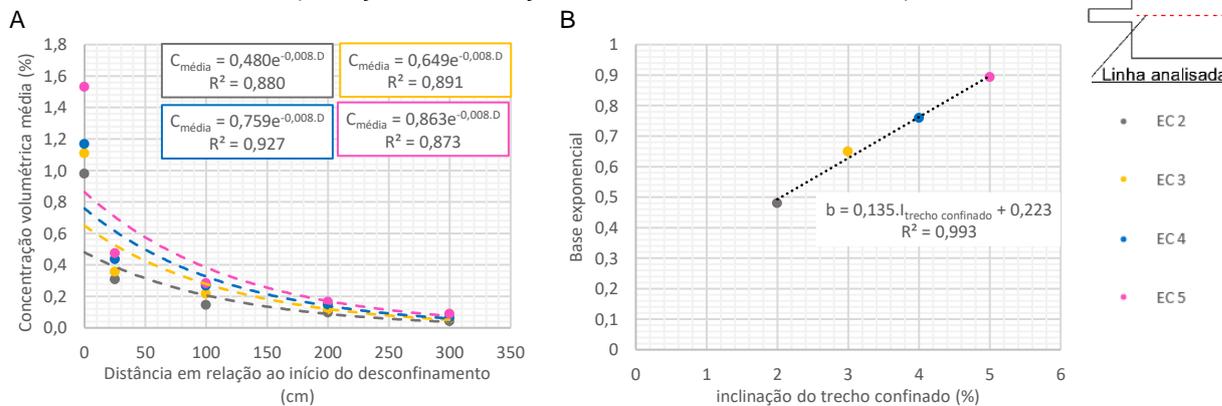
Figura 61 - Mapa de contorno da concentração em diferentes alturas – EC 5



Na Figura 62 (A), são apresentadas as linhas de tendência, com suas respectivas equações, que permitem estimar o valor da concentração volumétrica média para os ensaios realizados. Nestas equações, nota-se que o aumento da inclinação do leito da região confinada teve como resultado equações com maiores bases exponenciais. Além disso, os coeficientes de correlações (R^2) apresentam valores acima de 0,87, o que pode ser considerado como satisfatório em ensaios de modelagem física.

Assim como feito nas etapas 3 e 4, os expoentes das equações da Figura 62 (A) foram ajustados, de modo que apresentem o mesmo valor entre os ensaios da etapa, buscando manter o coeficiente de determinação acima de 0,70 para todos os ensaios. Após estes ajustes, almejando determinar uma equação que relacione a concentração volumétrica média em função da declividade do leito confinado, plotou-se as bases exponenciais das equações da Figura 62 (A), em função da declividade do leito do trecho confinado, equacionando essa relação, conforme Figura 62 (B).

Figura 62 - Variação da concentração média ao longo do eixo longitudinal central – Etapa 5 (variação da inclinação do leito do trecho confinado)



Fonte: Autor (2023)

Aplicando a relação encontrada na Figura 62 (B), com o expoente ajustado na Figura 62 (A), obteve-se a Equação 11, que relaciona a concentração volumétrica média da corrente de turbidez no eixo longitudinal central com a inclinação do leito do trecho confinado e a distância.

$$C_{\text{média}} = (0,135 \cdot I_{\text{trecho confinado}} + 0,223) \cdot e^{-0,008 \cdot D} \quad (\text{Equação 11})$$

Onde:

$C_{\text{média}}$ é a concentração volumétrica média da corrente de turbidez (%);

$I_{\text{trecho confinado}}$ é a inclinação do leito do trecho confinado ($^{\circ}$);

D é a distância em relação ao início do desconfinamento (cm).

A precisão da Equação 11 é apresentada na Tabela 15, que foi superior a 70% em 65% dos dados. Em 100% dos valores calculado, a precisão foi acima de 50%.

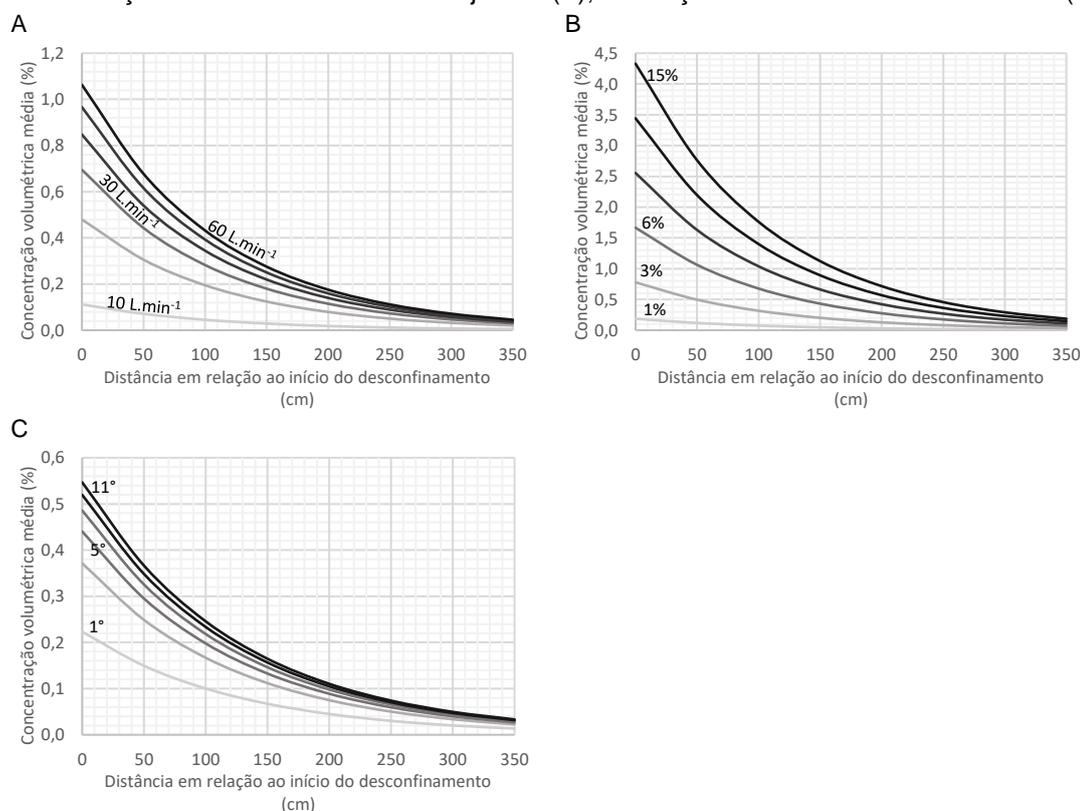
Tabela 15 – Precisão da Equação 11 (as células em verde são as que apresentaram resultado satisfatório e, as em vermelho, não satisfatório)

$I_{\text{trecho confinado}}$ ($^{\circ}$)	D (cm)	$C_{\text{média}}$ (Equação 11)	$C_{\text{média}}$ (medido)	Precisão
2	0	0,49	0,98	50%
2	25	0,40	0,31	76%
2	100	0,22	0,15	66%
2	200	0,10	0,10	98%
2	300	0,04	0,04	91%
3	0	0,63	1,11	57%
3	25	0,51	0,36	69%
3	100	0,28	0,22	77%
3	200	0,13	0,12	91%
3	300	0,06	0,06	97%
4	0	0,76	1,17	65%
4	25	0,62	0,44	70%
4	100	0,34	0,27	78%
4	200	0,15	0,15	96%
4	300	0,07	0,06	92%
5	0	0,90	1,53	59%
5	25	0,74	0,47	64%
5	100	0,40	0,28	70%
5	200	0,18	0,17	92%
5	300	0,08	0,09	93%

Fonte: Autor (2023)

Lançando-se mão dos valores medidos e das equações 9, 10 e 11 elaborou-se diagramas apresentados na Figura 63, que podem ser empregados como alternativa para estimar a concentração volumétrica média no eixo longitudinal central, a partir dos dados de vazão de injeção ou concentração volumétrica média da mistura injetada ou declividade do leito do trecho confinado. Com os dados desta pesquisa, o diagrama (A) apresentou precisão média de 71%; o (B) de 69% e, o (C) de 78%.

Figura 63 – Diagramas para estimar a concentração volumétrica a partir da: vazão de injeção (A); concentração volumétrica da mistura injetada (B); inclinação do leito do trecho confinado (C)



Fonte: Autor (2023)

8.7 NÚMERO DE FROUDE DENSIMÉTRICO

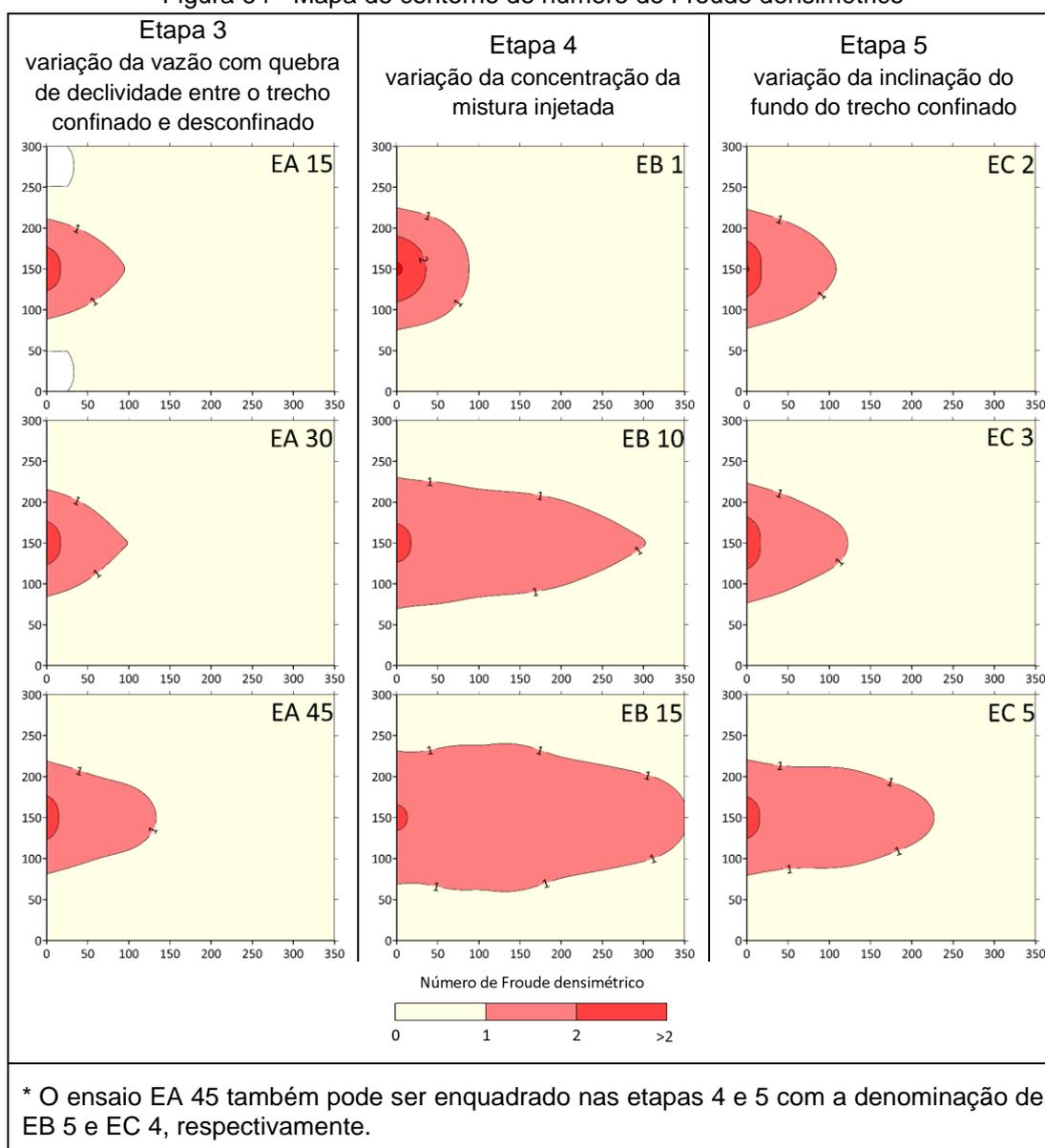
De posse das velocidades médias nos eixos longitudinal (Tabela 6) e transversal (Tabela 8), calculou-se o módulo das velocidades do vetor velocidade. Com este valor, determinou-se o número de Froude densimétrico utilizando a Equação 4. O valor adotado da massa específica do carvão foi de 1190 kg/m^3 , o mesmo utilizado por Manica (2002). Na Figura 64 é apresentado o mapa de contorno do número de Froude densimétrico do trecho desconfinado.

Em todos os ensaios realizados, os maiores números de Froude densimétrico ocorreram imediatamente após o desconfinamento da corrente. Este número adimensional é diretamente proporcional à velocidade média da corrente e inversamente proporcional à concentração e altura da corrente (gravidade reduzida).

Na Etapa 3, a velocidade média, a altura e a concentração volumétrica média da corrente de turbidez foram maiores para os ensaios com maiores vazões de injeção (em ordem crescente: EA 15, EA 30 e EA 45). O aumento destes três parâmetros não ocorreu de maneira proporcional ao aumento vazão de injeção.

Diante disso, em uma mesma abscissa, os maiores números de Froude densimétrico não ocorreram, necessariamente, para o ensaio EA 45, apesar de a mudança do estado supercrítico para o subcrítico ter ocorrido primeiro nos ensaios de menores vazões. Visto que houve mudança no regime do escoamento, os valores número de Froude densimétrico indicam que houve formação de ressalto hidráulico, embora não tenha sido visualmente notado.

Figura 64 - Mapa de contorno do número de Froude densimétrico



Fonte: Autor (2023)

Com o aumento da concentração da mistura injetada (Etapa 4), a velocidade média (ver Tabela 6) e a concentração volumétrica média (ver Figura 47) da corrente

de turbidez no início do desconfinamento também aumentaram, enquanto que a altura da corrente diminuiu (ver Figura 32). Com esses comportamentos, no desconfinamento, o número de Froude apresentou maiores valores para os ensaios com menores concentrações, ou seja, o número de Froude densimétrico apresentou a seguinte ordem $EB\ 1 > EB\ 5 > EB\ 10 > EB\ 15$ (ver Figura 65). Próximo a abscissa 100 cm, os maiores valores do número de Froude ocorreram nos ensaios com maiores concentrações de injeção, devido à acentuada redução da concentração média, que ocorreu, principalmente, nos ensaios de maiores concentrações (EB 10 e EB 15). A partir deste ponto, o número de Froude densimétrico apresentou a seguinte ordem $EB\ 15 > EB\ 10 > EB\ 5 > EB\ 1$. Uma vez que na abscissa 100 cm (exceto para o EB 1) os números de Froude densimétrico apresentaram valores maiores que um e, seguindo essa tendência, a mudança de estado do regime supercrítico para o subcrítico, ou seja, a ocorrência do ressalto hidráulico, ocorreu primeiramente nos ensaios com menores concentrações da mistura injetada, conforme Figura 64.

O aumento da declividade do fundo no trecho confinado (Etapa 5) ocasionou, no desconfinamento, elevação da concentração média, manutenção da altura da corrente e baixa/nenhuma mudança no valor da velocidade média. Com isso, o número de Froude densimétrico apresentou maiores valores para os ensaios com menor inclinação do leito do trecho confinado, em ordem crescente, o número de Froude densimétrico apresentou a seguinte ordem $EC\ 2 > EC\ 3 > EC\ 4 > EC\ 5$. A partir da abscissa 100 cm, as velocidades médias foram maiores para os ensaios com maiores declividades do leito do trecho confinado e, com isso, o número de Froude densimétrico que ainda apresentava valores maiores que um, apresentou a seguinte ordem $EC\ 5 > EC\ 4 > EC\ 3 > EC\ 2$ (Figura 65). Seguindo esta tendência, a mudança do regime supercrítico para o subcrítico (formação de ressalto hidráulico) ocorreu primeiro nos ensaios com menor declividade do leito confinado (Figura 64).

Na Figura 64 no eixo lateral analisado (ordenadas⁷ 50 e 250 cm), o regime foi subcrítico para todos os ensaios. Isso ocorre pois, nestes eixos, as velocidades apresentaram valores baixos, quando comparados com as velocidades do eixo longitudinal central, para uma mesma abscissa. Entre as abscissas 0 e 150 cm, a velocidade da corrente de turbidez no eixo lateral corresponde à, aproximadamente, 30% do valor da velocidade do eixo central. Em relação a concentração média, essa

⁷ Ordenada corresponde ao eixo de coordenadas Y.

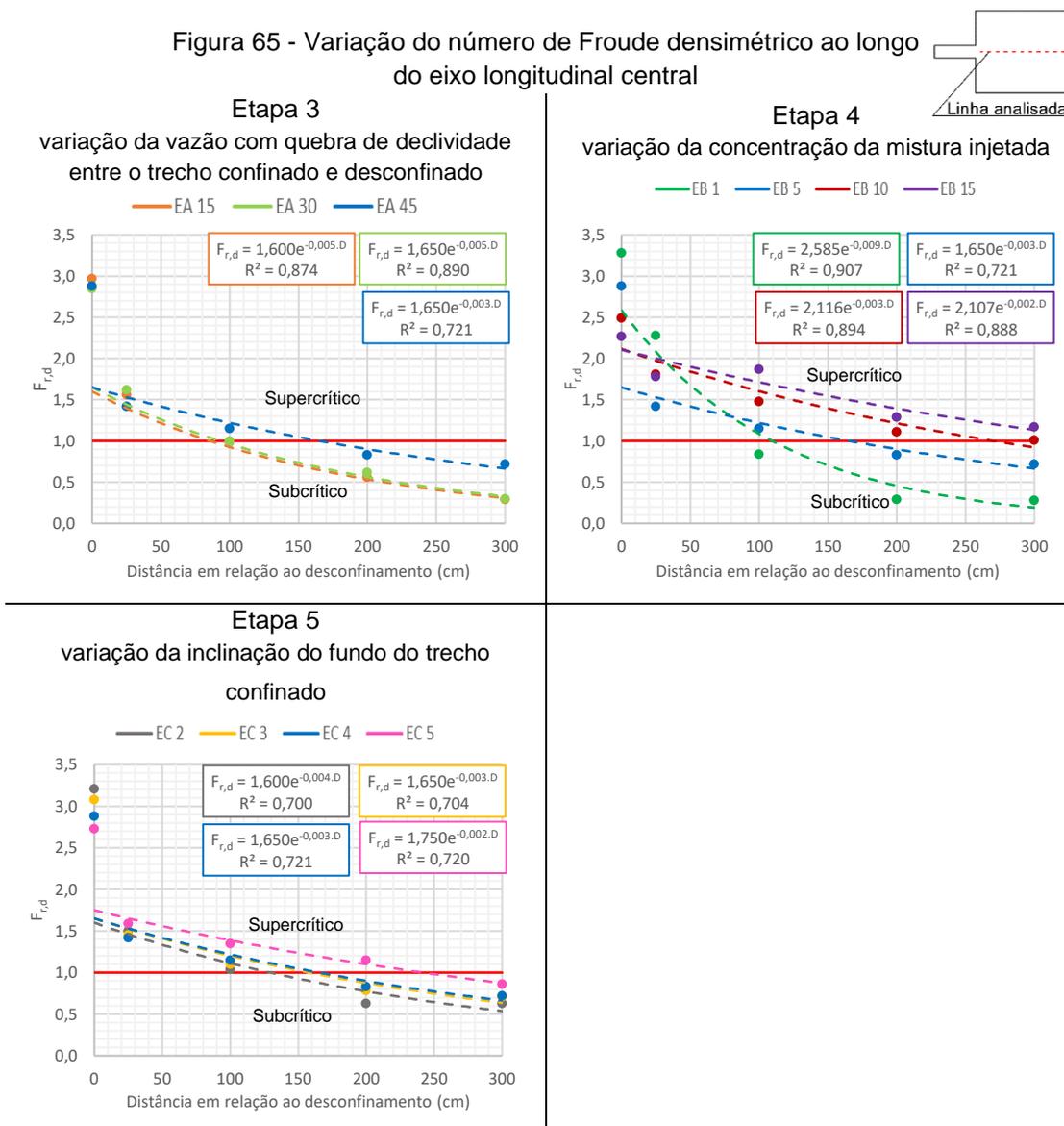
relação é maior, por exemplo na abscissa 100 cm, à concentração média no eixo lateral analisado apresenta valor de aproximadamente 70% da concentração média do eixo central. A altura da corrente no eixo central e lateral praticamente não variou para uma mesma abscissa analisada.

Na Figura 65 é apresentada a linha de tendência e a equação da variação do número de Froude densimétrico ao longo do eixo central longitudinal. Esta linha de tendência foi ajustada de modo apresentar a transição do regime supercrítico para o subcrítico condizente com a Figura 64. Esse ajuste foi necessário pois nesta imagem a interpolação leva em consideração a variação do número de Froude de pontos localizados nos eixos laterais, o que fornece maior representatividade por se tratar de um ensaio tridimensional. Foi adicionado a linha contínua vermelha para indicar o estado crítico ($F_{r,d} = 1$) e, conseqüentemente, o limiar de mudança de estado.

As equações que apontam a variação do número de Froude densimétrico (Figura 65) apresentaram coeficiente de determinação (R^2) superior a 0,7, o que fornece uma boa estimativa de tal parâmetro. Aplicando tais equações obtém-se que a troca de regime na Etapa 3 ocorre nas abscissas 95, 100 e 165 cm para os ensaios EA 15, EA 30 e EA 45, respectivamente. Na Etapa 4 a mudança de estado ocorre na distância 105, 165, 250 e 370 cm para os ensaios EB 1, EB 5, EB 10 e EB 15, respectivamente. Nos ensaios da Etapa 5 a troca de estado ocorre nas abscissas 120, 165, 165 e 250 cm, para os ensaios EC 2, EC 3, EC 4 e EC 5, respectivamente. Diante disso observa-se que o aumento da vazão, concentração e declividade do leito do trecho confinado retarda a transição do regime supercrítico para o subcrítico.

Em todos os ensaios deste trabalho, exceto EB 15, houve a identificação da mudança do regime da corrente de turbidez, passando de supercrítico para subcrítico, o que é um indício da ocorrência de ressalto hidráulico. Nos locais em que ocorreram a mudança do regime do escoamento, a altura total da corrente de turbidez, de maneira geral, não apresentou variações significativas. Nestes locais, não foi possível observar os fenômenos de erosão (montante) e deposição (jusante) no depósito, devido ao volume de material sedimentado nesta região ter sido baixo. Possivelmente, caso o ensaio fosse realizado em situação de fundo móvel e/ ou com maior duração, estes fenômenos seriam visualmente identificados.

Figura 65 - Variação do número de Froude densimétrico ao longo do eixo longitudinal central



8.8 NÚMERO DE REYNOLDS

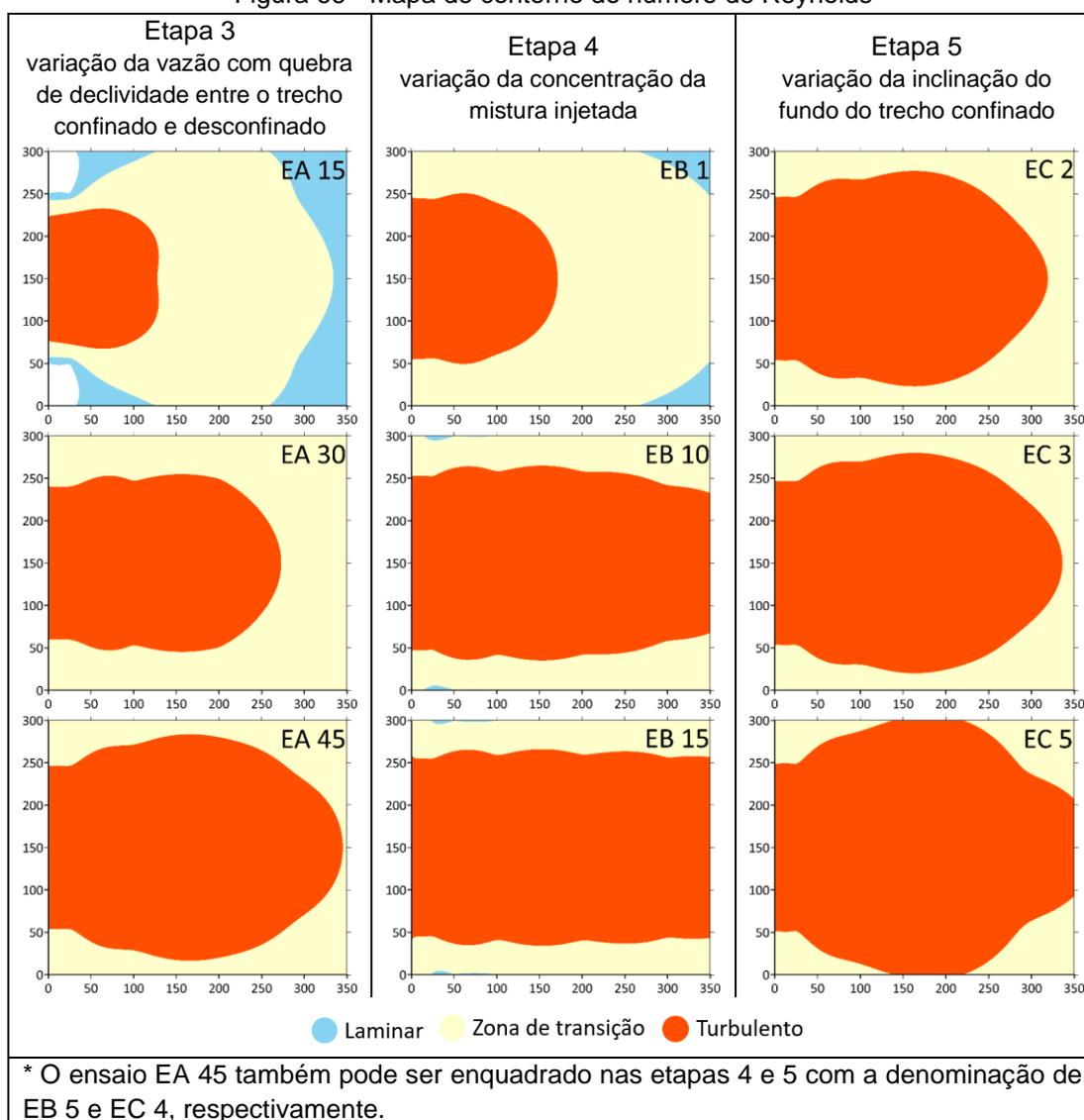
O número de Reynolds foi calculado com a Equação 5. Na Figura 66 é apresentada a classificação do fluxo ao longo do canal para todos os ensaios realizados nesta pesquisa. Neste contexto, na Etapa 3, com o aumento da vazão de injeção da mistura, o número de Reynolds aumentou para todos os pontos em que se mediu a velocidade.

No ensaio EA 15, o qual apresentou a menor velocidade média entre os ensaios realizados, na região mais distal do início do desconfinamento e nas extremidades do trecho inicial, o fluxo apresentou número de Reynolds inferior a 500, ou seja, o fluxo foi classificado como laminar. Neste ensaio, em um raio de aproximadamente 65 cm do local em que ocorreu o desconfinamento, o fluxo

apresentou comportamento turbulento, com Reynolds máximo de 12478. No ensaio EA 30, a região do fluxo turbulento aumentou, quando comparado com a área do EA 15, uma vez que as velocidades médias foram superiores. O valor máximo do Reynolds neste ensaio foi de 15431. Neste ensaio, não houve, dentro do trecho analisado, região com fluxo laminar.

No ensaio com maior vazão da Etapa 3 (EA 45), a área com fluxo turbulento foi a maior entre os experimentos da etapa em questão. Para este ensaio, o número de Reynolds chegou a 19149 no início do desconfinamento e, assim como no EA 30, não houve fluxo laminar no trecho em que foram realizadas as medições e análise.

Figura 66 - Mapa de contorno do número de Reynolds



Fonte: Autor (2023)

Nos experimentos da Etapa 4, no trecho analisado, o fluxo pode ser classificado como turbulento ou em uma zona de transição. No ensaio EB 1 as extremidades laterais distais apresentaram regime do fluxo foi laminar e, nas proximidades do início do desconfinamento, o regime foi turbulento. Nos ensaios EB 10 e EB 15, na região longitudinal central, o regime de escoamento foi turbulento ao longo de toda a área analisada. Nesta etapa da pesquisa, nos ensaios que utilizaram o mesmo tipo de carvão, as velocidades dos experimentos aumentaram à medida que se elevou a concentração, o mesmo ocorreu para o número de Reynolds. Para o EB 1, EB 10 e EB 15, o número de Reynolds máximo foi de 22408; 22861 e; 33626 respectivamente.

Na Etapa 5, assim como na Etapa 4, não houve regiões com fluxo do tipo laminar, conforme Figura 66. Nesta etapa foi possível notar o aumento da região turbulenta à medida que se elevou a declividade do leito do trecho confinado, quando utilizado o mesmo tipo de material na mistura que foi injetada. O Reynolds máximo foi de 20659, 20733 e 21290 para os ensaios EC 2, EC 3 e EC 5, respectivamente.

8.9 REGISTRO FOTOGRÁFICO DO DEPÓSITO FORMADO

Neste item será apresentado o registro fotográfico dos depósitos na região confinada e desconfinada, formados após os ensaios (Figura 67). As setas nas imagens indicam o sentido do fluxo. Visando destacar a geometria dos lobos turbidíticos, realizou-se o contorno do depósito na terceira imagem de cada ensaio. A medida do fator de forma destes depósitos será abordada posteriormente neste trabalho.

Visto que todos os ensaios apresentaram a mesma duração (60 min), o aumento da vazão de injeção proporciona maior volume de sedimentos injetados. Com isso, nas etapas 2 e 3, ocorreram os maiores depósitos e os lobos turbidíticos ficam mais evidentes nos ensaios de maiores vazões (E30, E40, EA 30 e EA 45). Nos ensaios E30 e E40 (ambos da Etapa 2), notou-se nos lobos uma geometria que se assemelha à radial (circular) e, na região confinada, foi possível visualizar ondulações na superfície do depósito. No ensaio E10 as fotos foram realizadas três meses depois da realização do ensaio devido ao impedimento de acesso ao laboratório em função da pandemia do Covid-19. Nas fotos deste experimento é possível notar bastante trincas no depósito pois o material ficou exposto por um longo período e ressecou. Neste ensaio os limites dos lobos foram indicados e, na região confinada, mesmo

tendo depositado uma quantidade significativa de material, não foi possível notar a presença de dunas e ondulações.

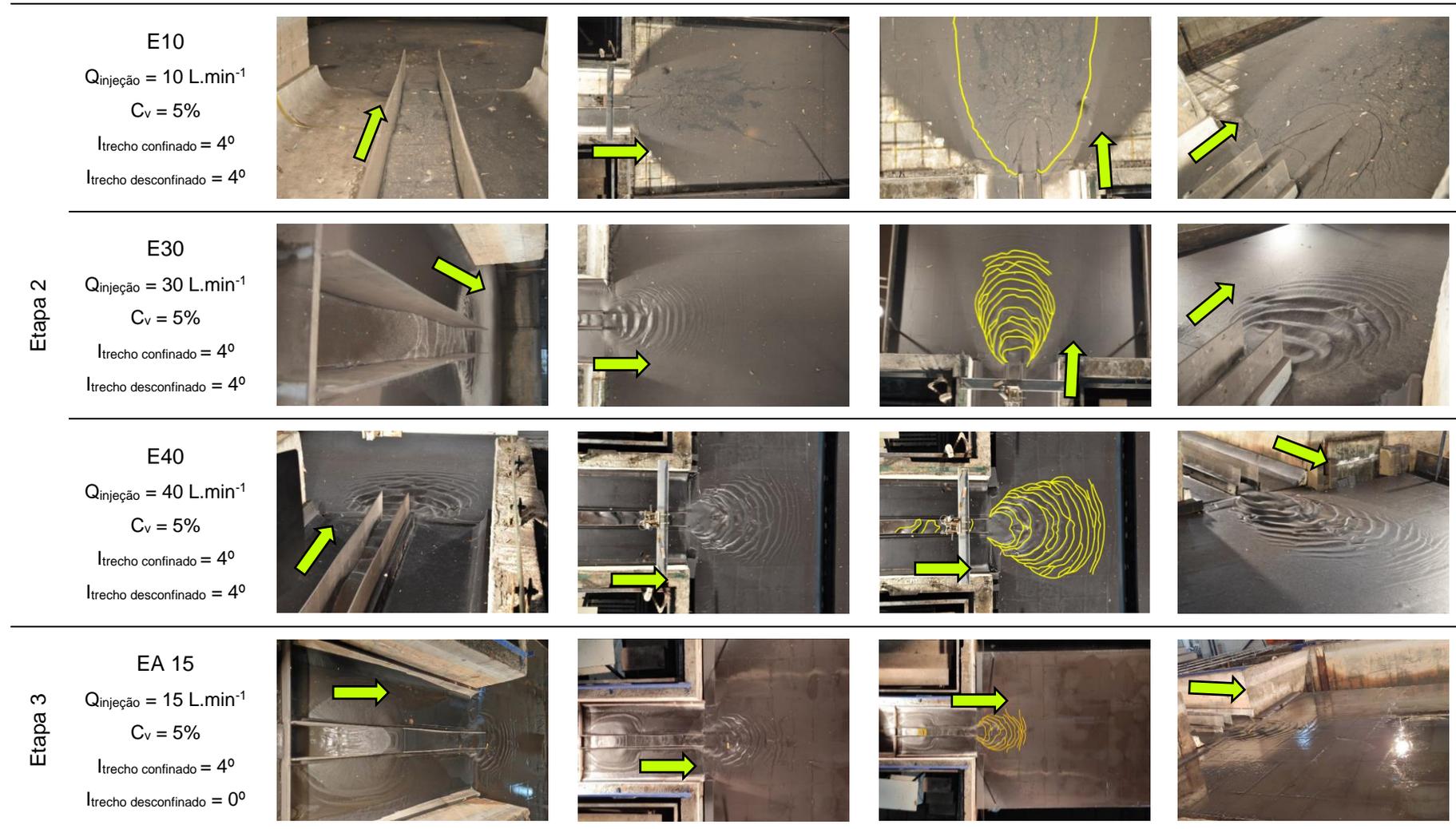
Em termos visuais, diferentemente do que havia acontecido com o ensaio E10, a quebra de declividade proporcionou a formação de lobos turbidíticos no ensaio com menor vazão da Etapa 3 (EA 15). Entretanto, para os demais experimentos desta etapa (EA 30 e EA 45), não foi possível observar grandes divergências entre os depósitos dos ensaios E30 e E40.

Nos depósitos formados nos ensaios da Etapa 4, conforme aumentou-se a concentração da mistura injetada, notou-se que o lobo turbidítico desenvolveu formato mais próximo ao radial. Contudo, para os ensaios com as maiores concentrações (EB 10 e EB 15), as formas de fundo localizadas mais a jusante ficaram com geometria côncavas, perpendiculares ao fluxo.

Na Etapa 5, em termos qualitativos, não foi possível notar nítidas diferenças visuais entre a geometria dos depósitos formados. Diante disso, nesta etapa, as comparações dos depósitos dos diferentes ensaios serão avaliadas no item 8.10 Topografia do depósito formado.

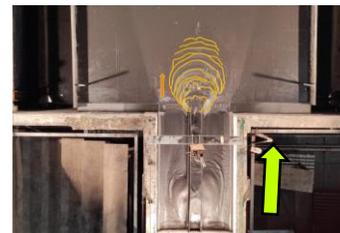
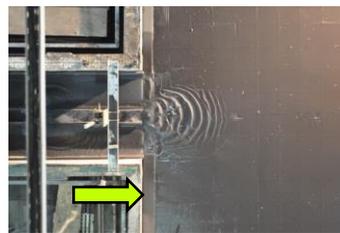
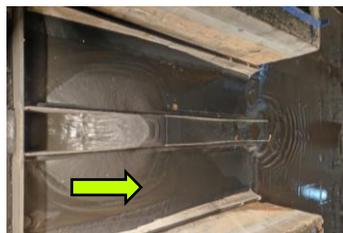
Ainda na Figura 67, nota-se que a quebra de declividade associada à concentração igual ou superior a 5%, resultou no transbordamento de partículas de carvão na região confinada. A divergência entre estes ensaios (EA 15, EA 30, EA 45, EB 10, EB 15, EC 2, EC 3 e EC 5) está na distância em relação ao difusor em que houve esse transbordamento e ao volume de material depositado no trecho confinado. A geometria do depósito e volume de material depositado na região confinada será apresentado no item 8.10.1 Topografia da região confinada.

Figura 67 - Registro fotográfico dos depósitos gerados: Etapa 2 - variação da vazão sem quebra de declividade entre o trecho confinado e desconfinado; Etapa 3 - variação da vazão com quebra de declividade entre o trecho confinado e desconfinado; Etapa 4 - variação da concentração da mistura injetada; Etapa 5 - variação da inclinação do fundo do trecho confinado

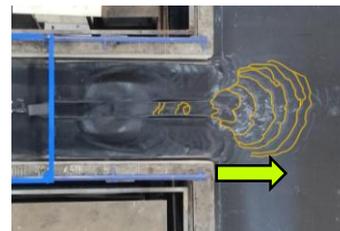
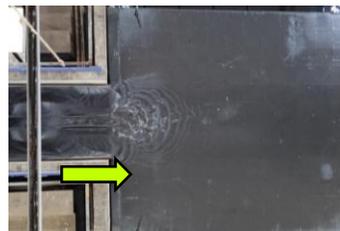


Etapa 4

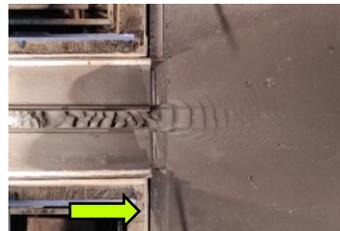
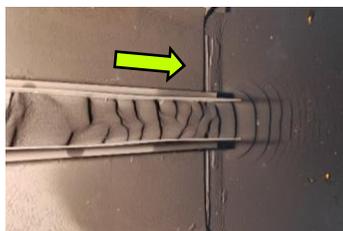
EA 30
 $Q_{\text{injeção}} = 30 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$
 $C_v = 5\%$
 $I_{\text{trecho confinado}} = 4^\circ$
 $I_{\text{trecho desconfinado}} = 0^\circ$



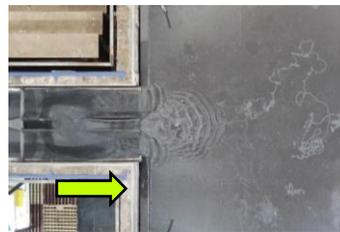
EA 45*
 $Q_{\text{injeção}} = 45 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$
 $C_v = 5\%$
 $I_{\text{trecho confinado}} = 4^\circ$
 $I_{\text{trecho desconfinado}} = 0^\circ$

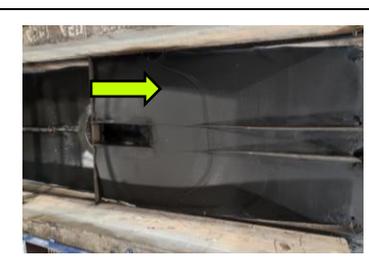
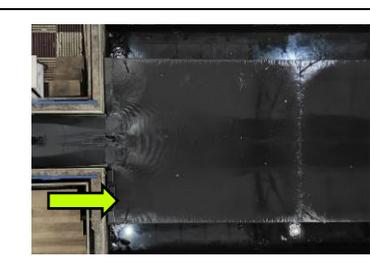
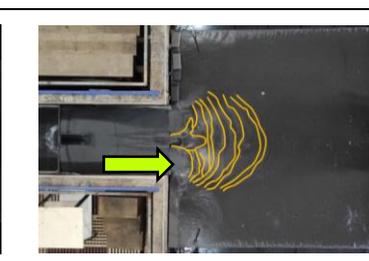
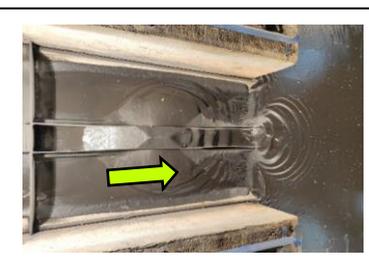
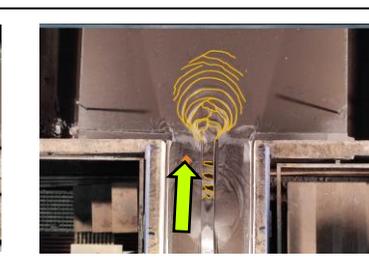
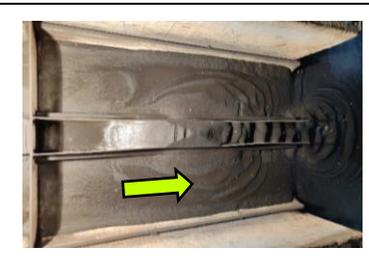
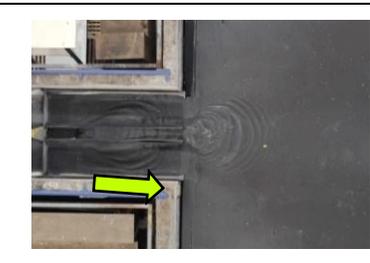
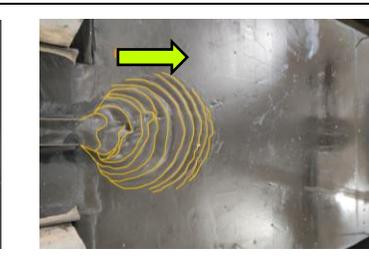
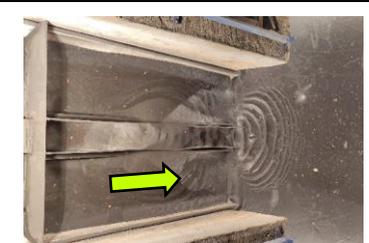
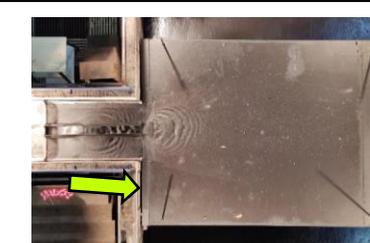


EB 1
 $Q_{\text{injeção}} = 45 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$
 $C_v = 1\%$
 $I_{\text{trecho confinado}} = 4^\circ$
 $I_{\text{trecho desconfinado}} = 0^\circ$



EB 10
 $Q_{\text{injeção}} = 45 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$
 $C_v = 1\%$
 $I_{\text{trecho confinado}} = 4^\circ$
 $I_{\text{trecho desconfinado}} = 0^\circ$



<p>EB 15</p> <p>$Q_{\text{injeção}} = 45 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$</p> <p>$C_v = 1\%$</p> <p>$I_{\text{trecho confinado}} = 4^\circ$</p> <p>$I_{\text{trecho desconfinado}} = 0^\circ$</p>				
<p>EC 2</p> <p>$Q_{\text{injeção}} = 45 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$</p> <p>$C_v = 5\%$</p> <p>$I_{\text{trecho confinado}} = 2^\circ$</p> <p>$I_{\text{trecho desconfinado}} = 0^\circ$</p>				
<p>Etapa 5</p> <p>EC 3</p> <p>$Q_{\text{injeção}} = 45 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$</p> <p>$C_v = 5\%$</p> <p>$I_{\text{trecho confinado}} = 3^\circ$</p> <p>$I_{\text{trecho desconfinado}} = 0^\circ$</p>				
<p>EC 5</p> <p>$Q_{\text{injeção}} = 45 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$</p> <p>$C_v = 5\%$</p> <p>$I_{\text{trecho confinado}} = 5^\circ$</p> <p>$I_{\text{trecho desconfinado}} = 0^\circ$</p>				

* O ensaio EA 45 também pode ser enquadrado nas etapas 4 e 5 com a denominação de EB 5 e EC 4, respectivamente.

Fonte: Autor (2023)

8.10 TOPOGRAFIA DO DEPÓSITO FORMADO

A topografia do depósito formado, conforme descrito anteriormente, foi analisada na região confinada através de medição manual, utilizando uma régua milimétrica e, na região desconfinada, por meio da utilização de um medidor de distância a laser. Assim, optou-se em apresentar esses resultados em tópicos separados. Além disso, para o trecho confinado, a topografia será exibida na forma bidimensional e, para a região desconfinada, como tridimensional.

8.10.1 Topografia da região confinada

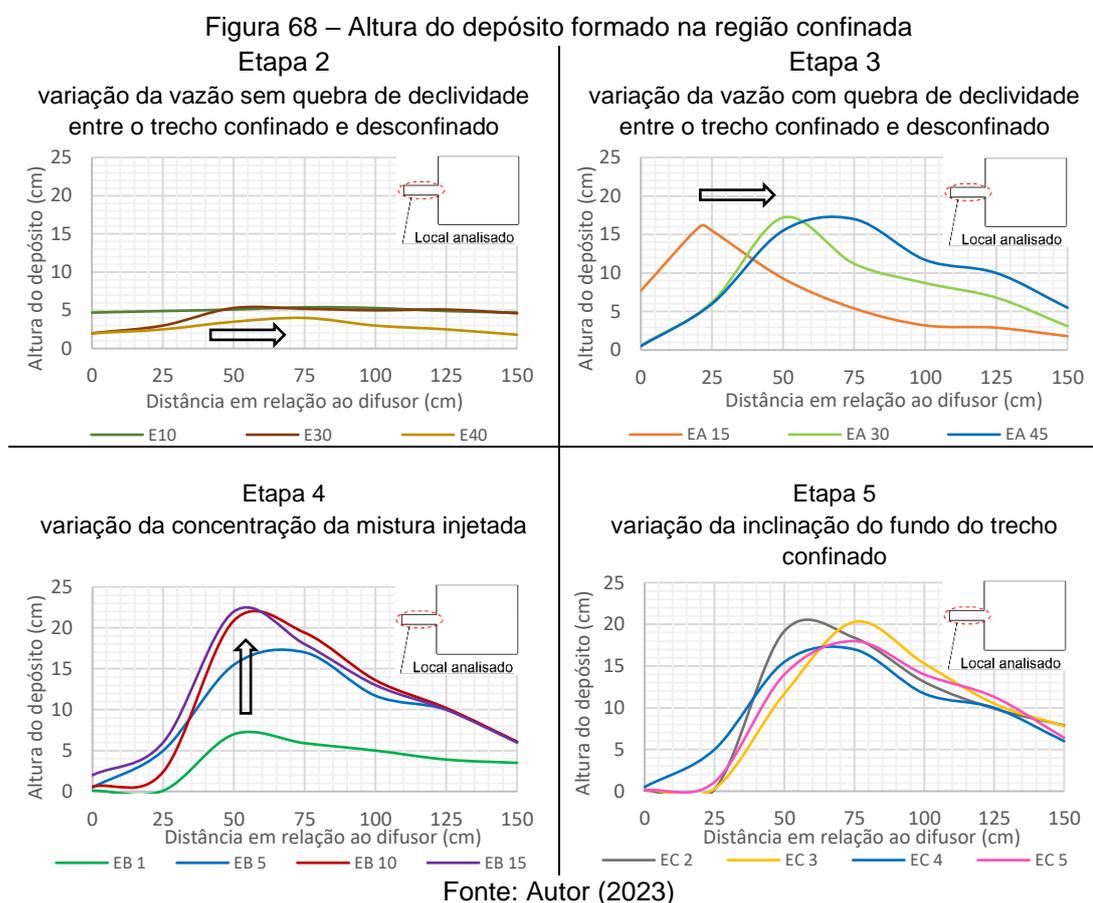
A análise da topografia do trecho confinado foi realizada avaliando-se a altura do depósito no eixo longitudinal central, ou seja, foi considerado que a espessura do depósito foi a mesma para as seções perpendiculares à direção principal do fluxo (eixo X). Na Figura 68 são apresentados esses valores, com a indicação (setas) da tendência (quando observada) de deslocamento do pico do depósito.

Na Etapa 2 a altura do depósito entre os ensaios apresentou a menor variação, quando comparado com as outras etapas. Nesta fase, a espessura final do depósito decresceu à medida que se aumentou a vazão de injeção, indicando que mais material foi transportado para a bacia e, o pico do depósito se deslocou para jusante. Nesta fase, o ensaio E10 foi o que apresentou o maior pico do depósito, com espessura de 5,4 cm. O volume aproximado de material depositado na região confinada, para os ensaios E10, E30 e E40 foi de 115, 100 e 65 cm³, respectivamente.

Na Etapa 3, conforme se aumentou a vazão de injeção, mais distante ficou o pico do depósito em relação ao difusor. Este pico ocorreu nas abscissas 21, 50 e 75 cm em relação ao difusor, para os experimentos EA 15, EA 30 e EA 45, respectivamente. Mesmo com o aumento da velocidade média (maior vazão de injeção), a quantidade de material depositada no trecho confinado foi maior para os ensaios com maiores vazões, ou seja, o incremento de vazão não proporcionou, necessariamente, a energia suficiente para transportar as partículas para as regiões mais distais do tanque. O volume de sedimentos depositados na região confinada para os experimentos EA 15, EA 30 e EA 45 foi de 160, 195 e 235 cm³, respectivamente.

O aumento da concentração (Etapa 4) não alterou a posição em que o depósito apresentou maior espessura (pico), que foi próximo à abscissa 50 cm. As menores espessura do depósito ocorreram nos ensaios menos concentrados, conforme

esperado pois, a redução da concentração diminui o volume de sedimento injetado. As espessuras máximas e os volumes dos depósitos para os ensaios EB 1, EB 5, EB 10 e EB 15 foram de 7, 17, 21 e 22 cm e 90, 235, 260 e 275 cm³, respectivamente.



Na Etapa 5, mesmo com a mudança da declividade do leito, as espessuras e geometria dos depósitos apresentaram baixa variação. As espessuras máximas (pico) dos depósitos foram de 19, 20, 17 e 18 cm, para os ensaios EC 2, EC 3, EC 4 e EC 5, respectivamente. Estes picos ocorreram próximos à abscissa 75 cm, exceto para o EC 2, que ocorreu na abscissa 60 cm. O volume aproximado de sedimentos depositados nesta região apresentou baixa variação, sendo de 240, 233, 235 e 231 cm³ para os ensaios EC 2, EC 3, EC 4 e EC 5, respectivamente.

8.10.2 Topografia da região desconfinada

A determinação da topografia da região confinada se deu por meio da leitura realizada com o distanciômetro a laser, com espaçamento entre as medições de 3 cm nos primeiros 150 cm em relação ao início do desconfinamento e, após essa abscissa,

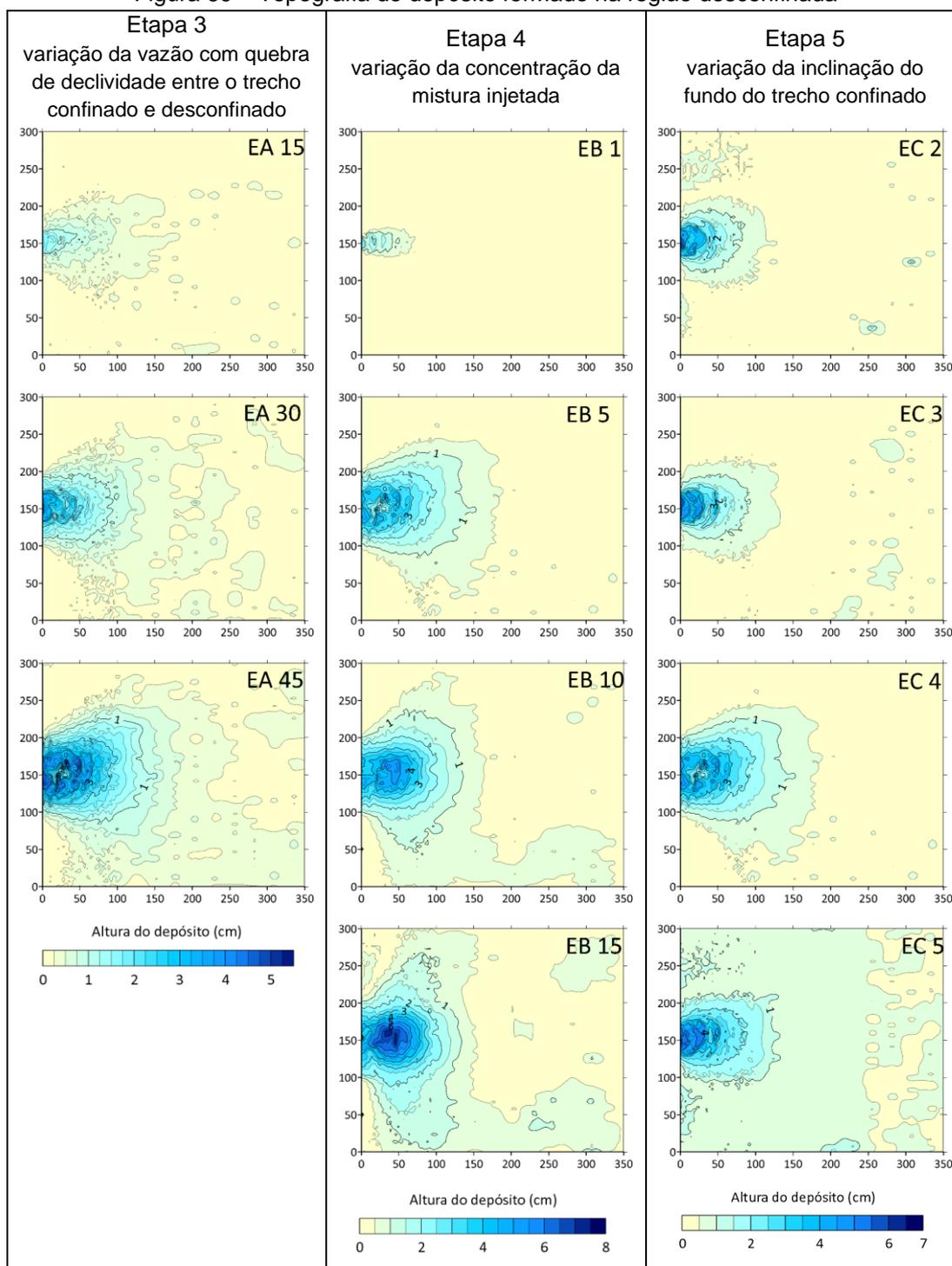
de 15 cm. Em alguns trechos analisados, a placa da região desconfinada apresentava irregularidades, formando pequenas bacias, tendo como consequência formação de depósitos com maiores espessuras em trechos a jusante do canal.

A topografia dos depósitos de todos os experimentos é apresentada na Figura 69. Nesta imagem é possível notar que o incremento da vazão (Etapa 3) ocasionou depósitos mais espessos, principalmente na região mais próxima do início do desconfinamento. O aumento da vazão também proporcionou maior definição dos lobos. As maiores espessuras do depósito para os ensaios EA 15, EA 30 e EA 45 foram 3,20; 4,56; 5,32 cm, respectivamente.

A variação da concentração da mistura injetada (Etapa 4) gerou maiores depósitos mais espessos para os ensaios com maiores concentrações. Estes depósitos apresentaram lobos com geometria mais circular quando comparados aos ensaios com menores concentrações. Mesmo com a variação das concentrações, nas regiões mais distais do tanque, após a abscissa 150 cm, as espessuras dos depósitos não apresentaram grandes variações entre os ensaios, com valor máximo inferior a 0,7 cm entre os experimentos EB 15 e EB 1. As maiores espessuras dos depósitos nos ensaios EB 1, EB 5, EB 10 e EB 15 foram de 2,9; 5,3; 6,1; 8,9 cm, respectivamente.

O aumento da declividade do fundo do trecho confinado (Etapa 5), proporcionou depósitos mais espessos à medida que se avança para a jusante. Os experimentos EC 2 e EC 3 apresentaram espessuras com baixa variação entre eles, inclusive nas espessuras máximas, que foram de 6,5 e 6,2 cm, respectivamente. O EC 4 foi o ensaio que apresentou maior discrepância entre as espessuras do depósito da Etapa 5, o que é explicável devido ao menor tamanho dos grãos do material utilizado. No EC 5, de maneira geral, houve as maiores espessuras do depósito para um mesmo ponto, entretanto, entre os ensaios que utilizaram o mesmo tipo de sedimento da referida etapa, foi o que apresentou a menor espessura máxima, que foi de 5,5 cm. Essa menor espessura máxima do EC 5 é justificável pelo aumento da energia da corrente de turbidez ocasionado pela elevação da declividade do leito do trecho confinado, tendo, como consequência, o carreamento das partículas para regiões mais distais.

Figura 69 – Topografia do depósito formado na região desconfiinada



Fonte: Autor (2023)

8.11 GRANULOMETRIA DO DEPÓSITO FORMADO

Com o objetivo de facilitar a compreensão da forma como houve a sedimentação das partículas em suspensão e, seguir o padrão dos outros parâmetros já descritos neste trabalho, separou-se a análise granulométrica do depósito em duas regiões: confinada e desconfiinada. A análise granulométrica mostrou que o diâmetro

médio ($D_{\text{médio}}$) e o D_{50} apresentaram, de maneira geral, baixa divergência de valores. Diante disso, nesta seção será avaliado o diâmetro médio. No Apêndice D, são apresentados os valores do diâmetro médio e o D_{50} ao longo do depósito formado na região confinada.

8.11.1 Análise granulométrica do depósito da região confinada

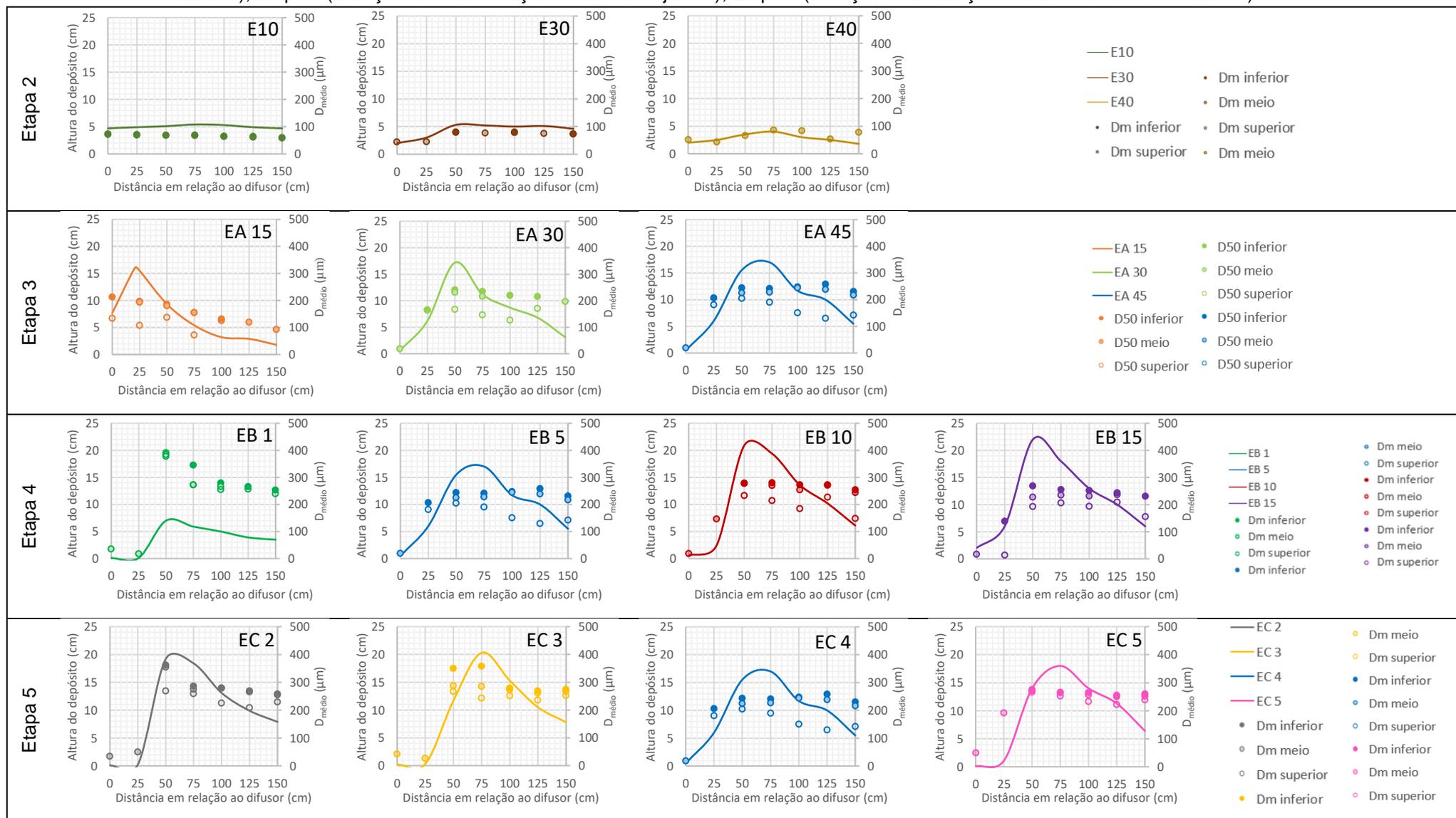
Na região confinada, devido às dimensões do canal, assumiu-se que não houve variação granulométrica do material sedimentado na direção perpendicular (eixo Y). Ao longo da direção longitudinal (eixo X), quando o depósito apresentou espessura superior a 5 cm, houve coleta de amostras em pelo menos dois pontos na vertical. De maneira geral, observou-se que as partículas com maiores diâmetros se encontraram mais próximas ao fundo e, à medida que se aproximou para a superfície do depósito, esse diâmetro foi diminuindo. Na Figura 70 são apresentadas a superfície do depósito formado na região confinada, o diâmetro médio a cada 25 cm.

No ensaio E10, os diâmetros das partículas sedimentadas na região confinada apresentaram baixa variação quando comparada aos demais ensaios. Se analisado todo o depósito, independentemente da altura em que foi feita a coleta da amostra analisada, o diâmetro médio foi de 65,67 μm , apresentando desvio padrão de 3,7 μm . Na Tabela 16 é apresentado o diâmetro médio e desvio padrão por camada (região inferior e superior do depósito). Na Etapa 2, O E10 foi o ensaio que apresentou maior volume de material sedimentado neste trecho do tanque, aproximadamente 114 cm^3 , com altura do depósito com cerca de 5 cm, ao longo de todo o trecho confinado.

No E30, para distâncias a partir de 50 cm do difusor, independentemente da altura em que foi feita a coleta da amostra analisada, o diâmetro médio das partículas sedimentadas foi de 74,46 μm , com desvio padrão de 2,57 μm . Ao se analisar toda a região confinada, o diâmetro médio das partículas apresentou valores de 68,14 μm , com o desvio padrão de 13,52 μm . Quando avaliadas as camadas do depósito, notou-se que houve semelhanças no diâmetro médio e desvio padrão nas regiões inferior e superior, com discrepância destes valores na região intermediária (meio) da espessura do depósito (Tabela 16). No ensaio E30, entre o difusor e a distância de 50 cm, houve sedimentação de material mais fino, com diâmetro médio de 42,86 μm . Já no trecho entre 50 e 150 cm, o diâmetro médio do material sedimentado variou entre 70 e 78 μm . O volume de material depositado neste trecho foi de aproximadamente 100 cm^3 , com altura de depósito variando de 2 a 5,3 cm.



Figura 70 – Diâmetro médio do depósito formado na região confinada – Etapa 2 (variação da vazão sem quebra de declividade entre o trecho confinado e desconfinado); Etapa 3 (variação da vazão com quebra de declividade entre o trecho confinado e desconfinado); Etapa 4 (variação da concentração da mistura injetada); Etapa 5 (variação da inclinação do fundo do trecho confinado)



Fonte: Autor (2023)

No E40 o diâmetro médio do material sedimentado ao longo do canal confinado foi o que apresentou maior variação entre os ensaios realizados na Etapa 2, com partículas variando de 41,05 a 81,60 μm e desvio padrão de 15,83 μm . A altura do depósito oscilou de 1,8 a 4 cm, com volume de material sedimentado de 65 cm^3 . Devido à altura do depósito formado (inferior a 5 cm), não foi realizada coleta de material em diferentes alturas, para uma mesma abscissa.

No ensaio EA 15, o diâmetro das partículas sedimentadas na região inferior e meio do depósito foi decrescendo à medida que se distanciou do difusor. Na camada superior do depósito, a variação do diâmetro não seguiu uma tendência de variação devido a interferências da topografia. Considerando apenas o trecho entre as placas de acrílico, ou seja, desprezando o volume de material que sobrepôs estas placas, o depósito formado apresentou volume de aproximadamente 157 cm^3 , com altura variando de 1,8 a 16 cm. Nesta região, o diâmetro médio, independentemente da altura em que foi feita a coleta da amostra analisada, variou de 67,17 a 196,72 μm , apresentando média de 121,56 μm e desvio padrão de 36,76 μm . Na Tabela 16 estes valores são apresentados em função da altura em que foi feita a coleta da amostra (região inferior, meio e superior).

No EA 30, de maneira geral, os diâmetros foram crescendo à medida que se aproximaram da abscissa em que estava localizada a maior altura do depósito (50 cm em relação ao difusor) e, após esse ponto foram decrescendo. O volume de sedimentos depositados no trecho confinado foi de cerca de 195 cm^3 , com altura entre 0,6 e 17,2 cm. O material que extravasou às paredes de acrílico não foi considerado nesses cálculos e medições.

Não foi possível estabelecer uma tendência de variação do diâmetro à medida que se avançou para o desconfinamento, para o ensaio EA 45 (EB 5/ EC 4). O diâmetro médio foi de 166,68 μm , com desvio padrão de 49,53 μm . Quando avaliada a variação do diâmetro médio ao longo da espessura, notou-se que, conforme se aproxima da região superior, maior é o desvio padrão deste parâmetro, ou seja, o desvio padrão da região inferior é menor do que no meio e, este, por sua vez, é menor que na região superior (Tabela 16). Na região entre as placas de acrílico, o depósito apresentou volume de aproximadamente 237 cm^3 e altura variando de 0,5 a 17 cm.

Tabela 16 – Variação do diâmetro médio ao longo da altura do depósito formado e volume de material sedimentado na região confinada

Etapa	Ensaio	D _{médio} (μm)	Desvio padrão (μm)	Volume do material sedimentado na região confinada - entre as calhas (cm^3)	
2	E10	(s) 65,6	3,7	113,6	
		(i) 65,7	4,0		
	E30	(s) 74,7	3,1		100,9
		(m) 58,3	17,9		
		(i) 74,8	3,6		
		E40	63,9		
3	EA 15	(s) 91,6	15,0	157,4	
		(m) 122,6	32,2		
		(i) 150,5	36,0		
	EA 30	(s) 95,0	9,9	194,8	
		(m) 120,8	54,1		
		(i) 152,6	32,3		
	EA 45*	(s) 116,2	39,2	237,0	
		(m) 180,8	24,9		
		(i) 205,4	27,7		
	4	EB 1	(s) 257,8	52,9	88,9
			(m) 292,6	46,8	
			(i) 292,7	53,9	
EB 10		(s) 136,9	48,8	261,9	
		(m) 249,3	20,5		
		(i) 264,4	21,9		
EB 15		(s) 134,2	31,5	273,8	
		(m) 198,9	5,1		
		(i) 225,1	27,7		
5		EC 2	(s) 191,6	54,0	243,0
			(m) 271,0	43,3	
			(i) 278,4	41,9	
	EC 3	(s) 219,8	24,9	232,9	
		(m) 267,6	23,3		
		(i) 294,8	41,9		
	EC 5	(s) 208,1	36,6	231,2	
		(m) 242,1	20,0		
		(i) 251,3	17,6		

Legenda: (s) região superior, (m) região intermediária/ meio, (i) região inferior.

* O ensaio EA 45 também pode ser enquadrado nas etapas 4 e 5 com a denominação de EB 5 e EC 4, respectivamente.

Fonte: Autor (2023)

Quando analisada a variação do diâmetro entre os ensaios da Etapa 3, nota-se que a dimensão do diâmetro dos grãos depositado foi influenciada pela vazão de injeção e, o incremento deste parâmetro proporcionou, de maneira geral, depósitos com partículas de maiores dimensões, para uma mesma abscissa. Como exemplo desta observação, tem-se para a abscissa 100 cm, na região inferior do depósito, o diâmetro médio de 109,15; 157,00 e; 217,06 μm , para os ensaios EA 15, EA 30 e EA 45, respectivamente.

Nos ensaios da Etapa 4 (EB 1, EB 10 e EB 15), à medida que se avançou em direção à região desconfinada, de modo geral, o valor do diâmetro foi decrescendo nas diferentes camadas (inferior, meio e superior). Nos experimentos dessa etapa, os maiores diâmetros das camadas analisadas estão localizados, em sua maioria, nos locais em que a espessura média do depósito é maior. Nesta etapa, os maiores valores do diâmetro na camada inferior, meio e superior ocorreu no EB 1 (considerando apenas depósitos com espessuras superiores a 0,5 cm e ensaios que se empregou o carvão 405), cujos valores foram 374,58; 362,76 e 358,31 μm . Os menores valores do diâmetro, nas diferentes camadas analisadas, ocorreram no EB 15, com valores de 49,65; 7,01 e 6,42 μm para as camadas inferior, central e superior, respectivamente. Diante disso, observa-se que a elevação da concentração proporcionou, na região confinada, depósitos com menores diâmetros ao longo das camadas, quando utilizado o mesmo material na composição da mistura de injeção. O volume e a altura máxima do depósito formado foram proporcionais a concentração da mistura injetada, com valores de 89; 237; 262 e; 274 cm^3 e, 7; 17; 20,9 e; 22 cm para os experimentos EB 1, EB 5, EB 10 e EB 15, respectivamente.

Nos experimentos da Etapa 5 (exceto EC 4), o diâmetro médio do depósito formado no trecho confinado foi superior 200 μm , com diâmetro máximo ocorrendo geralmente nos locais em que a altura do depósito também é máxima, ou próxima deste local. A medida em que houve aumento da inclinação do fundo do canal da região confinada, o diâmetro das partículas foi reduzindo em um mesmo ponto. As alturas máximas e volume do depósito formado na região confinada foram de 19,2; 20,3 e 18 cm e 243, 232 e 230 cm^3 , para os ensaios EB 1, EB 10 e EB 15, respectivamente.

8.11.2 Análise granulométrica do depósito da região desconfiada

Na região desconfiada, a análise da granulometria irá ser apresentada detalhadamente por meio das linhas 7 (central) e 10 (a esquerda), e pelas colunas C (proximal), G (meio) e K (distal), conforme Figura 71. Por meio desta análise, pretendeu-se verificar a variação granulométrica ao longo do eixo longitudinal e perpendicular a direção principal do fluxo. Nos locais em que a altura do depósito foi mais espessa, coletaram-se amostras de materiais nas regiões superiores e inferiores.

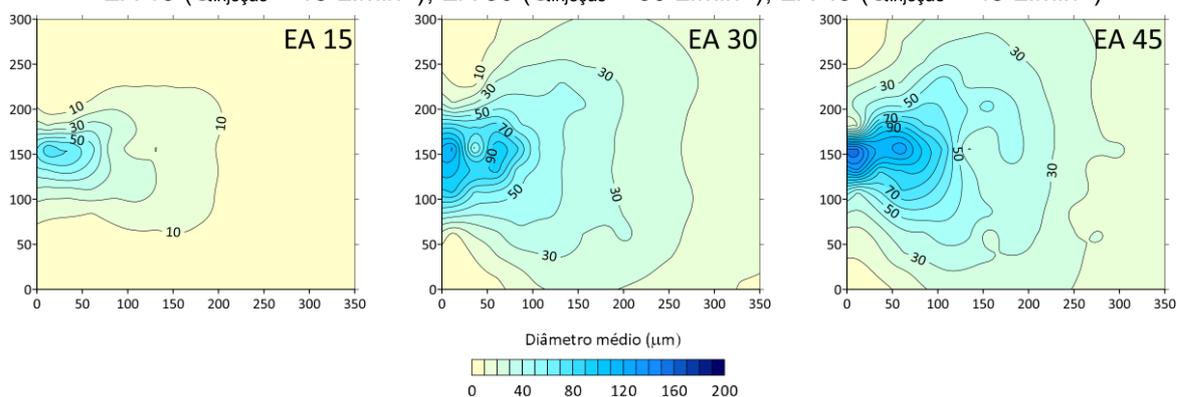
Figura 71 – Localização das linhas 7 e 10 e, das colunas C, G e K

A12	B12	C12	D12	E12	F12	G12	H12	I12	J12	K12	L12	M12	N12
A11	B11	C11	D11	E11	F11	G11	H11	I11	J11	K11	L11	M11	N11
A10	B10	C10	D10	E10	F10	G10	H10	I10	J10	K10	L10	M10	N10
A9	B9	C9	D9	E9	F9	G9	H9	I9	J9	K9	L9	M9	N9
A8	B8	C8	D8	E8	F8	G8	H8	I8	J8	K8	L8	M8	N8
A7	B7	C7	D7	E7	F7	G7	H7	I7	J7	K7	L7	M7	N7
A6	B6	C6	D6	E6	F6	G6	H6	I6	J6	K6	L6	M6	N6
A5	B5	C5	D5	E5	F5	G5	H5	I5	J5	K5	L5	M5	N5
A4	B4	C4	D4	E4	F4	G4	H4	I4	J4	K4	L4	M4	N4
A3	B3	C3	D3	E3	F3	G3	H3	I3	J3	K3	L3	M3	N3
A2	B2	C2	D2	E2	F2	G2	H2	I2	J2	K2	L2	M2	N2
A1	B1	C1	D1	E1	F1	G1	H1	I1	J1	K1	L1	M1	N1

Fonte: Autor (2023)

Os mapas de contorno do diâmetro médio do depósito formado nos ensaios da Etapa 3 são apresentados na Figura 72. Nos ensaios desta etapa, a variação do diâmetro médio ocorreu, principalmente, em um raio de, aproximadamente, 100 cm do local em que ocorreu o desconfiamento da corrente de turbidez. A variação no eixo longitudinal ocorreu com menor intensidade quando comparada com a variação do eixo transversal. Nos trechos mais distais do local em que ocorreu o desconfiamento, houve menor variação do diâmetro médio do depósito. O aumento da vazão gerou depósitos com maiores valores do diâmetro médio.

Figura 72 – Mapa de contorno do diâmetro médio do depósito formado nos ensaios da Etapa 3: EA 15 ($Q_{\text{injeção}} = 15 \text{ L.min}^{-1}$); EA 30 ($Q_{\text{injeção}} = 30 \text{ L.min}^{-1}$); EA 45 ($Q_{\text{injeção}} = 45 \text{ L.min}^{-1}$)

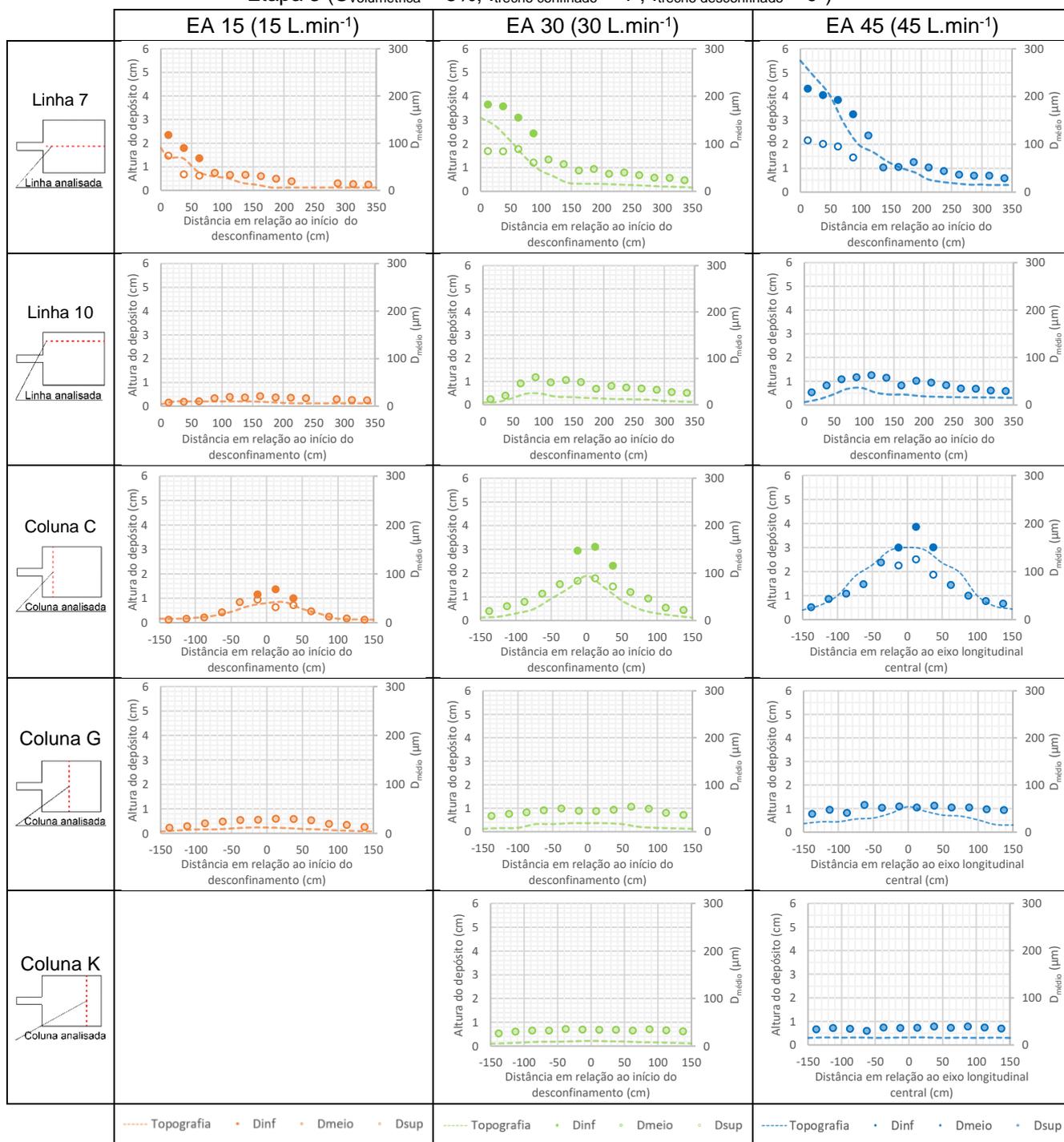


Fonte: Autor (2023)

A variação do diâmetro médio nas linhas 7 e 10 e, nas colunas C, G e K são apresentadas na Figura 73. No EA 15, nos primeiros 60 cm da linha 7, a variação do diâmetro médio entre a camada inferior e superior do depósito foi cerca de 45 μm . Essa variação decresce para 10 μm quando a análise é realizada perpendicularmente nos 25 cm distantes do eixo longitudinal central (coluna C). Diante disso, e da análise da Figura 72, pode-se afirmar que a redução do diâmetro médio foi mais acentuada no eixo perpendicular ao fluxo, o qual apresenta na abscissa 25 cm, velocidade no eixo Y cerca de cinco vezes inferior à velocidade no eixo X. Neste ensaio, não foi possível coletar amostras ao longo de toda a coluna K devido à baixa espessura do depósito.

A variação do diâmetro médio da região inferior e superior do depósito formado no EA 30 foi diminuindo conforme se avança para a jusante. Na região mais proximal do desconfinamento, na linha 7, essa variação do diâmetro médio entre as camadas do depósito foi cerca de 100 μm , enquanto para a distância de 87 cm do início do desconfinamento essa variação foi de aproximadamente 60 μm . Na linha 10, o diâmetro médio do depósito foi de 36,80 μm , com desvio padrão de 13,32 μm . Na coluna C, conforme a análise avança para as locais com maior espessura de depósito, o diâmetro médio das partículas aumenta, apresentando diferença de até 135 μm do diâmetro médio entre o material do ponto central com o mais distal analisado. Nas colunas G e K, o material depositado apresentou diâmetros médio de 43,24 e 32,66 μm e variaram pouco ao longo da coluna, com desvio padrão de 5,8 e 2,4 μm , respectivamente.

Figura 73 - Perfil de distribuição granulométrica ao longo da região desconfiada para os ensaios da Etapa 3 ($C_{volumétrica} = 5\%$; $I_{trecho\ confinado} = 4^\circ$; $I_{trecho\ desconfinado} = 0^\circ$)



Fonte: Autor (2023)

No EA 45 (EB 5/ EC 4), ao longo da linha 7, nos primeiros 100 cm, houve certa constância na variação do diâmetro médio entre a camada inferior e superior, com valor de aproximadamente 100 μm . Na linha 10, o diâmetro médio variou entre 26,23 e 62,34 μm , apresentando desvio padrão de 11,81 μm . Na coluna C, nos trechos em

que o depósito apresentou espessura maior que 2 cm, a variação do diâmetro médio foi de 50 μm . Nesta coluna, a variação do diâmetro médio no eixo central com as extremidades da coluna foi de 167 μm . Já nas colunas G e K, o desvio padrão foi de 5,70 e 2,58 μm , respectivamente.

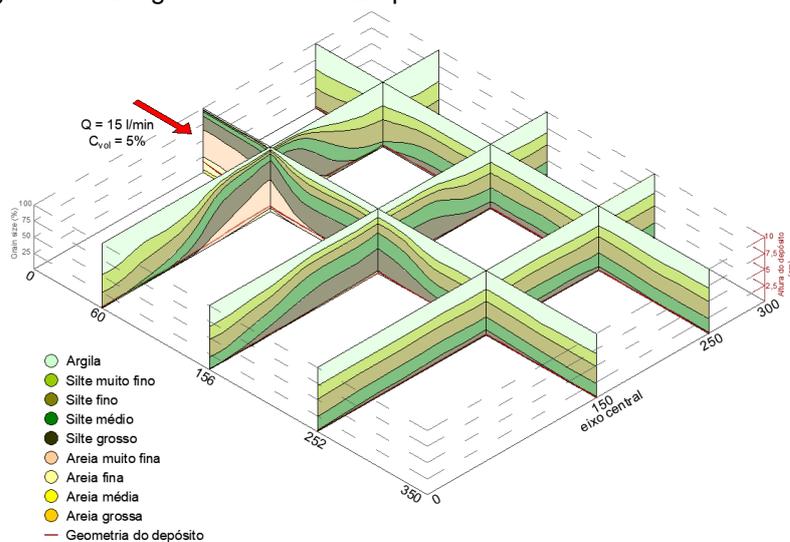
Diante do exposto, nota-se que o aumento de vazão elevou, de maneira geral, o diâmetro médio em todo o depósito da área analisada. Além disso, as regiões com maior espessura de depósito apresentaram os maiores valores do diâmetro médio.

De posse dos dados da Figura 73, relacionou por meio de um diagrama de cerca a dimensão do sedimento com o nome do agregado, utilizando a escala de Wentworth (1922). Estes diagramas são apresentados na Figura 74. Nesta nota-se que o aumento da energia da corrente, devido ao aumento da vazão, teve como consequência o carreamento e acúmulo de partículas com maiores dimensões para regiões mais distais, tanto em relação a direção longitudinal, quanto na transversal.

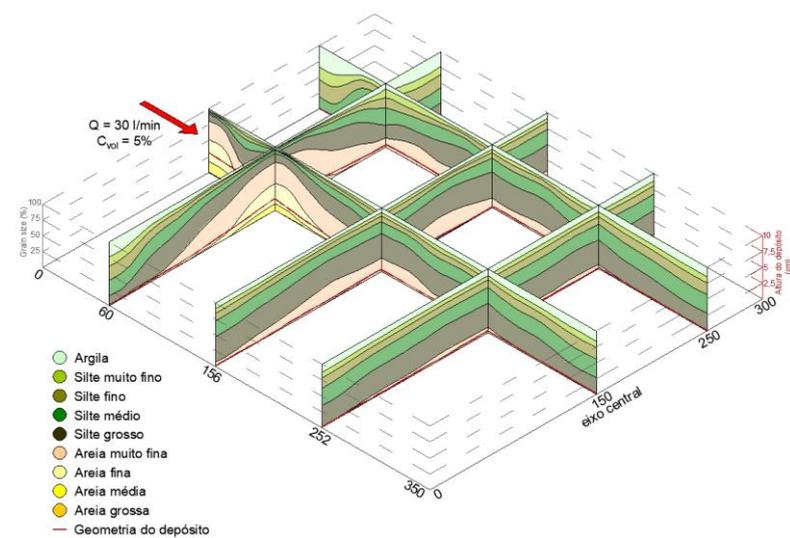
Nos ensaios EA 15, EA 30 e EA 45 (EB 5/ EC 4) observa-se que no eixo longitudinal, as partículas com maiores dimensões (areia média e fina) estão localizadas em sua maioria nos primeiros 60, 120 e 140 cm, respectivamente. Além disso, nota-se que a porcentagem de argila ao longo de todo o trecho analisado, foi inversamente proporcional a vazão.

Figura 74 – Diagrama de cerca: Etapa 3

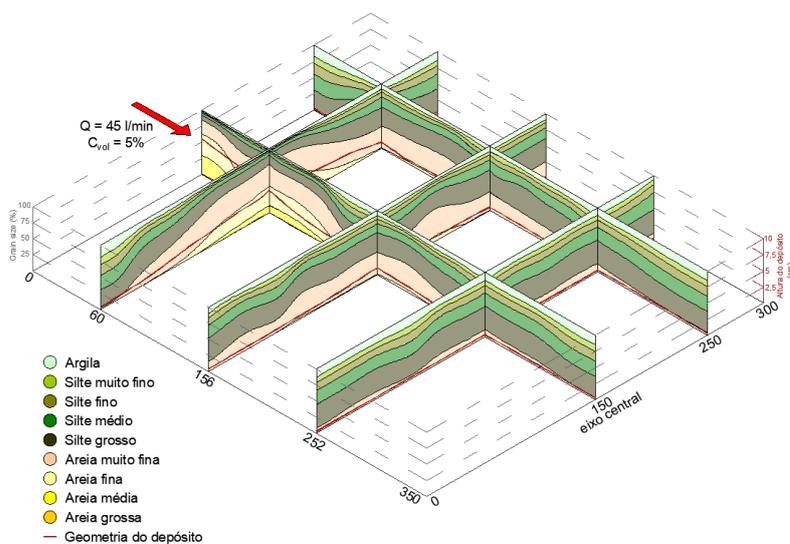
EA 15
 $Q_{\text{injeção}} = 15 \text{ L.min}^{-1}$
 $C_v = 5\%$
 $I_{\text{trecho confinado}} = 4^\circ$
 $I_{\text{trecho desconfinado}} = 0^\circ$



EA 30
 $Q_{\text{injeção}} = 30 \text{ L.min}^{-1}$
 $C_v = 5\%$
 $I_{\text{trecho confinado}} = 4^\circ$
 $I_{\text{trecho desconfinado}} = 0^\circ$



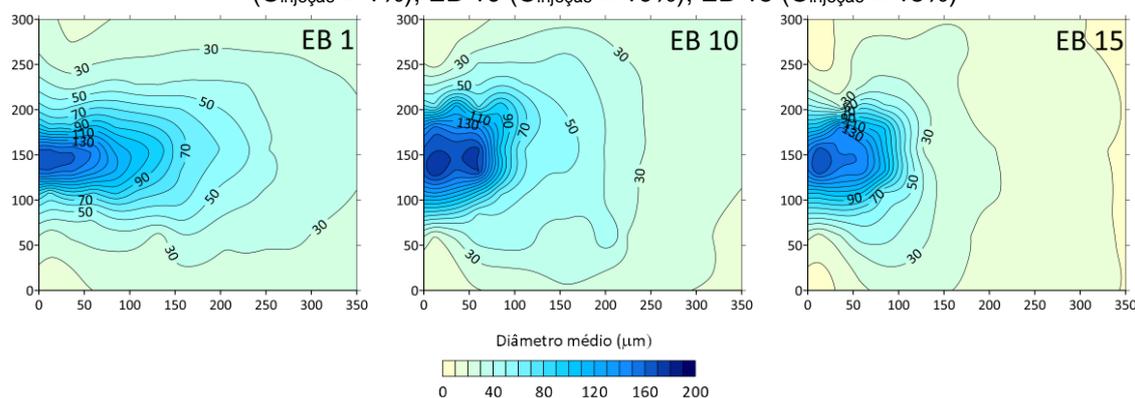
EA 45/ EB 5/ EC 4
 $Q_{\text{injeção}} = 45 \text{ L.min}^{-1}$
 $C_v = 5\%$
 $I_{\text{trecho confinado}} = 4^\circ$
 $I_{\text{trecho desconfinado}} = 0^\circ$



Fonte: Autor (2023)

Os mapas de contorno do diâmetro médio do depósito dos ensaios da Etapa 4 são apresentados na Figura 75. Nesta imagem não foram apresentados os dados do experimento EB 5 (EA 45/ EC 4) pois estes resultados foram apresentados na Figura 72, Figura 73 e Figura 74. Além disso, no EB 5 foi utilizado sedimento com granulometria diferente dos demais ensaios da Etapa 4.

Figura 75 – Mapa de contorno do diâmetro médio do depósito formado nos ensaios da Etapa 4: EB 1 ($C_{\text{injeção}} = 1\%$); EB 10 ($C_{\text{injeção}} = 10\%$); EB 15 ($C_{\text{injeção}} = 15\%$)



Fonte: Autor (2023)

O EB 1 possui menor concentração entre os ensaios com maior vazão ($45 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$) deste trabalho, sendo o experimento que houve maior porcentagem de grãos mais grossos nas regiões mais distais da área analisada. Neste ensaio, no eixo longitudinal central, houve elevada variação do diâmetro médio até a abscissa 250 cm, com desvio padrão de $33,93 \mu\text{m}$. Já no eixo transversal a direção principal da corrente, a variação foi mais acentuada nos 100 cm do eixo central longitudinal.

No ensaio EB 10, a variação do diâmetro médio ocorreu de maneira mais radial, quando comparada ao ensaio EB 1. Nota-se que, para uma mesma abscissa, o diâmetro médio do EB 10 é menor que no experimento EB 1. No EB 10, principal variação do diâmetro médio do depósito no eixo longitudinal central ocorreu até a abscissa 150 cm. No eixo transversal a direção principal do fluxo, essa variação do diâmetro médio do depósito ocorreu nos 100 cm paralelos ao eixo central longitudinal, assim como no EB 1.

No ensaio EB 15 a variação do diâmetro médio ocorreu de maneira ainda mais radial entre os ensaios da referida etapa. A principal variação da granulometria ocorreu nos primeiros 150 cm, em relação ao início do desconfinamento. Quando comparado com outros ensaios da Etapa 4 e que usaram o mesmo material, o

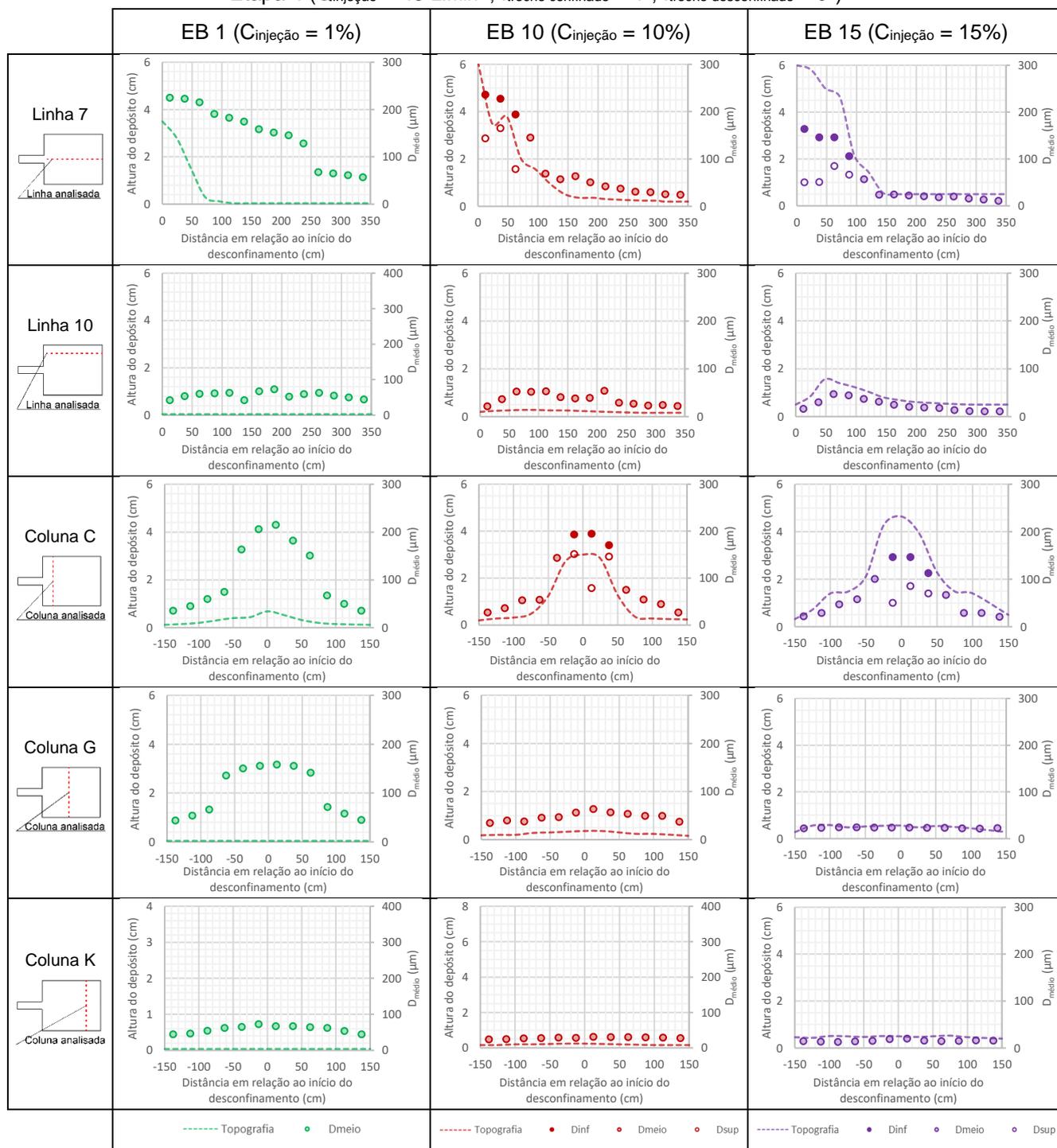
experimento EB 15 foi o que apresentou menor diâmetro médio, para uma mesma abscissa, principalmente nos trechos distais ao início do desconfinamento.

Diante do exposto, há duas possibilidades para a menor porcentagem de grãos mais grossos na região desconfinada, conforme se elevou a concentração da mistura. A primeira hipótese é que o aumento da concentração pode ter reduzido a competência da corrente em carrear grãos maiores para as regiões mais distais e, a segunda hipótese, é que os grãos de maiores granulometrias podem ter ficado retidos na região lateral do extravasamento, no trecho confinado, material este não analisado.

Na Figura 76 é apresentada a variação granulométrica no depósito formado nas linhas 7 e 10 e, nas colunas C, G e K do ensaio da Etapa 4. No EB 1, ao longo da linha 7, a diferença entre o diâmetro médio nos primeiros 250 cm em relação ao início do desconfinamento foi inferior a 100 μm , com desvio padrão de 34 μm . Após os primeiros 250 cm, o diâmetro médio desta linha foi de 62,44 μm e se mostrou mais homogêneo, com desvio padrão inferior a 5 μm . Já na linha 10, ao longo de toda sua extensão, o diâmetro médio foi de 55,58 μm e o desvio padrão foi de 9 μm , indicando assim baixa variação do tamanho do sedimento que compõe o depósito. Nas colunas C e G, mesmo com o depósito máximo inferior a 1 cm, a variação do diâmetro médio entre o eixo central e as extremidades foi superior a 110 μm . Assim como na linha 10, na coluna K o desvio padrão da variação do diâmetro médio foi de 9 μm , indicando assim baixa variação do tamanho do sedimento que compõe o depósito (diâmetro médio de 58,71 μm).

No EB 10, no eixo longitudinal central (linha 7), a diferença do diâmetro médio entre a região proximal e distal, em relação ao início do desconfinamento, foi superior a 200 μm . Após a abscissa 100 cm, o diâmetro médio do depósito foi 39,99 μm e apresentou desvio padrão de 14,26 μm . Na linha 10, o diâmetro médio do depósito foi de 36,34 μm e apresentou desvio padrão de 12,47 μm . Na coluna C, o diâmetro médio apresentou alta variação, com valores entre 193,91 μm (eixo central) até 26,45 (extremidade). Nas colunas G e K, o diâmetro médio e desvio padrão do depósito foram de 47,52 e 28,11 μm e, 8 e 2 μm , respectivamente. Com estes valores, nota-se a homogeneidade dos grãos depositados nestas duas colunas.

Figura 76 - Perfil de distribuição granulométrica ao longo da região desconfiada para os ensaios da Etapa 4 ($Q_{injeção} = 45 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$; $I_{trecho\ confinado} = 4^\circ$; $I_{trecho\ desconfinado} = 0^\circ$)



Fonte: Autor (2023)

No EB 15, após a abscissa 100 cm, nota-se certa homogeneidade no tamanho dos grãos ao longo da linha 7, cujo diâmetro médio foi de $18,47 \mu\text{m}$, apresentando desvio padrão de $12 \mu\text{m}$. Nesta linha, à medida que se avança para jusante, a diferença entre o diâmetro médio entre as camadas do depósito foi reduzindo. Imediatamente após o desconfiamento, essa diferença foi de $113 \mu\text{m}$, enquanto que,

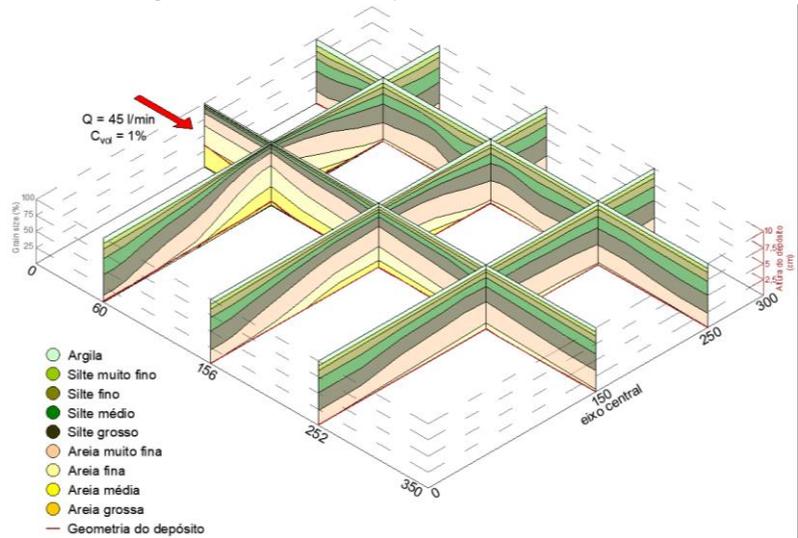
para abscissa 80 cm, a diferença foi de 40 μm . Na linha 10, o diâmetro médio do depósito foi inferior a 50 μm e apresentou desvio padrão de 12 μm , indicando baixa variação do material depositado, uma vez que esta linha apresenta 350 cm de extensão. Na coluna C, a variação do diâmetro médio ocorreu principalmente nas redondezas do eixo central, local este em que a altura do depósito supera os 4 cm. Nesta região, a diferença do diâmetro médio ao longo da espessura foi superior a 40 μm . Nas colunas G e K o material depositado apresentou diâmetro médio inferior a 30 μm , indicando presença predominante de silte e argila.

Na Figura 77 são apresentados os diagramas de cerca do ensaio da Etapa 4. Nesta imagem, o EB 1 foi o único em que as frações mais finas de areia alcançaram toda a área analisada, indicando que a corrente de turbidez apresentou a maior competência para carrear os grãos maiores para as regiões distais. Neste ensaio a porcentagem de argila na área analisada foi a menor entre os ensaios.

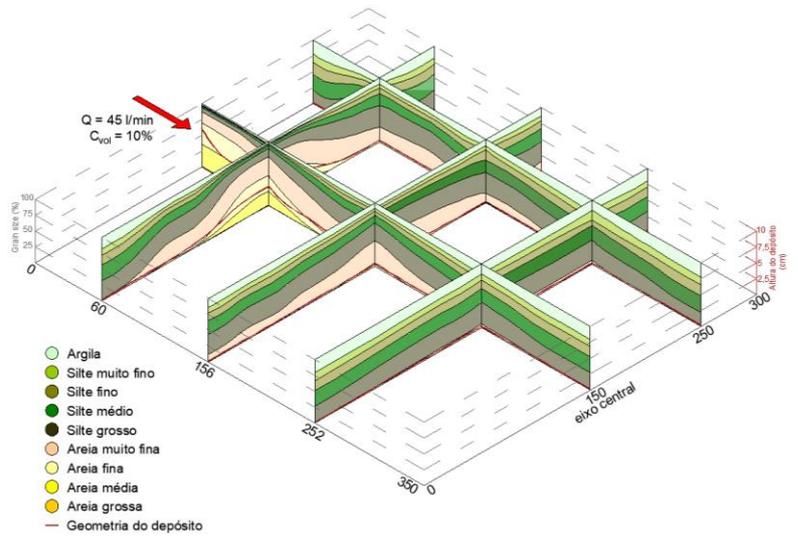
No diagrama de cerca do experimento EB 10 e EB 15 nota-se uma maior porcentagem de argila e silte muito fino e fino nas regiões mais distais do desconfinamento, quando comparado ao ensaio EB 1. Com isso, observa-se que com a elevação da concentração, o escoamento apresentou redução da competência para transportar grãos maiores a frente. Isso fica evidente na Figura 77, uma vez que a areia grossa e média alcançou apenas as regiões mais próximas ao desconfinamento.

Figura 77 – Diagrama de cerca: Etapa 4

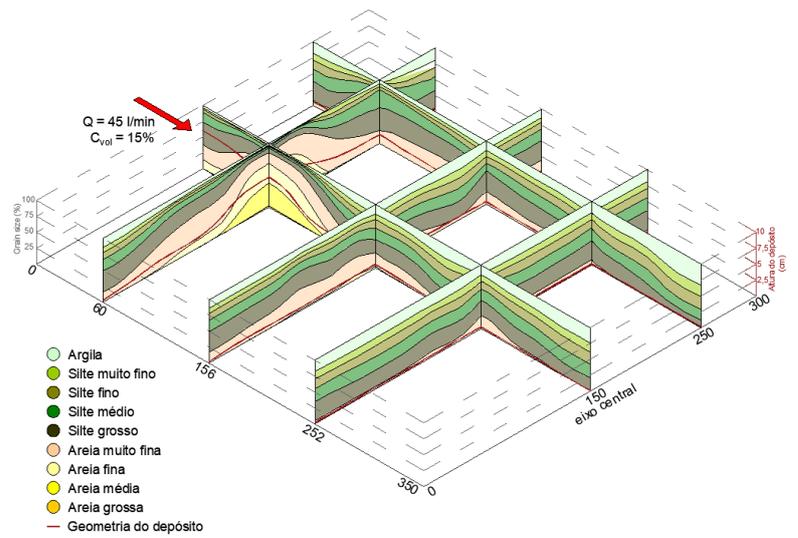
EB 1
 $Q_{injeção} = 45 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$
 $C_v = 1\%$
 $I_{trecho\ confinado} = 4^\circ$
 $I_{trecho\ desconfinado} = 0^\circ$



EB 10
 $Q_{injeção} = 45 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$
 $C_v = 10\%$
 $I_{trecho\ confinado} = 4^\circ$
 $I_{trecho\ desconfinado} = 0^\circ$



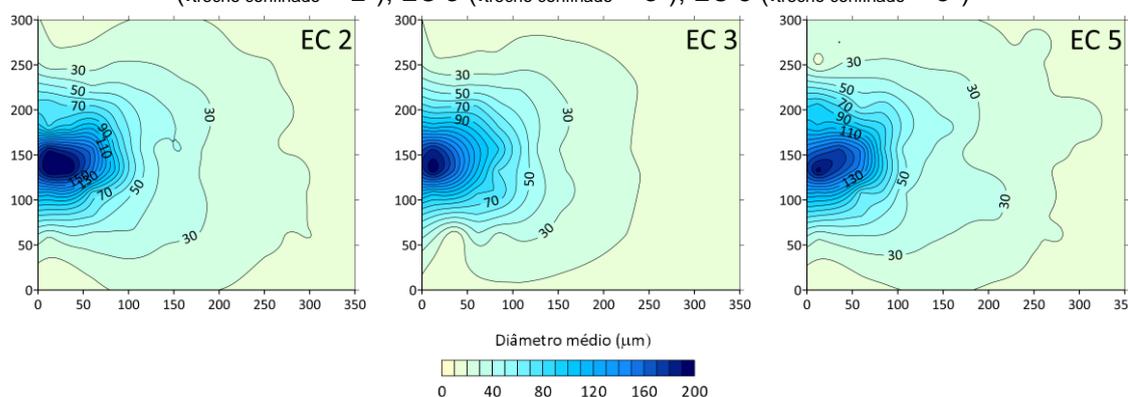
EB 15
 $Q_{injeção} = 45 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$
 $C_v = 15\%$
 $I_{trecho\ confinado} = 4^\circ$
 $I_{trecho\ desconfinado} = 0^\circ$



Fonte: Autor (2023)

Na Figura 78 é apresentado o mapa de contorno do diâmetro médio do depósito dos ensaios da Etapa 5. Nestes experimentos nota-se que o diâmetro médio atinge valores mais altos, principalmente nos primeiros 50 cm em relação ao início do desconfinamento e, após essa distância, o diâmetro médio decresce até atingir valores próximos de 10 μm na região mais distal do trecho avaliado. A redução do diâmetro médio ocorreu de maneira mais acentuada no eixo perpendicular à direção principal do fluxo. Ainda nesta imagem, nota-se que houve baixa influência no depósito quando alterada a declividade de fundo do canal confinado em 1°.

Figura 78 – Mapa de contorno do diâmetro médio do depósito formado nos ensaios da Etapa 5: EC 2 (Itrecho confinado = 2°); EC 3 (Itrecho confinado = 3°); EC 5 (Itrecho confinado = 5°)



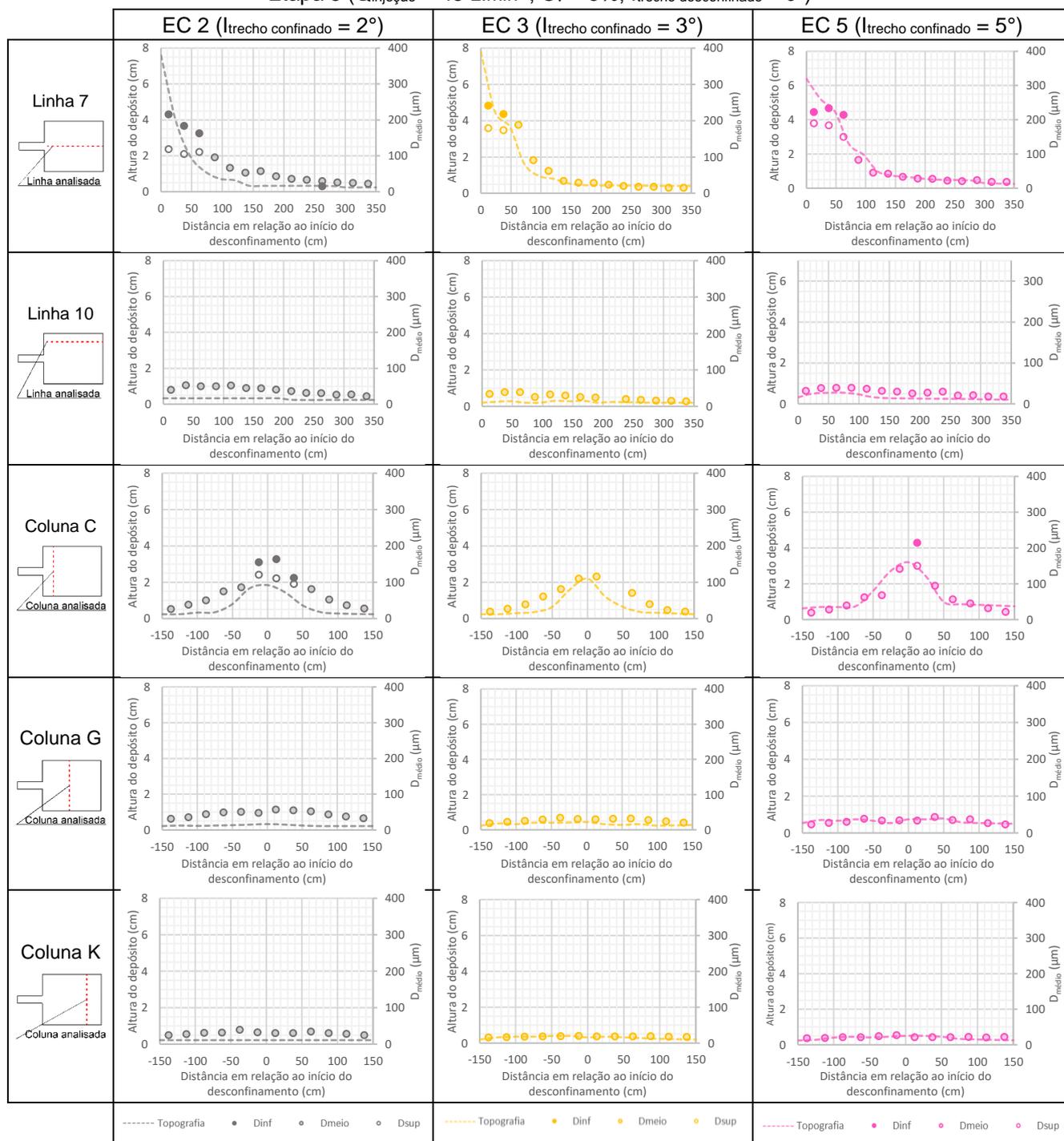
Fonte: Autor (2023)

Na Figura 79 é apresentada a variação da granulometria ao longo das linhas 7 e 10 e, nas colunas C, G e K. Nos ensaios EC 2, EC 3 e EC 5, no eixo longitudinal central (linha 7), o depósito apresentou maior diâmetro médio nos primeiros 100 cm em relação ao início do desconfinamento. Após essa distância, o diâmetro médio foi de 36,01; 22,49 e; 25,93 μm , com desvio padrão de 12,51; 6,87 e; 10 μm para os experimentos EC 2, EC 3 e EC 5, respectivamente. No eixo longitudinal lateral (linha 10), o diâmetro médio das partículas depositadas foi de 39,10; 25,43 e; 28,96 μm com desvio padrão de 10,29; 8,86 e; 7,75 μm para os ensaios EC 2, EC 3 e EC 5, respectivamente.

Ainda na Figura 79, a variação do diâmetro médio na coluna C ocorreu de maneira crescente, à medida que se aproxima do eixo longitudinal central. Nesta coluna, a diferença entre o diâmetro médio entre a camada inferior e superior apresentou valor de até 52 e 64 μm para o ensaio EC 2 e EC 5, respectivamente. No experimento EC 3, não foi realizada a análise granulométrica em diferentes alturas do

depósito na coluna C. Nas colunas G e K o material depositado apresentou baixa variação do diâmetro médio, cujo valor foi inferior a 45 μm , e o desvio padrão de 9, 5, e 6 μm e 4, 1, e 2 μm , para os ensaios EC 2, EC 3 e EC 4, respectivamente.

Figura 79 - Perfil de distribuição granulométrica ao longo da região desconfiada para os ensaios da Etapa 5 ($Q_{\text{injeção}} = 45 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$; $C_v = 5\%$; $l_{\text{trecho desconfinado}} = 0^{\circ}$)

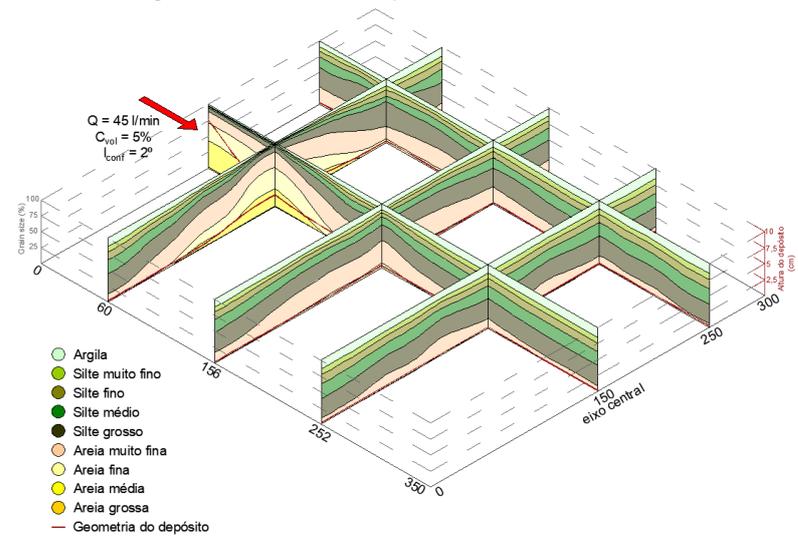


Fonte: Autor (2023)

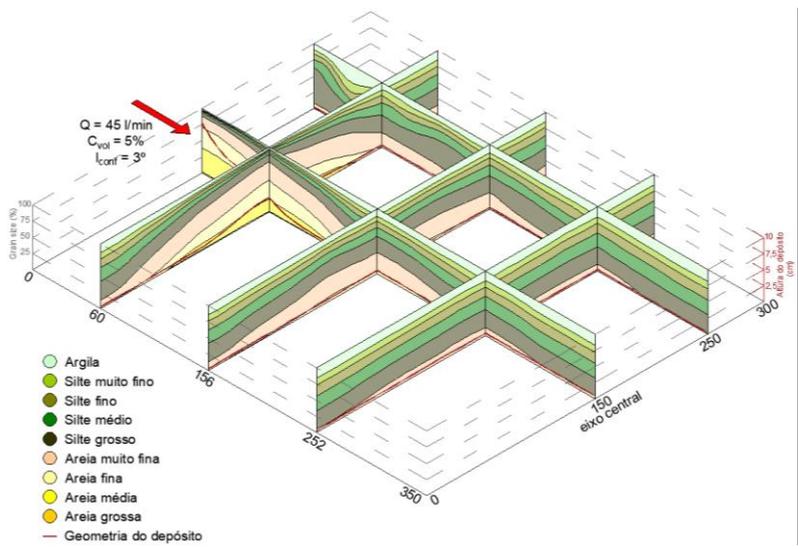
Os diagramas de cerca dos ensaios da Etapa 5 são apresentados na Figura 80. De maneira geral, os diagramas dos ensaios EC 2, EC 3 e EC 5 se assemelham, em relação à presença das partículas com maiores dimensões (areia grossa, média e fina), predominantemente na região do entorno do desconfinamento, com baixa e/ou nenhuma porcentagem destas granulometrias nas extremidades. Nas regiões mais distais da área analisada, houve domínio dos materiais com menores granulometrias, ou seja, silte e argila. Diante dessas observações, nota-se que variações de pequenas magnitudes nas declividades do fundo dos canais confinados ocasionam pouca influência na distribuição espacial das partículas.

Figura 80 – Diagrama de cerca: Etapa 5

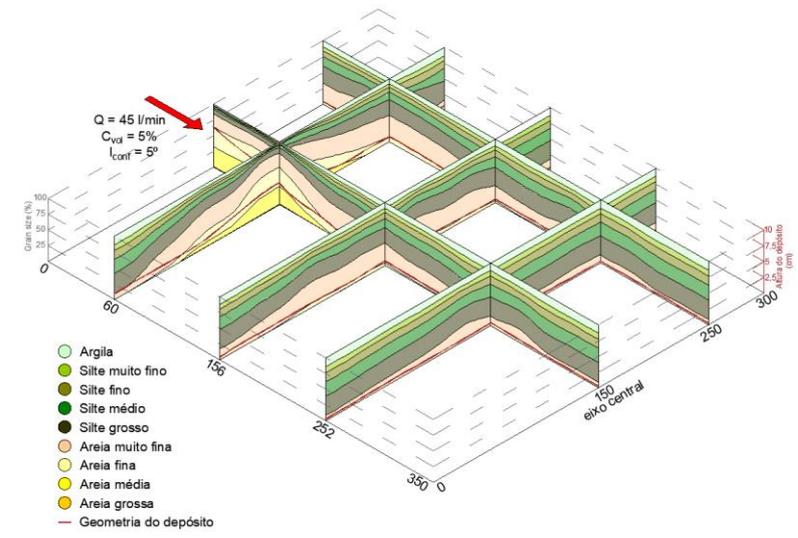
EC 2
 $Q_{injeção} = 45 \text{ L.min}^{-1}$
 $C_v = 1\%$
 $l_{trecho\ confinado} = 2^\circ$
 $l_{trecho\ desconfinado} = 0^\circ$



EC 3
 $Q_{injeção} = 45 \text{ L.min}^{-1}$
 $C_v = 10\%$
 $l_{trecho\ confinado} = 3^\circ$
 $l_{trecho\ desconfinado} = 0^\circ$



EC 5
 $Q_{injeção} = 45 \text{ L.min}^{-1}$
 $C_v = 15\%$
 $l_{trecho\ confinado} = 5^\circ$
 $l_{trecho\ desconfinado} = 0^\circ$

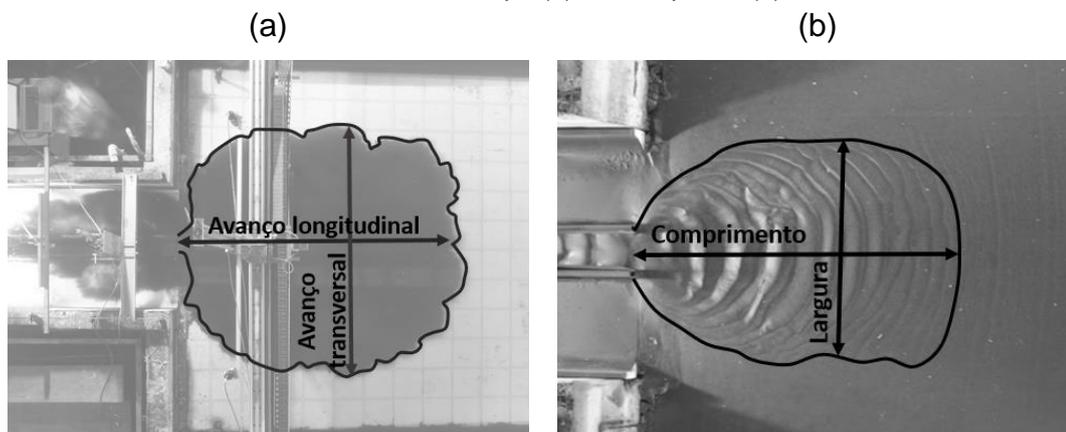


Fonte: Autor (2023)

8.12 FATOR DE FORMA DO AVANÇO DA CORRENTE E DO DEPÓSITO

Com base no registro fotográfico do desenvolvimento da corrente de turbidez após o desconfinamento, foi possível medir o avanço longitudinal e transversal em diferentes intervalos de tempos com o propósito de verificar a forma geométrica do avanço da corrente. A relação entre o avanço longitudinal (C) e o transversal (L) foi denominado de fator de forma da corrente (FFC). Através das imagens do depósito formado, mediu-se o comprimento (C) e a largura (L), adotando o último lobo visível do depósito como referência, para determinar o fator de forma do depósito (FFD). As medições realizadas das componentes necessárias para determinação do FFC e FFD foram realizadas no programa Autocad. Quanto mais próximo o valor fator de forma for de um, mais arredondo é a forma de expansão da corrente ensaiada e do depósito gerado. Na Figura 81 é apresentado um exemplo de medição do comprimento e da largura do avanço da corrente de turbidez (a) e do depósito (b).

Figura 81 – Representação esquemática do comprimento e largura da corrente de turbidez em um determinado tempo (a) e do depósito (b)



Fonte: Autor (2023)

Os valores das medições do avanço longitudinal e transversal da corrente de turbidez ao longo do tempo são apresentados na Tabela 17. De posse das medidas do comprimento e da largura da corrente, essas medidas foram representadas em gráficos, com o objetivo de verificar uma possível relação entre o comprimento e largura (Figura 82). Nesta imagem foram adicionadas linhas de tendência e verificou-se que há uma relação do tipo linear entre o comprimento e a largura da corrente.

Tabela 17 – Medidas longitudinais e transversais da expansão da corrente de turbidez ao longo do tempo

E10 ($Q_{\text{injeção}} = 10 \text{ L.min}^{-1}$; $C_v = 5\%$; $l_{\text{trecho confinado}} = 4^{\circ}$; $l_{\text{trecho desconfinado}} = 4^{\circ}$)											
T (s)	10	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
C (cm)	37	121	167	202	233	265	310	350	386	400	433
L (cm)	30	77	99	109	132	154	188	207	235	243	266
FFC	1,23	1,57	1,69	1,85	1,77	1,72	1,65	1,69	1,64	1,65	1,63
E30 ($Q_{\text{injeção}} = 30 \text{ L.min}^{-1}$; $C_v = 5\%$; $l_{\text{trecho confinado}} = 4^{\circ}$; $l_{\text{trecho desconfinado}} = 4^{\circ}$)											
T (s)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
C (cm)	24	57	93	143	162	196	200	214	236	255	291
L (cm)	36	64	89	132	148	168	188	206	224	239	267
FFC	0,67	0,90	1,04	1,08	1,09	1,17	1,06	1,04	1,05	1,07	1,09
E40 ($Q_{\text{injeção}} = 40 \text{ L.min}^{-1}$; $C_v = 5\%$; $l_{\text{trecho confinado}} = 4^{\circ}$; $l_{\text{trecho desconfinado}} = 4^{\circ}$)											
T (s)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
C (cm)	48	75	126	155	174	198	219	241	259	276	293
L (cm)	62	94	126	145	170	188	209	236	240	283	302
FFC	0,77	0,80	1,00	1,07	1,02	1,05	1,05	1,02	1,08	0,98	0,97
EA 15 ($Q_{\text{injeção}} = 15 \text{ L.min}^{-1}$; $C_v = 5\%$; $l_{\text{trecho confinado}} = 4^{\circ}$; $l_{\text{trecho desconfinado}} = 0^{\circ}$)											
T (s)	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
C (cm)	126	158	174	201	228	238	263	269	285	297	312
L (cm)	117	143	168	189	208	222	237	252	266	278	292
FFC	1,08	1,10	1,04	1,06	1,10	1,07	1,11	1,07	1,07	1,07	1,07
EA 30 ($Q_{\text{injeção}} = 30 \text{ L.min}^{-1}$; $C_v = 5\%$; $l_{\text{trecho confinado}} = 4^{\circ}$; $l_{\text{trecho desconfinado}} = 0^{\circ}$)											
T (s)	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
C (cm)	86	109	147	159	184	208	223	251	277	296	337
L (cm)	89	107	141	153	174	197	215	235	266	283	305
FFC	0,97	1,02	1,04	1,04	1,06	1,06	1,04	1,07	1,04	1,05	1,10
EA 45/ EB 5 / EC 4 ($Q_{\text{injeção}} = 45 \text{ L.min}^{-1}$; $C_v = 5\%$; $l_{\text{trecho confinado}} = 4^{\circ}$; $l_{\text{trecho desconfinado}} = 0^{\circ}$)											
T (s)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
C (cm)	33	76	107	136	163	192	215	248	268	287	303
L (cm)	52	85	110	133	159	191	216	242	265	287	307
FFC	0,63	0,89	0,97	1,02	1,03	1,01	1,00	1,02	1,01	1,00	0,99
EB 1 ($Q_{\text{injeção}} = 45 \text{ L.min}^{-1}$; $C_v = 1\%$; $l_{\text{trecho confinado}} = 4^{\circ}$; $l_{\text{trecho desconfinado}} = 0^{\circ}$)											
T (s)	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75
C (cm)	97	117	135	149	166	179	190	203	213	228	242
L (cm)	102	114	128	138	150	164	177	188	202	214	220
FFC	0,95	1,03	1,05	1,08	1,11	1,10	1,09	1,08	1,05	1,07	1,10

EB 10 ($Q_{\text{injeção}} = 45 \text{ L.min}^{-1}$; $C_v = 10\%$; $l_{\text{trecho confinado}} = 4^0$; $l_{\text{trecho desconfinado}} = 0^0$)											
T (s)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
C (cm)	35	72	103	140	167	176	197	217	235	249	258
L (cm)	44	71	100	138	164	172	196	210	232	243	255
FFC	0,80	1,01	1,03	1,01	1,02	1,02	1,01	1,03	1,01	1,02	1,01

EB 15 ($Q_{\text{injeção}} = 45 \text{ L.min}^{-1}$; $C_v = 15\%$; $l_{\text{trecho confinado}} = 4^0$; $l_{\text{trecho desconfinado}} = 0^0$)											
T (s)	5	10	15	20	25	30	35	40			
C (cm)	44	96	138	174	206	235	262	285			
L (cm)	54	84	122	164	202	235	270	302			
FFC	0,81	1,14	1,13	1,06	1,02	1,00	0,97	0,94			

EC 2 ($Q_{\text{injeção}} = 45 \text{ L.min}^{-1}$; $C_v = 5\%$; $l_{\text{trecho confinado}} = 2^0$; $l_{\text{trecho desconfinado}} = 0^0$)											
T (s)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
C (cm)	44	77	100	125	148	172	190	207	226	242	254
L (cm)	57	83	101	121	147	169	196	217	238	260	277
FFC	0,77	0,93	0,99	1,03	1,01	1,02	0,97	0,95	0,95	0,93	0,92

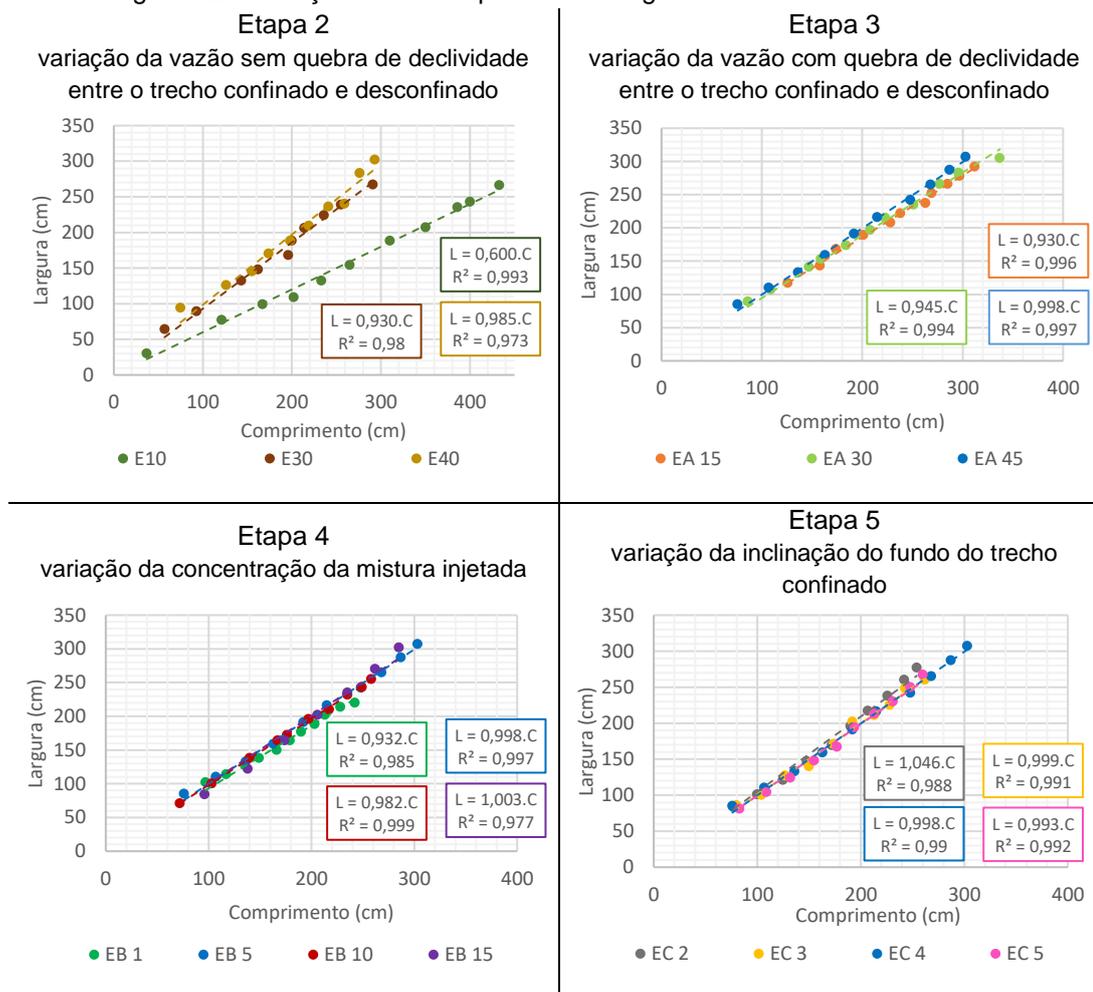
EC 3 ($Q_{\text{injeção}} = 45 \text{ L.min}^{-1}$; $C_v = 5\%$; $l_{\text{trecho confinado}} = 3^0$; $l_{\text{trecho desconfinado}} = 0^0$)											
T (s)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
C (cm)	39	80	104	127	150	174	192	213	228	243	262
L (cm)	48	86	100	127	140	171	202	211	225	248	260
FFC	0,81	0,93	1,04	1,00	1,07	1,02	0,95	1,01	1,01	0,98	1,01

EC 5 ($Q_{\text{injeção}} = 45 \text{ L.min}^{-1}$; $C_v = 5\%$; $l_{\text{trecho confinado}} = 5^0$; $l_{\text{trecho desconfinado}} = 0^0$)											
T (s)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
C (cm)	52	83	109	132	155	177	194	213	231	248	260
L (cm)	62	81	104	124	148	167	194	213	230	250	267
FFC	0,84	1,02	1,05	1,06	1,05	1,06	1,00	1,00	1,00	0,99	0,97

Legenda: C = medida longitudinal; L = medida transversal

Fonte: Autor (2023)

Figura 82 – Relação entre comprimento e largura da corrente de densidade



Fonte: Autor (2023)

Através das equações das linhas de tendências da Figura 82, o fator de forma médio da corrente, ao longo do tempo, foi calculado através do inverso do coeficiente angular. Estes fatores de forma são apresentados na Tabela 18, na qual é possível observar que para os ensaios com a mesma vazão (EA 45, EB 1, EB 10, EB 15, EC 2, EC 3, EC 5) a variação do FFC foi inferior a 6%. Embora os valores do FFC sejam parecidos, notou-se que nos ensaios das etapas 2 e 3, com acréscimo da vazão, o FFC se aproxima de um, ou seja, mais arredondado ficou o avanço da corrente. Nos ensaios da Etapa 4, o incremento da concentração ocasionou correntes com maiores avanços longitudinais frente aos transversais, ou seja, os valores dos FFCs foram ficando maiores que um, conforme aumentou-se a concentração. Contudo, o ensaio EB 1 apresentou comportamento divergente dos demais ensaios da referida etapa, visto que, embora possua a menor concentração volumétrica, apresentou o maior FFC entre todos os ensaios cuja vazão foi 45 L.min⁻¹. Já para os ensaios da Etapa 5, à

medida que aumentou-se a inclinação do fundo do canal confinado, mais próximo de um ficou o FFC, ou seja, mais arredondado ficou o avanço da corrente de turbidez.

Tabela 18 – Fator de forma da corrente

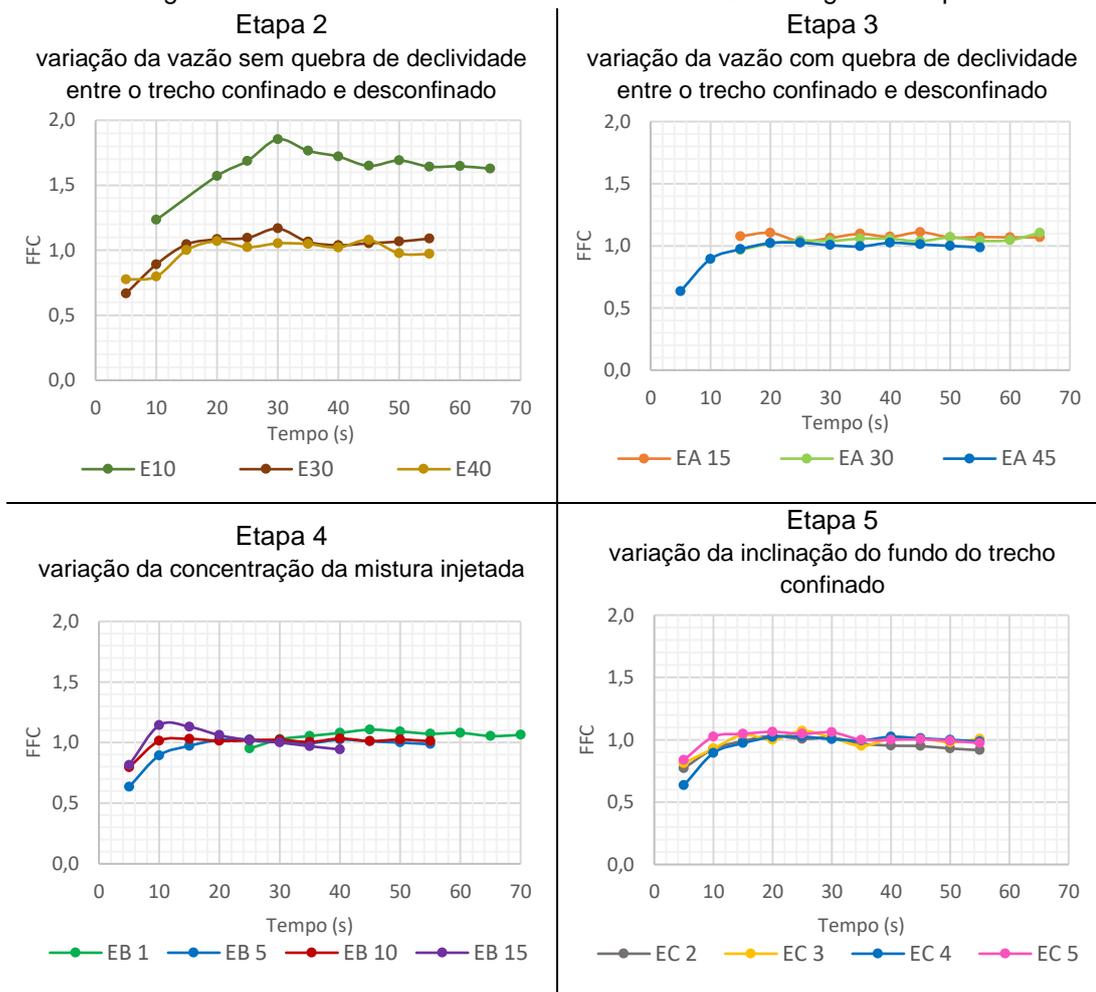
Etapa	Ensaio	FFC
2	E10	1,69
	E30	1,06
	E40	1,00
3	EA 15	1,08
	EA 30	1,04
	EA 45*/EB 5/ EC 4	0,99
4	EB 1	1,06
	EB 10	1,02
	EB 15	1,04
5	EC 2	0,97
	EC 3	0,98
	EC 5	1,00

* O ensaio EA 45 também pertence as etapas 4 e 5.

Fonte: Autor (2023)

Diante desses dados da Tabela 18, observa-se que o FFC apresentou maiores variações quando a vazão foi alterada. Quando analisada a variação do fator de forma da corrente de turbidez em função do tempo, observa-se que, nos primeiros 15 segundos, a expansão da corrente de turbidez ocorre de forma mais achatada e, após este tempo, há estabilização/equilíbrio da geometria de expansão (Figura 83). Para a vazão acima de $30 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ (ensaios E30 e E40, EA 30, EA 45, EB 1, EB 10, EB 15, EC 2, EC 3, EC 5) e de 15 segundos de ensaio, os experimentos apresentaram FFC próximo a um. O E10 foi o único ensaio no qual o FFC apresentou expansão predominantemente longitudinal, com valor próximo a 1,6 a partir dos 20 segundos de ensaio.

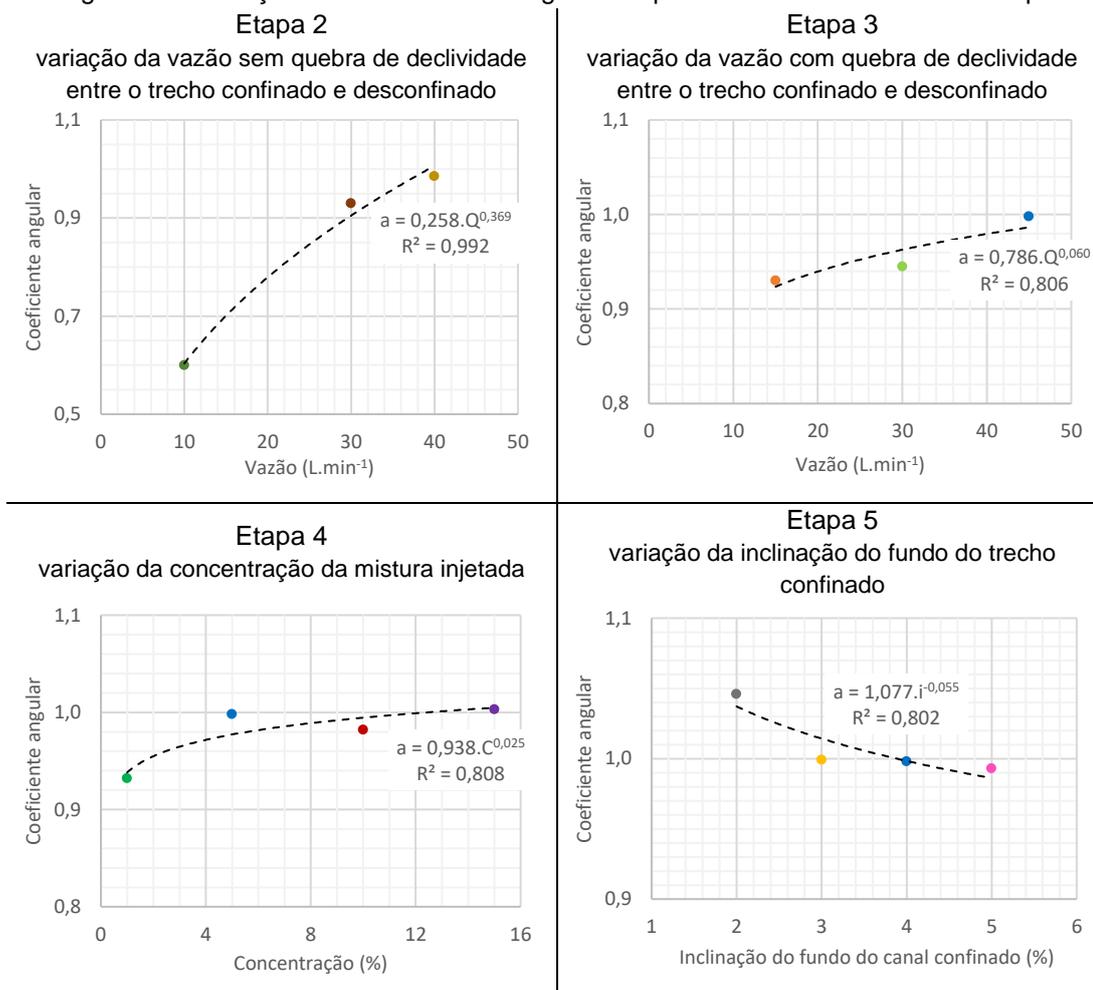
Figura 83 – Fator de forma da corrente de turbidez ao longo do tempo



Fonte: Autor (2023)

Visando obter uma equação que represente todos os ensaios realizados de uma mesma etapa, relacionando os parâmetros vazão, concentração e declividade de fundo do canal confinado com fator de forma da corrente, plotou-se os coeficientes angulares de cada linha de tendência da relação FFC (Figura 82) *versus* o parâmetro variado em cada etapa, conforme Figura 84.

Figura 84 – Relação entre coeficiente angular e o parâmetro variante de cada etapa



Fonte: Autor (2023)

As tendências que relacionam o comprimento e a largura do depósito formado são todas lineares (Figura 82), ou seja, $y = a \cdot x + b$, com $b = 0$ e 'a' variando em função do ensaio realizado. Através da relação entre os coeficientes angulares e o parâmetro variado pode-se criar, para cada etapa, uma equação única que represente a relação entre as medidas longitudinais e transversais dos depósitos. Diante disso, o fator de forma da corrente pode ser obtido conforme equações seguintes.

$$L = [0,258 \cdot Q_{\text{injeção}}^{0,369}] \cdot C_v \quad \text{Etapa 2}^8$$

$$L = [0,786 \cdot Q_{\text{injeção}}^{0,060}] \cdot C_v \quad \text{Etapa 3}^9$$

$$L = [0,938 \cdot C_v^{0,025}] \cdot C_v \quad \text{Etapa 4}$$

⁸ Equação obtida em condições sem quebra de declividade entre as regiões confinada e desconfinada.

⁹ Equação obtida em condições com quebra de declividade entre as regiões confinada e desconfinada.

$$L = [1,077.i^{-0,055}]. C_v$$

Etapa 5

Onde:

L é a largura da expansão da corrente de turbidez (cm)

$Q_{\text{injeção}}$ é a vazão de injeção da mistura de água e carvão ($L \cdot \text{min}^{-1}$)

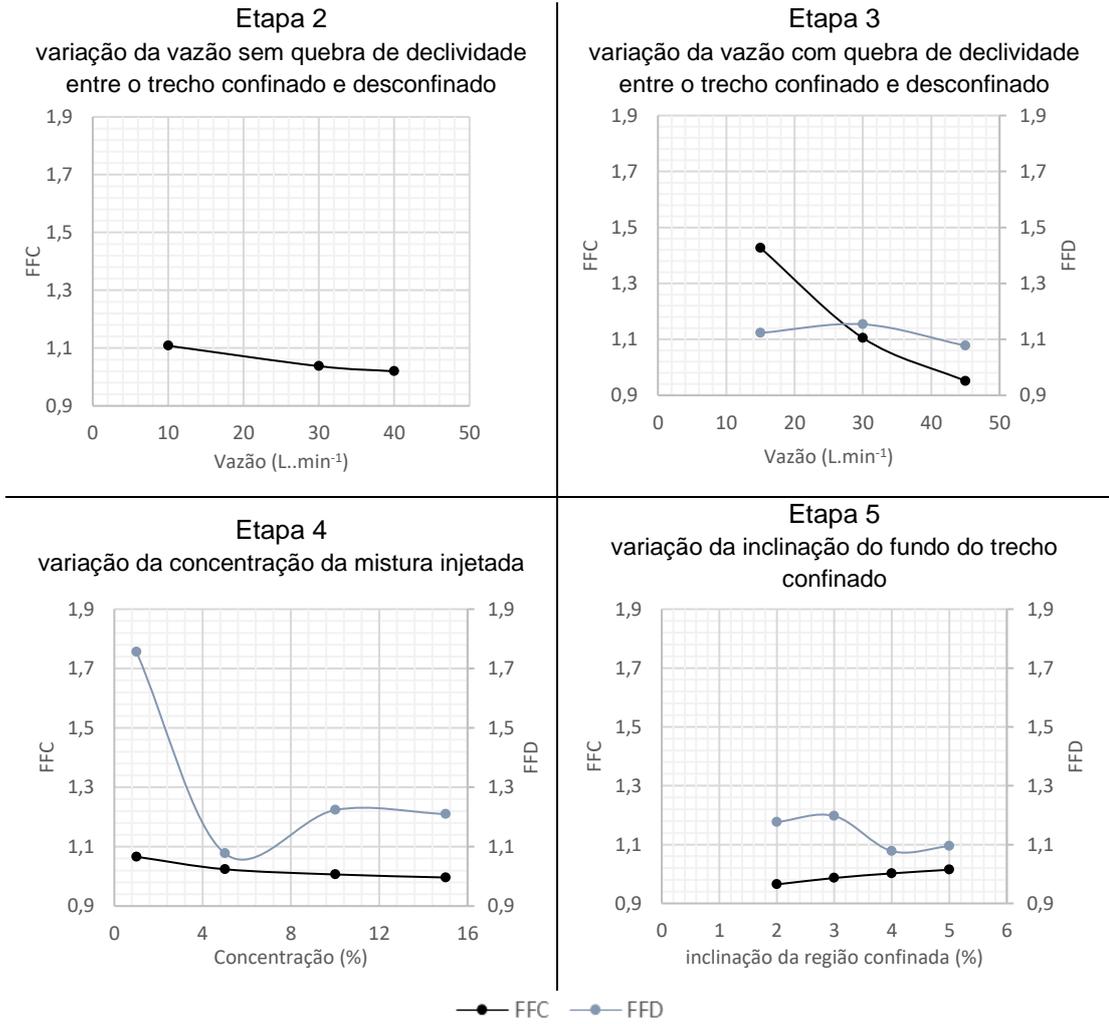
C_v é a concentração volumétrica da mistura de água e carvão (%)

$i_{\text{trecho confinado}}$ é a inclinação do fundo do canal confinado (%)

C é o comprimento da expansão da corrente (cm)

Após a conclusão dos ensaios e a secagem do depósito gerado, identificou-se o último o lobo externo e mediu-se o comprimento e largura, conforme representado na Figura 81 (b). Através da relação destas medidas obteve-se o fator de forma do depósito (FFD). Visando avaliar a existência de alguma relação do FFD e FFC com o parâmetro variado em cada etapa, elaborou-se a Figura 85. Através dos ensaios realizados, não foi possível notar comportamentos semelhantes entre estes fatores de forma e os parâmetros de vazão, concentração e inclinação do leito da região confinada.

Figura 85 – Relação do FFC com os parâmetros variantes de cada etapa



Fonte: Autor (2023)

9 AVANÇO NO ESTADO DA ARTE

Por meio da modelagem física em um tanque tridimensional de geometria simplificada este estudo foi capaz de avaliar o quanto a caracterização hidrodinâmica é influenciada pela quebra de declividade entre um canal confinado e uma bacia (etapas 2 e 3), mudança da vazão de injeção (etapas 2 e 3), variação da concentração da corrente de turbidez (Etapa 4) e alteração da inclinação do leito do canal confinado (Etapa 5). A fim de relacionar os referidos parâmetros com as correntes de turbidez, este tópico será dividido em modelos de fluxo-depósito dos lobos turbidíticos e, também, será proposto uma metodologia para estimar a distância percorrida pelas partículas. Esta distância, aqui chamada de alcance (longitudinal e transversal), poderá ser estimada para diferentes frações granulométricas e, por meio de um diagrama que relaciona as características do fluxo (vazão, velocidade de cisalhamento e diâmetro médio do grão), torna possível estimar o fator de forma do depósito. Com isso, será possível caracterizar a maneira como ocorre a distribuição dos grãos nos lobos turbidíticos, através dos efeitos hidrodinâmicos do fluxo.

9.1 MODELOS DE FLUXO-DEPÓSITO DOS LOBOS TURBIDÍTICOS

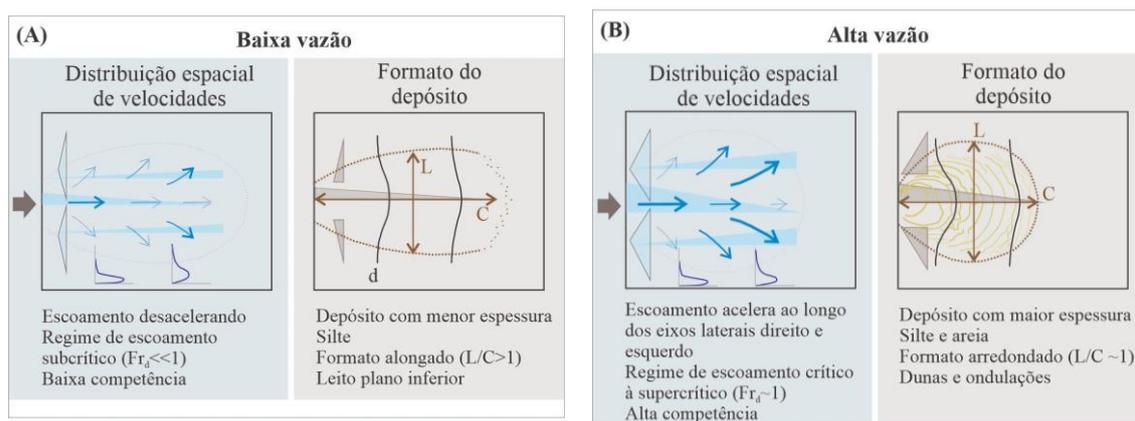
Ao longo dos nove ensaios realizados neste trabalho foi possível distinguir dois grupos de comportamento hidrodinâmico da corrente de turbidez e do depósito formado (lobos). O primeiro grupo contempla os ensaios que foram realizados sem quebra de declividade entre a região confinada e desconfiada (Etapa 2). Já o segundo grupo abriga os ensaios em que houve mudança de declividade entre os trechos confinado e desconfiado (etapas 3, 4 e 5).

Na Figura 86 é apresentado um resumo dos resultados dos ensaios em que não houve quebra de declividade para baixa ($10 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$) e alta vazão (30 e $40 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$). Os mapas de contorno mostram dois padrões de lobos turbidíticos. O padrão de lobos de baixa vazão, Figura 86 (A), está associado às seguintes características hidrodinâmicas: velocidades médias mais baixas, fraca turbulência, fluxo subcrítico, forma de expansão alongada, baixa competência e comportamento de fluxo desacelerante ao longo do espaço (*depletive sensu* Kneller, 1995). À medida que as correntes de turbidez fluíram para a bacia, ocorreu a desaceleração desses fluxos devido à deposição da carga suspensa e a diminuição da intensidade da turbulência. O depósito gerado por esses grupos apresentou forma alongada.

Acredita-se que a formação dos depósitos foi controlada principalmente pela deposição contínua do fluxo com menor ou nenhum volume de transporte da carga de fundo.

Na literatura, a geração de lobos por fluxos subcríticos é menos explorada, embora frequentemente observada em situações de campo (STRAUB; PYLES, 2012, PICKERING; HISCOTT, 2016). No entanto, o caso de baixa vazão necessita de uma investigação mais aprofundada, particularmente se estiver relacionado com o comportamento de um fluxo dominado pelas forças viscosas (baixo número de Reynolds - fluxo laminar). Essa característica usualmente é verificada em fluxos mais viscosos (alta concentração), muito diferentes das condições dadas no teste experimental E10, por exemplo.

Figura 86 - Modelo fluxo-depósito em situação em que não há quebra de declividade entre as zonas confinada e desconfinaada



Fonte: Guimarães et al. (2022)

Os ensaios com alta vazão, Figura 86 (B), apresentaram correntes de turbidez com velocidades elevadas, fluxo supercrítico e turbulento e com maior competência. O fluxo se espalhou em todas as direções (radial), mas também apresentou características típicas de fluxos desacelerantes (KNELLER, 1995) com diluição e sedimentação de partículas. O depósito formado foi mais radial, marcado pela presença de formas de fundo do tipo ondulações e dunas.

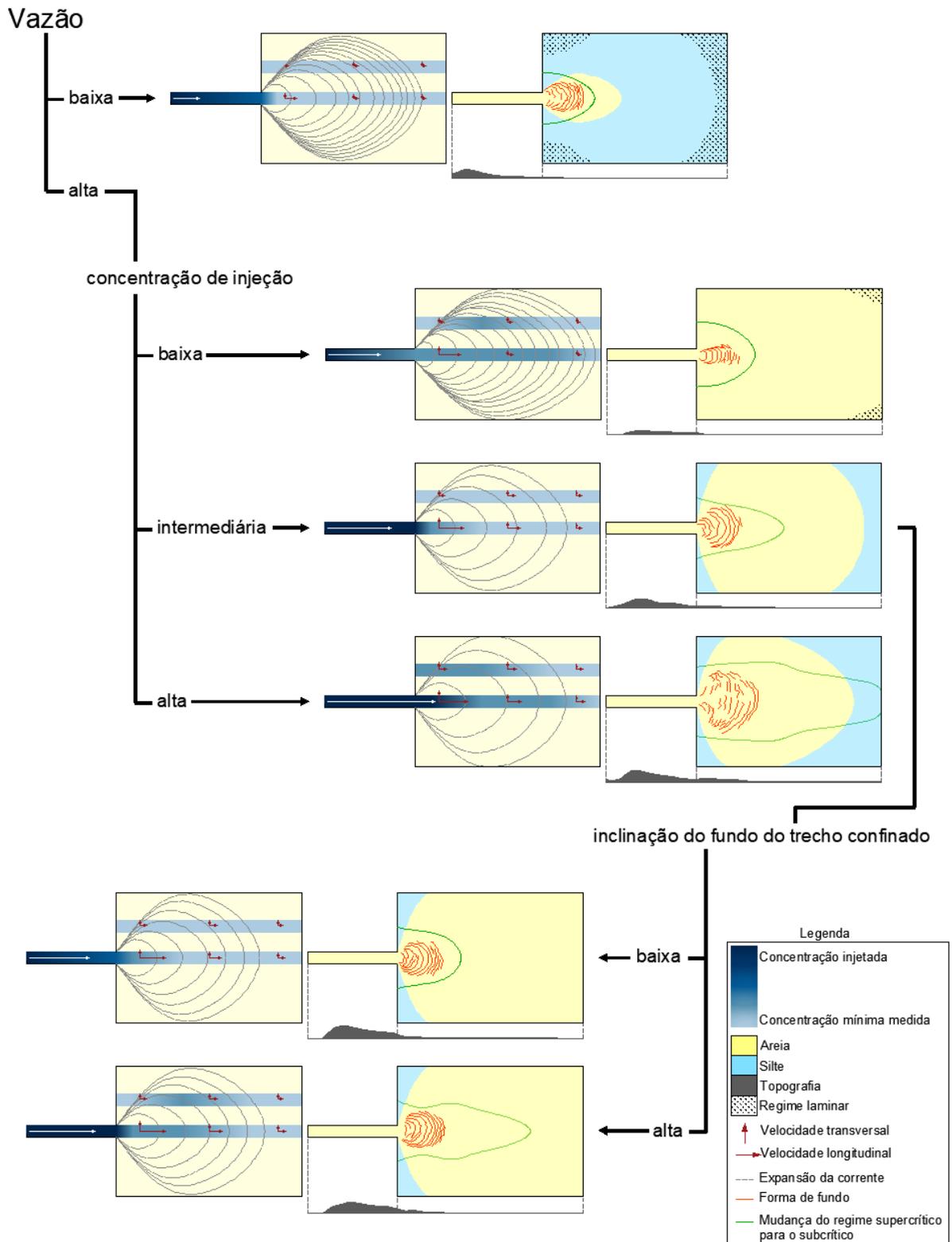
Em ambientes naturais, os ensaios com alta vazão podem descrever maior número de cenários, incluindo configurações de gradiente médio à baixo e canais que entram nas bacias sem quebras significativas de talude (MULDER et al. 1997, MULDER et al. 2003, AZPIROZ-ZABALA et al. 2017, PAULL et al. 2018). Além disso,

os fluxos supercríticos e turbulentos são mais comuns na natureza, mesmo em ambientes de baixo gradiente.

Os dados e discussões dos ensaios que foram realizados sem quebra de declividade entre o trecho confinado e desconfinado, foram publicados em forma de artigo na revista *Brazilian Journal of Geology* em janeiro de 2023, com título *Turbidity currents generating lobes: flow rate influence on 3D experiments without slope break*. Este foi o primeiro artigo desta tese.

O modelo fluxo-depósito para os ensaios com quebra de declividade entre as regiões confinada e desconfinada é apresentado na Figura 87. Quando a vazão de injeção foi baixa, muito material ficou acumulado na região confinada, causando uma grande desaceleração da corrente logo após o desconfinamento. Como consequência, a concentração da corrente reduziu drasticamente. A baixa velocidade no trecho confinado, associada à quebra de declividade, contribuiu para que o depósito se concentrasse majoritariamente após o difusor. A expansão da corrente ocorreu principalmente na direção longitudinal, com fator de forma da corrente (FFC) próximo de 1,1. Além disso, a baixa velocidade da corrente na bacia, principalmente na direção transversal, foi um contribuinte para que houvesse presença de partículas de maiores diâmetros (frações de areia) principalmente na região proximal, com uma geometria alongada (FFD > 1). Acredita-se que o depósito foi formado através da deposição contínua dos sedimentos, com baixo e/ ou nenhum volume de transporte da carga de fundo. Neste modelo de fluxo-depósito, as baixas vazão (gerando baixa velocidade) geraram formas de fundo ondulares, com comprimento de ondas menores.

Figura 87 – Modelo fluxo-depósito em situação em que há quebra de declividade entre as zonas confinada e desconfinada



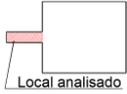
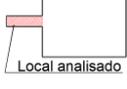
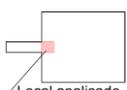
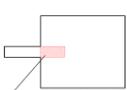
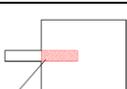
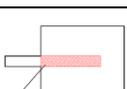
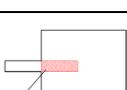
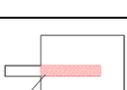
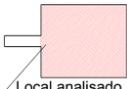
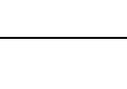
Fonte: Autor (2023)

A comparação entre os ensaios de baixa vazão (experimentos E10 e EA 15), sem e com a presença da quebra de declividade (Figura 86 e Figura 87, respectivamente), está apresentada no Quadro 2. Neste quadro, nota-se que na região confinada a altura do depósito foi maior quando há quebra de declividade. O diâmetro médio do material depositado nesta região no ensaio sem quebra de declividade corresponde a areia muito fina a silte grosso. Já quando há quebra de declividade, o material depositado apresenta diâmetro médio de areia muito grossa a areia muito fina (Wentworth, 1922). Diante disso, observa-se que, nos ensaios com a quebra de declividade, materiais com diâmetro médio maiores depositaram mais no trecho confinado.

Em relação à região desconfinada, observou-se que nos primeiros 100 cm a redução da velocidade longitudinal média ocorreu de maneira quase semelhante entre as etapas 2 e 3, com diferença absoluta de no máximo 4% entre eles. Isso indica que a quebra de declividade não interferiu na redução da velocidade longitudinal média, no eixo central. Já na região distal (após a abscissa 150 cm), a redução da velocidade no eixo central foi mais intensa quando há quebra de declividade. Em relação à velocidade transversal média, houve ao longo de todo o trecho analisado maior redução quando não há quebra de declividade, o que por consequência interferiu para o maior valor de FFC. Quando analisado o depósito da região desconfinada, os lobos apresentaram geometria mais alongada (maior FFD) quando não havia quebra de declividade, com diâmetro médio equivalente variando de silte grosso (região proximal) a silte fino (região distal) para o ensaio da Etapa 2 e, para o ensaio com quebra de declividade (Etapa 3), o diâmetro médio variou de areia muito grossa a silte fino, para as regiões proximais e distais, respectivamente.

Para altas vazões ($Q_{\text{injeção}} = 45 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$), os ensaios com quebra de declividade entre a região confinada e desconfinada (Figura 87), de maneira geral, apresentaram velocidades mais altas, e uma predominância do regime supercrítico. A turbulência se intensificou, além de uma maior competência do escoamento. A expansão da corrente ocorreu de maneira mais radial ($\text{FFC} \cong 1$) e, os depósitos apresentaram geometrias mais alongadas ($\text{FFD} > 1$).

Quadro 2 – Comparativo dos ensaios com baixa vazão (E10 e EA 15), com e sem presença de quebra de declividade entre as regiões confinada e desconfinada

		Sem quebra de declividade (Etapa 2)	Com quebra de declividade (Etapa 3)
Região confinada		Altura máxima do depósito na região confinada	$\cong 5$
		Diâmetro médio do material depositado na região confinada	$\cong 15$
Região desconfinada		Redução de velocidade longitudinal média nos primeiros 50 cm do desconfinamento – eixo longitudinal central	71 a 58 μm (areia muito fina a silte grosso)
		Redução de velocidade longitudinal média nos primeiros 100 cm do desconfinamento – eixo longitudinal central	212 a 72 μm (areia muito grossa a areia muito fina)
		Redução de velocidade longitudinal média nos primeiros 150 cm do desconfinamento – eixo longitudinal central	74%
		Redução de velocidade longitudinal média nos primeiros 250 cm do desconfinamento – eixo longitudinal central	78%
		Redução de velocidade transversal média nos primeiros 150 cm do desconfinamento – eixo longitudinal central	81%
		Redução de velocidade transversal média nos primeiros 250 cm do desconfinamento – eixo longitudinal central	92%
		Fator de forma da corrente (FFC)	90%
	Diâmetro médio do material depositado na região desconfinada	62%	
	Fator de forma do depósito (FFD)	58 a 14 μm (silte grosso a silte fino)	
		$> 1,5$	$\cong 1,1$
		$\gg 1$	$\cong 1$

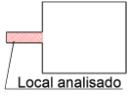
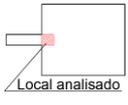
Fonte: Autor (2023)

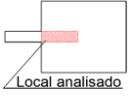
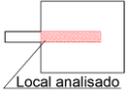
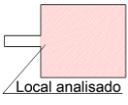
No Quadro 3 são apresentados os dados comparativos dos ensaios com alta vazão (E40 e EA 45) sem e com quebra de declividade (Figura 86 e Figura 87, respectivamente). A inserção da quebra de declividade contribuiu para a formação de depósito com maiores espessuras na região confinada, o que favoreceu a deposição de grãos maiores nesta região. No ensaio sem quebra de declividade os diâmetros dos grãos foram silte grosso a areia muito fina enquanto que, no experimento com quebra de declividade, a faixa granulométrica das partículas sedimentadas aumentou, variando de silte médio a areia fina. Com a quebra de declividade, no eixo longitudinal

central, houve maior redução percentual da velocidade média, quando comparado com os ensaios sem quebra de declividade, ou seja, a mudança de declividade entre a zona confinada e desconfinada atuou como um “freio” para o desenvolvimento da corrente de turbidez. A diferença absoluta da redução de velocidade média longitudinal foi de 23% nos primeiros 50 cm após o início do desconfinamento e, se manteve conforme a corrente avançou para as regiões mais distais.

Ainda em relação ao Quadro 3, ao longo do eixo central, a redução da velocidade média na direção transversal foi mais intensa no ensaio sem quebra de declividade. A diferença absoluta da redução da velocidade transversal média entre os ensaios que não havia mudança de declividade entre a região confinada e o que havia, se manteve em aproximadamente 10%, tanto para o trecho proximal, quanto para o distal. Quando analisado o depósito da região desconfinada, os lobos apresentaram geometria mais alongada para o ensaio sem quebra de declividade e, para o experimento com quebra de declividade, foi mais circular. O diâmetro médio do material sedimentado também foi divergente, enquanto que, no ensaio sem quebra de declividade o diâmetro médio variou de areia muito fina a silte grosso, no ensaio com quebra de declividade foi areia fina a silte médio, ou seja, neste houve maior variação da faixa granulométrica.

Quadro 3 – Comparativo dos ensaios com alta vazão (E40 e EA 45), com e sem presença de quebra de declividade entre as regiões confinada e desconfinada

			Sem quebra de declividade (Etapa 2)	Com quebra de declividade (Etapa 3)
Região confinada		Altura máxima do depósito na região confinada	< 5	> 15
		Diâmetro médio do material depositado na região confinada	42 a 86 μm (silte grosso a areia muito fina)	19 a 238 μm (silte médio a areia fina)
Região desconfinada		Redução de velocidade longitudinal média nos primeiros 50 cm do desconfinamento – eixo longitudinal central	49%	72%
		Redução de velocidade longitudinal média nos primeiros 100 cm do desconfinamento – eixo longitudinal central	57%	83%
		Redução de velocidade longitudinal média nos primeiros 150 cm do desconfinamento – eixo longitudinal central	65%	87%
		Redução de velocidade longitudinal média nos primeiros 250 cm do	78%	95%

		Sem quebra de declividade (Etapa 2)	Com quebra de declividade (Etapa 3)
		desconfinamento – eixo longitudinal central	
	Local analisado	Redução de velocidade transversal média nos primeiros 150 cm do desconfinamento – eixo longitudinal central	63%
	Local analisado	Redução de velocidade transversal média nos primeiros 250 cm do desconfinamento – eixo longitudinal central	75%
	Local analisado	Fator de forma da corrente (FFC)	$\cong 1$
		Diâmetro médio do material depositado na região desconfinada	80 a 51 μm (areia muito fina a silte grosso)
		Fator de forma do depósito (FFD)	> 1
			$\cong 1$
			216 a 28 μm (areia fina a silte médio)
			$\cong 1$

Fonte: Autor (2023)

No Quadro 4 é apresentado o comparativo entre fluxo e depósito variando-se a concentração de injeção da mistura (Etapa 4). Conforme aumentaram-se os valores da concentração da mistura injetada, maiores foram as espessuras dos depósitos na região confinada. O depósito gerado pelos ensaios com alta vazão, independentemente da concentração injetada, iniciou-se após alguns centímetros do difusor, tendo o pico do depósito ocorrido no trecho confinado. Excetuando-se o ensaio com baixa concentração da mistura injetada (EB 1), a altura do depósito extrapolou a altura da calha do trecho confinado, ocasionando extravasamento de material em todos os demais ensaios em que foi analisado o efeito da concentração da mistura injetada (EB 5, EB 10 e EB 15). O material depositado ao longo da calha apresentou tamanho de grãos na faixa da areia média e areia fina, independentemente da concentração da mistura injetada. A redução da concentração volumétrica média foi superior a 50% em relação a mistura injetada em todos os ensaios da Etapa 4.

Na Figura 87 é possível notar que, para altas vazões ($45 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$), a elevação da concentração de injeção influenciou no aumento da velocidade nos eixos longitudinal e transversal, tanto na região confinada quanto na desconfinada. Estas velocidades estão representadas na referida imagem por meio de setas horizontais e transversais, respectivamente, com as dimensões das setas em escala.

À medida que aumentou-se a concentração da mistura injetada, na região proximal do desconfinamento, identificou-se maior redução percentual da velocidade

média longitudinal. Contudo, quando analisado o trecho distal da região desconfinada, as maiores reduções percentuais da velocidade média longitudinal ocorreram para os ensaios com baixas concentrações. Em relação à redução da velocidade média transversal, tem-se que as maiores reduções percentuais ocorreram para os ensaios com baixas concentrações, independentemente do trecho avaliado.

Como consequência das maiores reduções das velocidades médias na direção longitudinal e transversal na região distal, conforme diminuiu-se a concentração da mistura injetada, a mudança do regime supercrítico para o subcrítico (indicativo da ocorrência do ressalto hidráulico) ocorreu mais a montante conforme reduziu a concentração da mistura injetada. Em decorrência das maiores velocidades médias para os ensaios com maiores concentrações da mistura injetada, houve maior turbulência nestes ensaios. No ensaio com menor concentração da mistura injetada (EB 1), houve nas extremidades do trecho distal a ocorrência de fluxo laminar, a qual foi identificada no modelo fluxo-deposito da Figura 87. Nas demais regiões, o escoamento turbulento se fez presente.

Visto que no início do desconfinamento a velocidade na direção transversal aumentou proporcionalmente mais que a velocidade longitudinal, (ver Tabela 6 e Tabela 8), o ângulo de expansão da corrente também aumentou. Isso é, a variação deste ângulo ocorreu de maneira sutil ($< 1,5^\circ$), dado que os valores das velocidades transversais e longitudinais não apresentaram grandes discrepâncias.

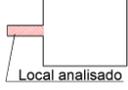
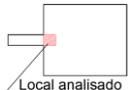
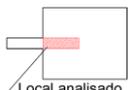
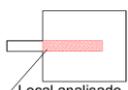
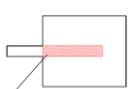
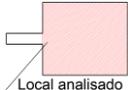
Ainda, a variação da concentração da mistura injetada não foi capaz de modificar de maneira significativa a geometria de expansão da corrente, os quais apresentaram FFC próximos a um. Isso é um indicativo de que a concentração não interfere tanto na forma como a corrente expande.

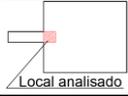
Além disso, a competência da corrente de turbidez, quando considerada como referência a concentração da corrente no final do trecho confinado ou a concentração da mistura injetada, de maneira geral, reduziu conforme aumentou-se a concentração desta última. Na Figura 87 é representada a variação da concentração tomando como extremos da escala a concentração da mistura injetada e a menor concentração medida, independentemente se medido no eixo longitudinal central ou lateral.

O maior valor absoluto de velocidade média transversal, associado a maior concentração volumétrica absoluta, menor redução percentual de velocidade transversal média e, maior ângulo de expansão da corrente, foram os fatores que favoreceram para que os grãos se expandissem mais na região perpendicular ao

fluxo, o que teve como produto redução do fator de forma do depósito, ficando mais próximo de um. O material sedimentado ao longo do eixo central apresentou tamanho de grão máxima equivalente a areia fina, independentemente da concentração da mistura injetada, enquanto a mínima foi reduzindo conforme aumentou-se a concentração da mistura.

Quadro 4 – Comparativo dos ensaios com alta vazão, variado a concentração da mistura injetada (Etapa 4)

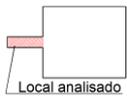
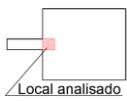
			Baixa concentração de injeção (1%)	Intermediária concentração de injeção (5%)	Alta concentração de injeção (15%)	
Região confinada		Altura máxima do depósito na região confinada	< 10 cm	> 15 cm	> 15 cm	
		Diâmetro médio do material depositado na região confinada	390 a 239 μm (areia média a areia fina)	278 a 146 μm (areia média a areia fina)	268 a 138 μm (areia média a areia fina)	
		Redução de concentração volumétrica em relação a concentração da mistura injetada	74%	77%	57%	
Região desconfinada		Redução de velocidade longitudinal média nos primeiros 25 cm do desconfinamento – eixo longitudinal central	61%	63%	76%	
			Redução de velocidade longitudinal média nos primeiros 125 cm do desconfinamento – eixo longitudinal central	95%	85%	90%
			Redução de velocidade longitudinal média nos primeiros 275 cm do desconfinamento – eixo longitudinal central	98%	96%	95%
			Redução de velocidade transversal média nos primeiros 150 cm do desconfinamento – eixo longitudinal central	83%	53%	45%
			Redução de velocidade transversal média nos primeiros 250 cm do desconfinamento – eixo longitudinal central	91%	66%	66%
			Abscissa de mudança do regime supercrítico para o subcrítico – eixo longitudinal central	105 cm	165 cm	370 cm

		Baixa concentração de injeção (1%)	Intermediária concentração de injeção (5%)	Alta concentração de injeção (15%)	
		Fluxo turbulento – eixo longitudinal central	$\cong 150$	$\cong 350$	> 350
		Ângulo de expansão da corrente	14,91°	16,15°	16,20°
		Redução de concentração volumétrica média nos primeiros 25 cm do desconfinamento – eixo longitudinal central	35% ¹ 83% ²	62% ¹ 91% ²	45% ¹ 76% ²
		Redução de concentração volumétrica média nos primeiros 100 cm do desconfinamento – eixo longitudinal central	54% ¹ 88% ²	77% ¹ 95% ²	83% ¹ 93% ²
		Redução de concentração volumétrica média nos primeiros 200 cm do desconfinamento – eixo longitudinal central	69% ¹ 92% ²	87% ¹ 97% ²	91% ¹ 96% ²
		Fator de forma da corrente (FFC)	$\cong 1$	$\cong 1$	$\cong 1$
		Diâmetro médio do material depositado na região desconfina	225 a 56 μm (areia fina a silte grosso)	235 a 24 μm (areia fina a silte médio)	163 a 10 μm (areia fina a silte fino)
		Fator de forma do depósito (FFD)	> 1	$\cong 1$	> 1
¹) Considerando a concentração medida no final do trecho confinado; ²) Considerando a concentração teórica da mistura injetada.					

Fonte: Autor (2023)

No Quadro 5 são apresentados dados comparativos entre os ensaios que apresentaram baixa e alta inclinação do leito do trecho confinado (2° e 5°, respectivamente). Entre todos os parâmetros variados nesta pesquisa, a declividade do leito do trecho confinado foi o que menos apresentou impactos em relação ao fluxo e ao depósito. O material depositado apresentou diâmetro médio equivalente variando de areia média à areia fina. Conforme aumentou-se a declividade do leito da região confinada, aumentou a competência da corrente de turbidez, fazendo com que houvesse menor redução (em porcentagem) da concentração volumétrica do fluxo no trecho em questão.

Quadro 5 – Comparativo dos ensaios com alta vazão, variado a inclinação do leito do trecho confinado (Etapa 5)

			Baixa declividade do leito do trecho confinado (2°)	Alta declividade do leito do trecho confinado (5°)
Região confinada		Altura máxima do depósito na região confinada	> 15 cm	> 15 cm
		Diâmetro médio do material depositado na região confinada	335 a 209 μm (areia média a areia fina)	266 a 192 μm (areia média a areia fina)
		Redução de concentração volumétrica em relação a concentração da mistura injetada	80%	69%
Região desconfinada		Redução de velocidade longitudinal média nos primeiros 25 cm do desconfinamento – eixo longitudinal central	60%	65%
		Redução de velocidade longitudinal média nos primeiros 125 cm do desconfinamento – eixo longitudinal central	84%	84%
		Redução de velocidade longitudinal média nos primeiros 275 cm do desconfinamento – eixo longitudinal central	93%	92%
		Redução de velocidade transversal média nos primeiros 150 cm do desconfinamento – eixo longitudinal central	50%	46%
		Redução de velocidade transversal média nos primeiros 250 cm do desconfinamento – eixo longitudinal central	64%	63%
		Abscissa de mudança do regime supercrítico para o subcrítico – eixo longitudinal central	120 cm	250 cm
		Fluxo turbulento – eixo longitudinal central	$\cong 310$	> 350
		Ângulo de expansão da corrente	12,72°	17,29°
		Redução de concentração volumétrica média nos primeiros 25 cm do desconfinamento – eixo longitudinal central	68% ¹ 94% ²	69% ¹ 91% ²
		Redução de concentração volumétrica média nos primeiros 100 cm do desconfinamento – eixo longitudinal central	85% ¹ 97% ²	82% ¹ 94% ²
		Redução de concentração volumétrica média nos primeiros 200 cm do desconfinamento – eixo longitudinal central	90% ¹ 98% ²	89% ¹ 97% ²
		Fator de forma da corrente (FFC)	$\cong 1$	$\cong 1$
		Diâmetro médio do material depositado na região desconfinada	215 a 22 μm (areia fina a silte médio)	233 a 18 μm (areia fina a silte médio)

		Baixa declividade do leito do trecho confinado (2°)	Alta declividade do leito do trecho confinado (5°)
	Fator de forma do depósito (FFD)	> 1	> 1
¹⁾ Considerando a concentração medida no final do trecho confinado; ²⁾ Considerando a concentração teórica da mistura injetada.			

Fonte: Autor (2023)

A redução percentual da velocidade média na direção longitudinal e transversal apresentou diferença absoluta inferior a 5%, entre os ensaios com baixa e alta declividade do leito do trecho confinado. Já a redução percentual da concentração volumétrica houve diferença absoluta entre as medições inferior a 3% entre as diferentes declividades ensaiadas.

Visto que as velocidades médias e as concentrações volumétricas das correntes de turbidez eram maiores para os ensaios com maiores declividades do leito do trecho confinado (ver Tabela 6 e Tabela 8) e, as reduções percentuais destes dois parâmetros foram praticamente iguais entre os ensaios, o local em que ocorreu a transição do regime supercrítico para o subcrítico (indicativo da ocorrência de resalto hidráulico) e, a extensão da área com fluxo turbulento se deslocou para montante conforme a declividade do leito foi aumentada.

No ensaio com alta declividade do leito do trecho confinado (5°) a velocidade transversal média no início do desconfinamento foi cerca de 40% superior em relação ao ensaio com baixa inclinação do fundo (ver Tabela 8), como consequência disso, o ângulo de expansão da corrente para o ensaio com alta declividade foi maior.

Devido à semelhança das velocidades longitudinais médias, reduções percentuais de velocidade média e concentração volumétricas entre os ensaios com baixa e alta inclinação do leito do trecho confinado, a geometria em que ocorreu a expansão da corrente foi radial ($FFC \cong 1$), com baixa variação entre os ensaios. Os depósitos formados nestes ensaios apresentaram geometria levemente alongada ($1,10 < FFD < 1,20$), com material depositado com diâmetro médio variando entre areia fina e silte médio, independentemente da declividade do leito confinado.

Diante dos ensaios desta pesquisa e, da hipótese deste trabalho, observou-se que o fator de forma do depósito se aproxima de um quando há quebra de declividade entre o trecho confinado e desconfinado e, a declividade desse é mais alta (cerca de 5°). Para os casos sem quebra de declividade a geometria dos lobos (FFD) é mais alongada. Não foi possível observar alguma tendência do FFD quando modifica a

concentração da mistura injetada. Visto que o fator de forma do depósito foi feito através da identificação visual do lobo mais externo das fotografias retiradas do depósito formado, é possível que haja diferentes interpretações visuais e, por isso, diferentes valores das dimensões e larguras dos lobos turbidíticos. Além disso, a identificação apenas da geometria do lobo, sem levar em consideração o diâmetro médio das partículas depositadas, pode limitar a aplicação das tendências observadas neste trabalho para situações naturais. Neste sentido, o tópico seguinte apresentará um modelo de determinação do fator de forma do depósito (FFD) em função das diferentes frações granulométricas que podem compor um depósito turbidítico.

9.2 DETERMINAÇÃO DO ALCANCE (LONGITUDINAL E TRANSVERSAL) DE DIFERENTES FRAÇÕES GRANULOMÉTRICAS E FATOR DE FORMA

Conforme foi apresentado, os resultados da presente pesquisa mostraram que a distribuição espacial (alcance) dos diferentes diâmetros das partículas foi bastante modificada à medida que houve quebra de declividade, variação da vazão (Figura 74) e alteração da concentração de injeção (Figura 77). Assim, a maneira como esses grãos de diferentes granulometrias estão distribuídos ao longo dos depósitos turbidíticos, além de impactar na porosidade e permeabilidade do meio, podem também fornecer características da corrente de turbidez que o formou. Diante disso, neste tópico será proposto um modelo para obtenção do alcance dos grãos de diferentes granulometrias, ou seja, a distância na qual uma partícula foi transportada antes de ser depositada, a partir de características (vazão, velocidade de cisalhamento e diâmetro do grão) da corrente de turbidez que a originou. Neste modelo proposto a precisão será considerada satisfatória quando à relação entre as medições calculadas e medidas estiverem compreendidas entre o intervalo de 75% e 125% de precisão, assim como no trabalho de Sychala (2020).

Segundo Ganti, Lamb e McElroy (2014), uma das maneiras de avaliar o alcance teórico dos grãos (A_i) é por meio da Equação 12, a qual apresenta características hidrodinâmicas da corrente de turbidez representada pela velocidade média (u_c), uma característica geométrica da corrente, sendo o espaço disponível na vertical para o grão sedimentar, isto é, a altura da corrente de turbidez (h_c) e ainda uma característica hidrodinâmica do próprio grão, no caso a velocidade de queda da partícula (w_s).

$$A_l = \frac{u_c \cdot h_c}{w_s} \quad \text{Equação 12}$$

Onde:

A_l é o alcance teórico da partícula (m);

u_c é a velocidade média da corrente de turbidez ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$);

h_c é a altura da corrente (m);

w_s é a velocidade de queda do grão ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$).

A velocidade de queda do grão, pode ser calculada por meio da Equação 13, proposta por Ferguson e Church (2004).

$$w_s = \frac{R \cdot g \cdot d^2}{C_1 \cdot \vartheta_c + \sqrt{0,75 \cdot C_2 \cdot R \cdot D^3}} \quad \text{Equação 13}$$

Onde:

R é a densidade submersa do sedimento ($R = (\rho_s - \rho) / \rho$);

g é a aceleração da gravidade ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$);

d é o diâmetro nominal do sedimento (m);

C_1 é uma constante com valor teórico de 18;

ϑ_c é a viscosidade cinemática da água ($\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$);

C_2 é o valor assintótico constante do coeficiente de arrasto (0,4 para carvão).

Neste sentido, buscou-se verificar se a Equação 12 apresentaria precisão significativa para mensurar o alcance obtido pelos grãos de diferentes classes granulométricas nos ensaios realizados. A verificação do alcance obtido pelos grãos foi realizada tanto no eixo longitudinal, quanto para o eixo transversal da corrente. Destaca-se, no entanto, que foi desenvolvida para determinação do alcance dos grãos apenas para a direção longitudinal. Para essa análise foi adotada a escala de tamanho de grãos de Wentworth (1922), cujas dimensões dos agregados estão apresentadas na Tabela 19.

Tabela 19 – Escala granulométrica adotada

Nome do agregado	Dimensão (mm)
Areia muito grossa	1 – 2
Areia grossa	0,5 – 1
Areia média	0,25 – 0,5
Areia fina	0,125 – 0,25
Areia muito fina	0,0625 – 0,125

Nome do agregado	Dimensão (mm)
Silte grosso	0,0310 – 0,0625
Silte médio	0,0156 – 0,0310
Silte fino	0,0078 – 0,0156
Silte muito fino	0,0039 – 0,0078
Argila	< 0,0039

Fonte: Wentworth (1922)

As velocidades médias (u_c) adotadas para o cálculo do alcance do grão, tanto no eixo longitudinal, quanto no transversal, foi a medida em 25 cm do início do desconfinamento. Estes valores e a altura da corrente (h_c) são apresentados na Tabela 20.

Tabela 20 – Alturas de sedimentação e velocidades médias do fluxo empregadas no cálculo do alcance da partícula

	EA 15	EA 30	EA 45	EB 1	EB 10	EB 15	EC 2	EC 3	EC 5
u_c - longitudinal (m/s)	0,020	0,040	0,051	0,043	0,049	0,060	0,051	0,053	0,051
u_c - transversal (m/s)	0,003	0,009	0,015	0,012	0,017	0,017	0,012	0,013	0,016
h_c (m)	0,15	0,18	0,20	0,20	0,18	0,18	0,20	0,20	0,20

Fonte: Autor (2023)

Ainda, o cálculo do alcance teórico do sedimento foi realizado empregando-se o valor do diâmetro inferior de cada fração granulométrica da escala de Wentworth (1922). Na Tabela 21 são apresentados os alcances calculados através da Equação 12.

Tabela 21 – Alcance teórico de diferentes frações granulométricas nos ensaios realizados

	Areia média		Areia fina		Areia muito fina		Silte grosso	
	A_{l_x}	A_{l_y}	A_{l_x}	A_{l_y}	A_{l_x}	A_{l_y}	A_{l_x}	A_{l_y}
EA 15	29,2	4,4	102,8	15,6	391,6	59,5	1563,5	237,6
EA 30	68,8	15,4	242,5	54,4	923,7	207,3	3687,9	827,7
EA 45 ¹⁾	97,4	28,2	343,3	99,4	1307,9	378,8	5221,8	1512,4
EB 1	82,3	21,9	290,2	77,3	1105,7	294,3	4414,5	1175,2
EB 10	83,5	28,5	294,5	100,4	1121,8	382,4	4478,9	1526,7
EB 15	102,7	29,8	362,2	105,2	1379,8	400,8	5508,9	1600,3
EC 2	98,0	22,1	345,3	77,9	1315,6	296,9	5252,4	1185,4
EC 3	101,0	25,3	356,1	89,4	1356,5	340,4	5415,9	1359,1
EC 5	98,0	30,5	345,3	107,5	1315,6	409,5	5252,4	1635,0

¹⁾ EA 45 também pode ser chamado de EB 5 e EC 4;

A_{l_x} corresponde ao alcance teórico do sedimento na direção longitudinal ao fluxo (cm);

A_{l_y} corresponde ao alcance teórico do sedimento na direção transversal ao fluxo (cm);

Fonte: Autor (2023)

O alcance real obtido pelas diferentes frações granulométricas foi obtido através da medição do comprimento e largura, nos diagramas de cerca deste trabalho (Figura 74, Figura 77 e Figura 80), dos diferentes diâmetros de areia, silte e argila alcançaram em cada ensaio. O comprimento foi medido na linha 7 (eixo central longitudinal) e a largura na coluna C – distante 60 cm do início do desconfinamento (ver Figura 71). Uma vez que nem todas as partículas de diâmetros menores sedimentaram no espaço avaliado do tanque, a análise ficou concentrada, principalmente, nas frações granulométricas que tiveram suas partículas depositadas no trecho analisado. Na Tabela 22 é apresentado o alcance medido dessas frações granulométricas em relação ao eixo longitudinal e transversal.

Tabela 22 – Alcance medido de diferentes frações granulométricas nos ensaios realizados

	Areia média		Areia fina		Areia muito fina		Silte grosso	
	A_{l_x-m}	A_{l_y-m}	A_{l_x-m}	A_{l_y-m}	A_{l_x-m}	A_{l_y-m}	A_{l_x-m}	A_{l_y-m}
EA 15	NA	NA	60,4	NA	150,7	111,2	290,7	155,6
EA 30	83,8	56,5	111,6	101,6	262,6	205,7	-	-
EA 45 ¹	107,4	122,2	228,0	207,7	317,7	340,0	-	-
EB 1	236,7	122,9	312,5	174,9	-	-	-	-
EB 10	91,5	93,4	118,8	180,1	281,9	315,0	-	-
EB 15	106,9	86,3	129,1	142,4	297,6	252,3	-	-
EC 2	97,0	145,0	170,9	174,63	-	-	-	-
EC 3	97,6	145,4	144,2	194,4	299,2	315,2	-	-
EC 5	98,4	143,0	156,0	193,8	-	-	-	-

¹) EA 45 também pode ser chamado de EB 5 e EC 4;

A_{l_x-m} corresponde ao alcance medido do sedimento na direção longitudinal ao fluxo (cm);

A_{l_y-m} corresponde ao alcance medido do sedimento na direção transversal ao fluxo (cm);

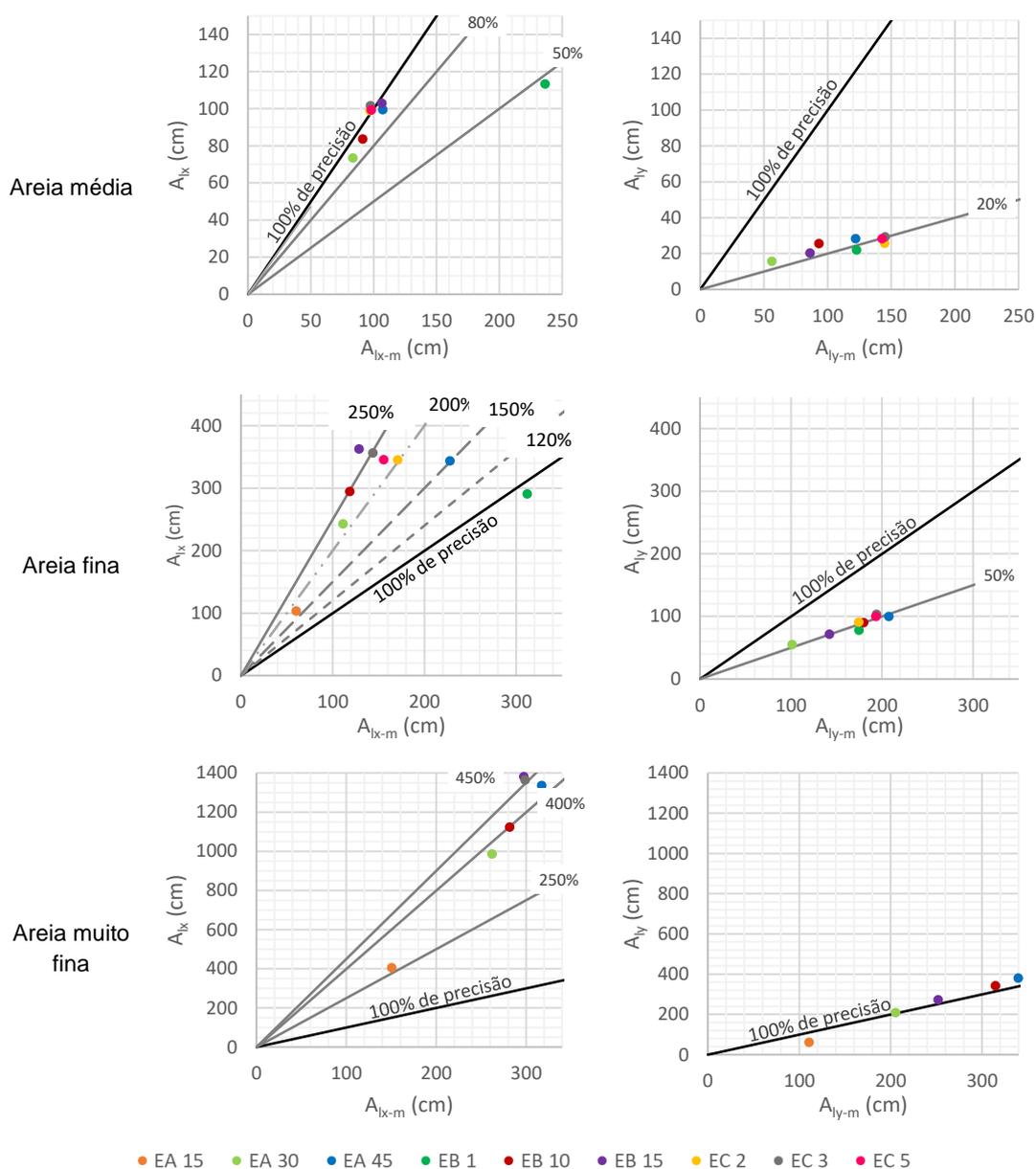
“NA” indica que a fração do material foi inferior ao valor mínimo considerado como representativo, neste trabalho foi adotado em 5%;

“-” indica que a fração da referida classe granulométrica extrapolou os limites da área analisada, impedindo a medição direta do alcance do material;

Fonte: Autor (2023)

Através da relação entre o alcance teórico (Tabela 21) e medido (Tabela 22), obteve-se a precisão da Equação 12 com os dados medidos dos ensaios. Essa precisão é apresentada na Figura 88. Nesta A_{l_x} e A_{l_y} corresponde ao alcance teórico do sedimento na direção longitudinal e transversal, respectivamente, e, A_{l_x-m} e A_{l_y-m} correspondem ao alcance medido do sedimento na direção longitudinal e transversal, respectivamente.

Figura 88 – Precisão da equação de Ganti, Lamb e McElroy (2014) para diferentes frações granulométricas



Fonte: Autor (2023)

Neste cenário, a equação de Ganti, Lamb e McElroy (2014) apresentou precisão considerada satisfatória na direção longitudinal para areias médias, em 88% dos ensaios realizados. Já na direção transversal, a equação apresentou precisão satisfatória de 60% para as areias muito finas. Nas demais frações granulométricas, a precisão entre o alcance medido e calculado não foram satisfatórias, apresentando valores de até 4,6 vezes de diferença entre si.

Neste contexto, visando adequar a equação Ganti, Lamb e McElroy (2014) para que possa ser aplicada para diferentes frações granulométricas, este trabalho propõe

um coeficiente de ajuste (K) para a Equação 12. O coeficiente de ajuste proposto neste trabalho relaciona o diâmetro da partícula cujo alcance se deseja determinar a partir do diâmetro do grão que apresentou melhor precisão ao empregar a equação Ganti, Lamb e McElroy (2014), o qual recebeu a denominação de diâmetro de referência ($D_{\text{referência}}$). No cálculo do alcance longitudinal para qualquer outra classe granulométrica de grão, o diâmetro de referência adotado é $2,5 \times 10^{-4}$ m (limite inferior para areia média – Tabela 19) e, para o cálculo do alcance transversal o diâmetro de referência é $6,25 \times 10^{-5}$ m (limite inferior para areia muito fina – Tabela 19). O coeficiente de ajuste (K) proposto, pode ser determinado por meio da Equação 14.

$$K = \frac{d}{D_{\text{referência}}} \quad \text{Equação 14}$$

Onde:

K é o coeficiente de ajuste (adimensional);

d é o diâmetro da fração granulométrica a ser determinada (m);

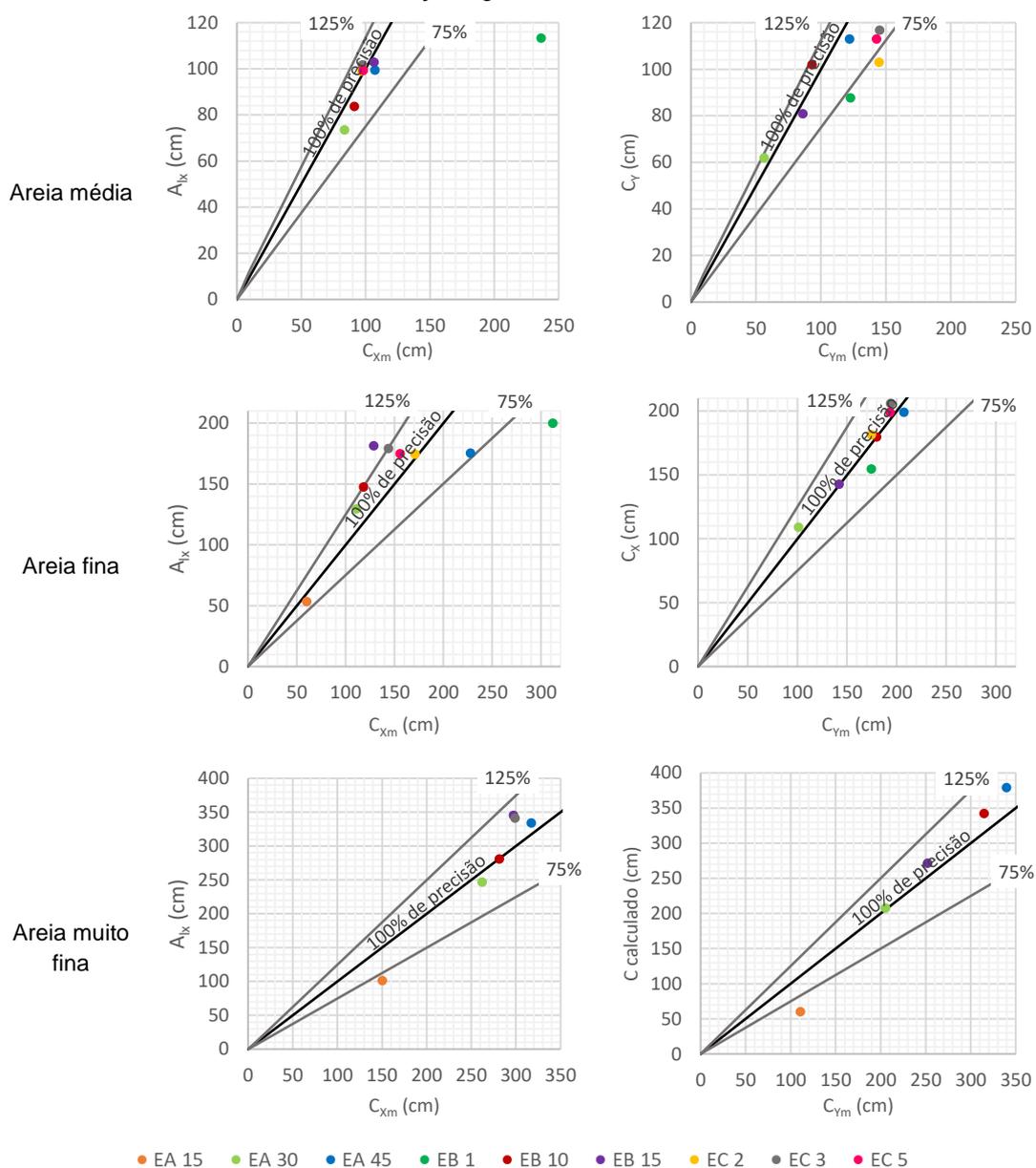
$D_{\text{referência}}$ é o diâmetro da areia média ($2,5 \times 10^{-4}$ m) para determinação do alcance longitudinal ou o diâmetro da areia muito fina ($6,25 \times 10^{-5}$ m) para cálculo do alcance transversal.

A equação de Ganti, Lamb e McElroy (2014) modificada por meio da inserção do coeficiente de ajuste é apresentada na Equação 15.

$$A_l = \frac{K \cdot u_c \cdot h_c}{w_s} \quad \text{Equação 15}$$

Ao empregar a proposta de ajuste para a equação de Ganti, Lamb e McElroy (2014), a precisão do alcance das diferenças frações granulométricas aumentou, conforme apresentado na Figura 89. Com essa adaptação proposta, a porcentagem de ensaios que tiveram a precisão considerada satisfatória para a areia média no sentido transversal passou de 0 para 75%; de areia fina no sentido longitudinal passou de 11% para 78%; de areia fina no sentido transversal passou de 0 para 88%; de areia muito fina no sentido longitudinal passou de 0 para 83%. A precisão para a fração de areia média no sentido longitudinal e de areia muito fina para o sentido transversal não tiveram suas precisões alteradas pois, para estes casos o coeficiente de ajuste proposto corresponde a um.

Figura 89 – Precisão da equação modificada de Ganti, Lamb e McElroy (2014) para diferentes frações granulométricas



Fonte: Autor (2023)

Explorando mais a equação corrigida do alcance (Equação 14) nas duas direções analisadas, relacionou-se o alcance longitudinal (A_{lx}) e transversal (A_{ly}), de forma a estabelecer o fator de forma do depósito (FFD) a partir de condições propostas na Equação 12, isto é, características hidrodinâmicas e geométricas da corrente de turbidez e características do grão. Desta forma, ao dividir A_{lx} por A_{ly} e realizando as substituição e simplificação necessárias, obteve-se a Equação 16.

$$\frac{A_{lx}}{A_{ly}} = \text{FFD} = \frac{\left(\frac{d}{D_{\text{areia média}}} \cdot \frac{u_x \cdot h_s}{w_s}\right)}{\left(\frac{d}{D_{\text{areia muito fina}}} \cdot \frac{u_y \cdot h_s}{w_s}\right)} = \frac{\left(\frac{u_x}{D_{\text{areia média}}}\right)}{\left(\frac{u_y}{D_{\text{areia muito fina}}}\right)} = \frac{D_{\text{areia muito fina}} \cdot u_x}{D_{\text{areia média}} \cdot u_y}$$

$$\text{FFD} = \frac{D_{\text{areia muito fina}} \cdot u_x}{D_{\text{areia média}} \cdot u_y} = \frac{6,25 \times 10^{-5} \cdot u_x}{2,5 \times 10^{-4} \cdot u_y}$$

$$\text{FFD} = \frac{u_x}{4 \cdot u_y} \quad \text{Equação 16}$$

Onde:

u_x é a velocidade média da corrente de turbidez na direção longitudinal ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$);

u_y é a velocidade média da corrente de turbidez na direção transversal ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$).

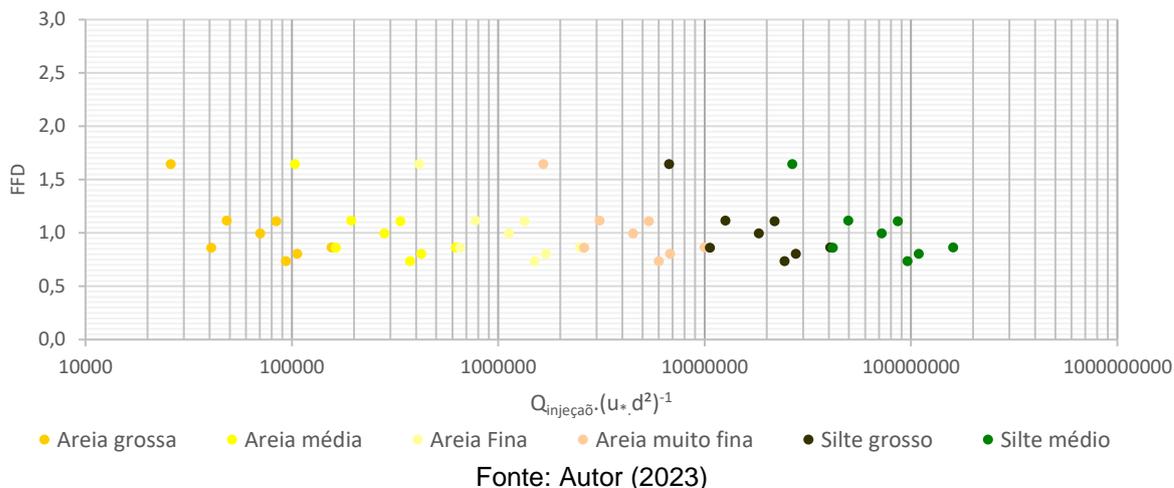
Com o objetivo de tornar visual as relações entre as características do fluxo com o fator de forma do depósito (FFD), para diferentes frações granulométricas, relacionou-se diferentes parâmetros hidrodinâmicos, geométricos e dos grãos visando observar alguma tendência de comportamento. Assim, após diversas tentativas de associações desses parâmetros que caracterizam o fluxo para determinação do FFD, obteve-se que, relacionando a vazão de injeção ($Q_{\text{injeção}}$) combinada com a velocidade de cisalhamento (u^*) e o diâmetro do grão (d), é possível mensurar o fator de forma do depósito (FFD) para diferentes frações granulométricas, conforme apresentado na Figura 90. Na Tabela 23 são apresentados os valores da velocidade de cisalhamento (obtidos por meio do emprego da Equação 3) e a vazão de injeção utilizados.

Tabela 23 – Alturas de sedimentação e velocidades médias do fluxo empregadas no cálculo do alcance da partícula

	EA 15	EA 30	EA 45	EB 10	EB 15	EC 2	EC 3	EC 5
u^* ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	0,0386	0,0412	0,0192	0,0319	0,0734	0,0356	0,0426	0,0282
Q ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)	$2,5 \cdot 10^{-4}$	$5,0 \cdot 10^{-4}$	$7,5 \cdot 10^{-4}$					

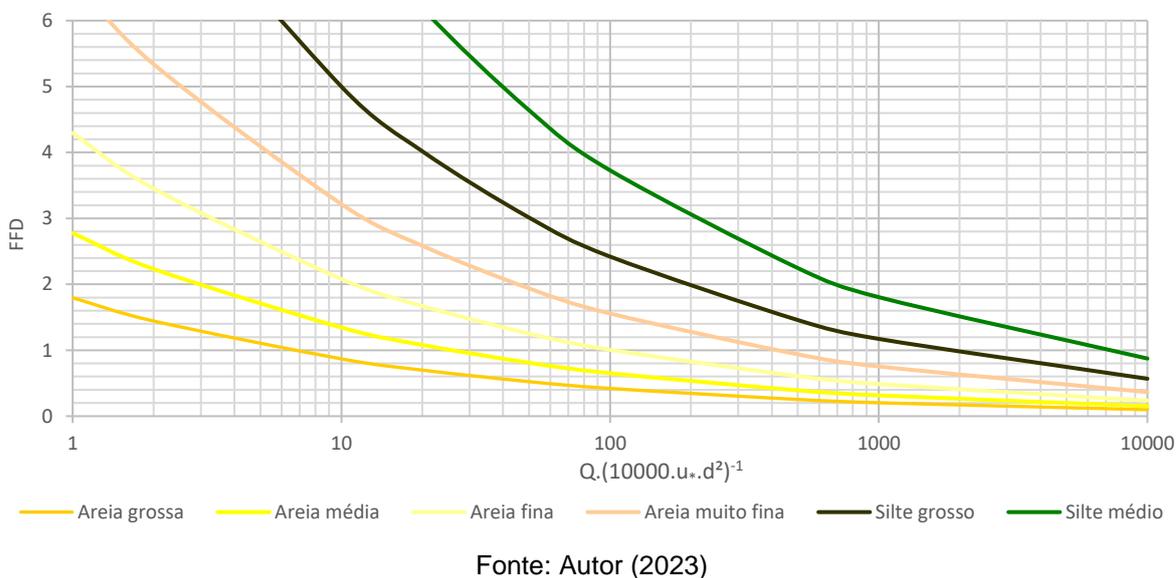
Fonte: Autor (2023)

Figura 90 – Relação entre as características hidrodinâmicas do fluxo e o fator de forma do depósito (FFD) para diferentes classes granulométricas



Por meio da inserção e prolongamento da linha de tendência, para cada fração granulométrica, nos dados da Figura 90, e da divisão dos dados da abscissa por 10000, apenas para redução da escala do eixo, obtive o diagrama da Figura 91.

Figura 91 – Diagrama FFD para diferentes frações granulométricas em função das características do fluxo



Ao verificar a precisão do diagrama proposto na Figura 91, com os valores do fator de forma do depósito medidos nos diagramas de cerca deste trabalho (Tabela 24), obteve-se precisão considerada satisfatória (entre 75% e 125%) em 81% dos resultados (com um mínimo de 84% e máximo em 124% de precisão). Apenas em quatro resultados, os valores não corresponderam ao satisfatório. Destes quatro, dois

foram muito próximos do intervalo considerado (73% até 127%), enquanto outros dois apresentaram valores bem abaixo (~ 40%), no ensaio de mais baixa concentração entre todos os experimentos. Quando essa verificação de precisão relaciona os dados do referido diagrama com os valores de FFD obtidos na Equação 16, proposta nesse trabalho (fórmula corrigida), houve precisão satisfatória em 100% dos resultados, com um mínimo de 79% e máximo de 124% de precisão.

Tabela 24 – Precisão do diagrama proposto em relação a equação de Ganti, Lamb e McElroy corrigida e, também, pelas medições obtidas no diagrama de cerca (as células em verde são as que apresentaram resultado satisfatório e, as em vermelho, não satisfatório)

Ensaio	Material analisado	Diagrama proposto	FFD		Precisão do diagrama proposto	
			Fórmula corrigida	Medido no diagrama de cerca	Fórmula corrigida	Medido no diagrama de cerca
EA 15	Areia muito fina	1,3	1,6	1,4	79%	93%
	Areia média	1,1	1,1	1,5	98%	73%
EA 30	Areia fina	1,1	1,1	1,1	98%	100%
	Areia muito fina	1,1	1,1	1,3	98%	84%
EA 45*	Areia média	0,8	0,9	0,9	88%	84%
	Areia fina	0,8	0,9	0,9	88%	84%
	Areia muito fina	0,8	0,9	0,9	88%	84%
EB 1	Areia média	0,7	0,9	1,9	80%	39%
	Areia fina	0,7	0,9	1,8	79%	41%
EB 10	Areia média	0,9	0,7	1,0	121%	89%
	Areia fina	0,9	0,7	0,7	116%	121%
	Areia muito fina	0,9	0,7	0,9	121%	99%
EB 15	Areia média	1,1	0,9	1,2	124%	89%
	Areia fina	1,1	1,2	0,9	95%	122%
	Areia muito fina	1,1	0,9	1,2	123%	88%
EC 2	Areia média	0,9	1,1	0,7	79%	124%
	Areia fina	0,9	1,1	1,0	83%	92%
EC 3	Areia média	0,9	1,0	0,7	89%	127%
	Areia fina	0,9	1,0	0,7	85%	121%
EC 3	Areia média	0,9	0,8	0,7	106%	122%
	Areia fina	0,9	0,8	0,7	106%	107%

* O ensaio EA 45 também pode ser enquadrado nas etapas 4 e 5 com a denominação de EB 5 e EC 4, respectivamente.

Fonte: Autor (2023)

A fim de confirmar a metodologia proposta para a aplicação do diagrama proposto do FFD em função das características do fluxo (Figura 91), foi utilizado o trabalho experimental de Wilkin et al. (2023), o qual apresenta todos os parâmetros necessários para serem aplicados no diagrama proposto neste trabalho. Verificou-se que o diagrama proposto apresentou precisão considerada satisfatória em 70% dos resultados (Tabela 25), mesmo trabalhando com sedimentos diferentes do usado no presente trabalho; tanque empregado no ensaio apresentar dimensões menores

(região desconfinada apresenta dimensões de 175 x 152 cm, do presente trabalho é de 350 x 300 cm) e; declividade do leito da região confinada entre 0 e 10° (o presente trabalho foi de 2 a 5°). Diante de tais resultados, o presente estudo considera que o Diagrama FFD para diferentes frações granulométricas em função das características do fluxo fornece satisfatória aplicação em pesquisas que envolvam correntes de turbidez.

Tabela 25 – Precisão do diagrama proposto para determinação do FFD para diferentes frações granulométricas em função das características do fluxo, aplicado aos dados de Wilkin et al. (2023)

Ensaio	Q (m ³ /h)	Q (m ³ /s)	u. (m/s)	d (m)	$Q/(10000 \cdot u \cdot d^2)$	FFD (diagrama)	FFD (medido)	Precisão
R1.1	13,02	3,62×10 ⁻³	0,0549	1,05×10 ⁻⁴	600,81	2,13	2,92	73%
R1.2	12,07	3,35×10 ⁻³	0,0588	1,05×10 ⁻⁴	520,03	2,23	2,91	77%
R1.3	12,81	3,56×10 ⁻³	0,0619	1,05×10 ⁻⁴	524,27	2,22	2,68	83%
R1.4	12,80	3,56×10 ⁻³	0,0644	1,05×10 ⁻⁴	503,52	2,25	2,39	94%
R2.1	12,70	3,53×10 ⁻³	0,0538	1,05×10 ⁻⁴	598,02	2,13	3,02	71%
R2.2	12,71	3,53×10 ⁻³	0,0568	1,05×10 ⁻⁴	566,88	2,17	3,16	69%
R2.3	12,64	3,51×10 ⁻³	0,0576	1,05×10 ⁻⁴	555,93	2,18	2,92	75%
R2.4	12,74	3,54×10 ⁻³	0,0610	1,05×10 ⁻⁴	529,10	2,22	2,70	82%
R3.1	13,87	3,85×10 ⁻³	0,0555	1,05×10 ⁻⁴	633,11	2,09	3,15	66%
R3.2	13,60	3,78×10 ⁻³	0,0629	1,05×10 ⁻⁴	547,75	2,19	2,91	75%

Fonte: Wilkin et al. (2023); Autor (2023)

Por meio das formas apresentadas para determinação do alcance dos grãos (longitudinal e transversal), é possível melhorar a caracterização dos depósitos, através dos dados do fluxo ainda na região confinada (cânions). Com isso, contribuir com o entendimento não só do lobo turbidítico, mas também da hidrodinâmica da corrente de turbidez que o gerou. Com essa metodologia, espera-se auxiliar com o cálculo da área dos lobos em ambientes naturais e, em conjunto com dados de sondagem, auxiliar indiretamente na estimativa da porosidade.

10 CONCLUSÃO

Por meio da simulação física e, variando os parâmetros de entrada (vazão e concentração volumétrica) e as configurações do tanque de ensaio (presença de quebra de declividade entre o trecho confinado e desconfinado e, da declividade do leito da região confinada), foi possível observar as mudanças que ocorreram no desenvolvimento das correntes de turbidez e nos depósitos. Com isso, chegou-se a oito modelos fluxo-depósitos (Figura 86 e Figura 87), os quais possibilitam enriquecer a caracterização hidrodinâmica das correntes de densidade, não só na transição canal-lobo, objetivo geral desta pesquisa, mas também na região confinada e distais do desconfinamento.

A hipótese do trabalho, que foi avaliar a possibilidade de estimar o fator de forma do depósito por meio das características da corrente de turbidez na região confinada, foi atendida de duas diferentes maneiras. A primeira foi através da sugestão de correção da fórmula de Ganti, Lamb e McElroy (2014), a qual após as adaptações propostas possibilita estimar com melhor precisão o alcance longitudinal e transversal das partículas suspensas nas correntes de turbidez. A segunda proposta foi a de determinação do fator de forma do depósito (FFD) através da proposição de um diagrama que relaciona a vazão de injeção, velocidade de cisalhamento e diâmetro da partícula. Assim, obteve-se valores de FFD para diferentes classes granulométricas, com precisões acima de 75% em mais de 70% dos dados analisados e comparados com a literatura. Assim, espera-se que esta forma de representação possa ser aplicada em novos trabalhos e, com isso, auxiliar na avaliação de características dos depósitos em laboratório e no campo, tal como estimativa das suas dimensões.

Devido à identificação da transição do regime supercrítico para o subcrítico, há indícios de possível formação de ressalto hidráulico na região da zona de transição do canal-lobos, mesmo sem a identificação do processo erosivo a montante e, deposicional a jusante. Acredita-se que, se o leito da região confinada e desconfinada fosse móvel, e se a granulometria do sedimento empregado na mistura que foi injetada fosse maior, haveria maior possibilidade de identificação das características dos ressaltos nessa região. Recomenda-se que esse ponto seja melhor estudado no futuro.

Neste trabalho foi implementado uma metodologia de simulação tridimensional de correntes de densidade na zona de transição de um canal – lobos que permitiu a medição de parâmetros como velocidade longitudinais e transversais, concentração volumétrica em diferentes pontos da região dos lobos. Além disso, foi desenvolvido uma técnica de coleta de amostras em diferentes alturas da corrente de turbidez, o que permitiu realizar a concentração por meio de camadas e determinação da granulometria destas. Esta forma de análise foi comparada com medições realizadas pelo equipamento UHCM e, devido à similaridade dos resultados, teve suas medições validadas. Diante disso, o procedimento de medição de concentração ao longo da vertical pode ser aplicado em outros experimentos.

Neste trabalho, devido à forma em que realizou as medições das velocidades de avanço e expansão da corrente, foi possível observar que os valores destas velocidades apresentam diferenças, ou seja, o ângulo de abertura/expansão não foi de 45° , conforme adotado em algumas publicações, como a de Spsychala et al. (2020) e observada por Luthi (1981). Com os experimentos realizados nesta pesquisa, o ângulo de expansão variou de 12° a 17° , em função dos parâmetros adotados inicialmente. Diante disso, recomenda-se que na região proximal ao desconfinamento seja realizada pelo menos uma medição de velocidade longitudinal e transversal, para determinação do ângulo de expansão da corrente.

Sugere-se a continuação desse estudo, na presença de leito móvel, para análise da possível formação de ressalto hidráulico e avaliação de possíveis mudanças nas características hidrodinâmicas das correntes de turbidez. Recomenda-se, também, a realização de ensaios com maiores vazões (acima de $45 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$) para avaliação de mudanças geradas nos fatores de forma da corrente de depósito. A realização de experimentos com declividade do leito da região confinada acima de 5° também se faz necessária, para que sejam melhor analisados os efeitos deste parâmetro na geração dos depósitos.

Por fim, os resultados desta pesquisa podem servir de dados de entrada para calibração de modelos numéricos e para avançar no entendimento dos lobos turbidíticos identificados no campo.

11 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALEXANDER, J. et al. Laboratory sustained turbidity currents form elongate ridges at channel mouths. **Sedimentology**, [s. l.], n. 55, p. 845–868, 2008.

AZPIROZ-ZABALA, M. *et al.* Newly recognized turbidity current structure can explain prolonged flushing of submarine canyons. **Science Advances**, [s. l.], n. 3, p. 1-12, 4 out. 2017.

BAAS, J. H. Processes and products of turbidity currents entering soft muddy substrates - Appendix: upscaling of experimental to natural turbidity currents. **Geology**, v. 42, n. 5, p. 371-374, May 2014.

BIZZI, L. A. et al. **Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil**: texto, mapas e SIG. [S. l.]: CPRM, 2003.

BOFFO, Carolina Holz et al. Medical ultrasound used for hydrodynamics study and eroded surface mapping in physical modeling of turbidity currents. In: **International Association for Hydro-Environment Engineering and Research**. World Congress (38: Set. 2019: Cidade do Panamá). Proceedings of the 38th IAHR World Congress. Panamá: IAHR, 2019. 2019.

BOFFO, C. H. **Origem e formação dos canyons submarinos**: atuação de correntes de densidade e fluxo de surgência. Orientador: A. L. O. Borges. 2017. 74 p. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - UFRGS, Porto Alegre, 2017.

BOFFO, C. H. **Caracterização física de correntes de densidade em ambientes salinos sob diferentes contrastes de densidade**. Orientador: A. L. O. Borges. 2010. 141 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - UFRGS, Porto Alegre, 2010.

BOUMA, A. H. Introduction to Submarine Fans and Related Turbidite Systems. In: BOUMA, A. H.; BARNES, W. (ed.). **Submarine Fans and Related Turbidite Systems**. Nova York: Springer-Verlag, 1985. cap. 1, p. 3-6.

BRITO, D. U. **Efeitos das escalas de simulação sobre os padrões deposicionais de fluxos turbidíticos**. Orientador: A. L. O. Borges. 2005. 115 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - UFRGS, Porto Alegre, 2005

BRITTER, R. E.; LINDEN, P. F. The motion of the front of a gravity current travelling down an incline. **Journal of Fluid Mechanics**, [S. l.], v. 99, p. 531-543, 1980.

BUFFON, P. **Aplicabilidade dos conceitos de competência do escoamento e de capacidade de transporte às correntes de turbidez**. Orientador: A. L. O. Borges. 2018. 163 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - UFRGS, Porto Alegre, 2018.

CASTRO, C. **Propriedades reológicas de misturas utilizadas em simulação física de correntes de turbidez**. Orientador: A. L. O. Borges. 2016. 100 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - UFRGS, Porto Alegre, 2016.

CERQUEIRA, A. C. **Avaliação dos efeitos de obstáculos no controle de correntes de turbidez**. Orientador: R. Manica. 2020. 93 p. Plano de dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - UFRGS, Porto Alegre, 2020.

DALY, R. A. Origin of submarine canyons. **American Journal of Science**, [s. l.], ed. 31, p. 401-420, jun. 1936.

DEL REY, A. C. **Simulação Física de Processos Gravitacionais Subaquosos: uma aproximação para o entendimento da sedimentação marinha profunda**. Orientador: C. M. S. Scherer. 251 p. Tese (Doutorado em Geociências) - UFRGS, Porto Alegre, 2006.

DUCKER, R. E. **Avaliação da capacidade portante de frações finas nas correntes de turbidez**. Orientador: L. E. S. B. Almeida. 2007. 101 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - UFRGS, Porto Alegre, 2007.

ETIENNE, S. et al. Multiple scale characterization of sand-rich distal lobe deposit variability: examples from the Annot Sandstones Formation, Eocene–Oligocene, SE France. **Sedimentary Geology**, v. 273, p. 1-18, 2012.

FABIAN, S. **Modelagem física de correntes de densidade conservativas em canal de declividade variável**. Orientador: A. L. O. Borges. 2002. 119 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - UFRGS, Porto Alegre, 2002.

FERGUSON, R. I.; CHURCH, M. A Simple Universal Equation for Grain Settling Velocity. **Journal of Sedimentary Research**, Chicago, v. 74, n. 6, p. 933–937, 2004.

FERREIRA, P. L. C. **Análise comparativa entre correntes de densidade e jatos**. Orientador: A. L. O. Borges. 2013. 107 p. Plano de dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - UFRGS, Porto Alegre, 2013.

FICK, C. **Modelagem física tridimensional de correntes de turbidez: caracterização espacial de depósitos análogos sob ação de controles autogênicos**. Orientador: E. E. Toldo Jr. 2015. 70 p. Dissertação (Mestrado em Geociências) - UFRGS, Porto Alegre, 2015.

FISCHER, R. V. Flow transformations in sediment gravity flows. **Geology**, [s. l.], v. 11, p. 273-282, 1983. GANTI, V.; LAMB, M. P.; MCELROY, B. Quantitative bounds on morphodynamics and implications for reading the sedimentary record. **Nature Communications** 5, [s. l.], n. 3298, 28 fev. 2014.

GANTI, V.; LAMB, M. P.; MCELROY, B. Quantitative bounds on morphodynamics and implications for reading the sedimentary record. **Nature Communications** 5, [s. l.], n. 3298, 28 fev. 2014.

GARCIA, M.; PARKER, G. Experiments on Hydraulic Jumps in Turbidity Currents Near a Canyon-Fan Transition. **Science**, [s. l.], v. 245, p. 393-396, jun. 1989.

GARDNER, J. V. et al. The morphology, processes, and evolution of Monterey Fan: A revisit. In: GARDNER, J.V.; FIELD, M. E.; TWICHELL, D. C. (ed.). **Geology of the United States' Seafloor: The view from GLORIA**. Nova York: Cambridge Univ. Press, 1996. cap. 12, p. 193-220.

GRAF, W. H. **Hydraulics of Sediment Transport**. Water Res. Publication, 513 p, 1971.

GRAY, T. E.; ALEXANDER, J.; LEEDER, M. R. Quantifying velocity and turbulence structure in depositing sustained turbidity currents across breaks in slope. **Sedimentology**, [s. l.], n. 52, p. 467-488, 2005.

GRAY, T. E.; ALEXANDER, J.; LEEDER, M. R. Longitudinal flow evolution and turbulence structure of dynamically similar, sustained, saline density and turbidity currents. **Journal of Geophysical Research**, [s. l.], v. 111, p. 1-14, 2006.

GUIMARÃES, T. M. H. *et al.* Turbidity currents generating lobes: flow rate influence on 3D experiments without slope break. **Brazilian Journal of Geology**, [s. l.], v. 54, ed. 4, 2022.

GUIRRO, A. C. **Simulações físicas de correntes de turbidez: efeitos da variação do tamanho dos grãos e da vazão**. Orientador: L. E. S. B. Almeida. 2008. 177 p. Tese (Doutorado em Geociências) - UFRGS, Porto Alegre, 2008.

HELLER, V. Self-similarity and Reynolds number invariance in Froude modelling. **Journal of Hydraulic Research**, [s. l.], p. 293-309, 22 nov. 2016.

HEEZ, B. C. et al. The Northwest Atlantic Mid-Ocean Canyon. **Canadian Journal of Earth Sciences**, [s. l.], v. 6, p. 1441-1453, 1969.

HSU, S. K. et al. Turbidity Currents, Submarine Landslides and the 2006 Pingtung Earthquake off SW Taiwan. **Notes and Correspondence**, [s. l.], v. 19, n. 6, p. 767-772, 2008.

ISLAM, M. A.; IMRAN, J. Vertical structure of continuous release saline and turbidity current. **Journal of Geophysical Research**, [s. l.], v. 115, p. 1-14, 2010.

JEGOU, J. et al. Channel-mouth lobe complex of the recent Amazon Fan: The missing piece. **Marine Geology**, [s. l.], n. 252, p. 62-77, 2008.

KENYON, N. H. et al. Scour holes in a channel-lobe transition zone on the Rhône Cone. In: PICKERING, K. T. et al, (ed.). **Atlas of Deep Water Environments: Architectural style in turbidite systems**. London: Chapman & Hall, 1995. p. 212-215.

KOLLER, D. K. **Formas de fundo experimentais geradas por correntes de densidade salinas e de turbidez: Análise do escoamento e do leito móvel**.

Orientador: R. Manica. 2020. 266 p. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - IPH/ UFRGS, Porto Alegre, 2020.

KOLLER, D. K. **Estudo experimental de formas de fundo geradas por correntes de densidade salina em canal de fundo móvel**. Orientador: Dr. R. Manica. 2016. 133 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Instituto de Pesquisas Hidráulicas, UFRGS, Porto Alegre - RS, 2016.

KOMAR, P. D. Hydraulic Jumps in Turbidity Currents. **Geological Society of America Bulletin**, [s. l.], v. 82, p. 1477-1488, jun. 1971.

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

KNELLER, B. C. et al. Velocity structure, turbulence and fluid stresses in experimental gravity currents. **JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH**, [s. l.], v. 104, ed. C3, p. 5381-5391, 15 mar. 1999.

KUENER, P. H. Properties of turbidity currents of high density. Tulsa: **Society of Economic Paleontologists and Mineralogists**, [s. l.], n. 2, ed. Special Publication, p. 1-14, 1951.

KUENER, PH. H.; MIGLIORINI, C. I. Turbidity Currents as a Cause of Graded Bedding. **The Journal of Geology**, Chicago, v. 58, ed. 2, p. 91-127, mar. 1950.

KUENER, PH. H. Experiments in connection with Daly's hypothesis on the formation of submarine canyons. **Leidsche Geologische Mededeelingen**, [s. l.], v. 8, p. 327-351, 1937.

LOWE, D. R. 1979 **Sediment Gravity Flows: Their Classification and Some Problems of Applications to Natural Flow Deposits**. SEPM Spec. Public. N 27, p. 75-82.

LUTHI, S. Experiments on non-channelized turbidity currents and their deposits. **Marine Geology**, [s. l.], v. 40, p. M59-M68, 1981.

MACDONALD, R. G. et al. Flow patterns, sedimentation and deposit architecture under a hydraulic jump on a non-eroding bed: defining hydraulic-jump unit bars. **Sedimentology**, [s. l.], n. 56, p. 1346-1367, 2009.

MANICA, R. **Geração de corrente de turbidez de alta densidade: Condicionantes hidráulicos e deposicionais**. Orientador: A. L. O. Borges. 2009. 426 p. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - UFRGS, Porto Alegre - RS, 2009.

MANICA, R. **Modelagem física de correntes de densidade não conservativas em canal tridimensional de geometria simplificada**. Orientador: A. L. O. Borges. 2002. 161 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - UFRGS, Porto Alegre, 2002.

MÉTIVIER, F.; LAJEUNESSE, E.; CACAS, M. C. Submarine Canyons in the Bathub. **Journal of Sedimentary Research**, [s. l.], v. 75, n. 1, p. 6-11, 2005.

MOTTA, V. F. 1972. **Curso de Teoria da Semelhança**. Porto Alegre, Ed. UFRGS. 154 p.

MIDDLETON, G. V. Sediment deposition from turbidity currents. **Annual review of Earth and Planetary Sciences**, Ontario, Canada, v. 21, p. 89-114, 1993.

MIDDLETON, G. V. Experiments on density and turbidity currents: Deposition of sediment [Part 3]. **Canadian Journal of Earth Sciences**, Ottawa, Canadá, n. 4, p. 475-505, 1967.

MIDDLETON, G. V. Experiments on density and turbidity currents: Motion of the head [Part 1]. **Canadian Journal of Earth Sciences**, Ottawa, Canadá, n. 3, p. 523-546, 1966.

MIDDLETON, G. V. Small-Scale Models of turbidity currents and the criterion for auto-suspension. **Journal of Sedimentary Petrology**, [s. l.], v. 36, n. 1, p. 202-208, mar 1966b.

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, 1973. Cap. 11, p. 197-218.

MILLIMAN, J.D.; MEADE, R.H. World-Wide Delivery of River Sediment to the Oceans. **The Journal of Geology**, [s. l.], v. 91, p. 1-21, jan. 1983.

MULDER, T.; ETIENNE, S. Lobes in deep-sea turbidite systems: State of the art. **Sedimentary Geology**, [s. l.], n. 229, p. 75-80, 19 fev. 2010.

MULDER, T.; ALEXANDER, J. The physical character of subaqueous sedimentary density flows and their deposits. **Sedimentology**, [s. l.], n. 48, p. 269-299, 2001.

MUTTI, E. **Turbidite Sandstones**. San Donato Milanese: Agip, Istituto di Geologia, Università di Parma, 1992. 275 p.

MUTTI, E.; NORMARK, W. R. An Integrated Approach to the Study of Thrbidite Systems. In: WEIMER, P.; LINK, M. H. (ed.). **Seismic Facies and Sedimentary Processes of Submarine Fans and Turbidite Systems: Frontiers in Sedimentary Geology**. Nova York: Springer, 1991. cap. 4, p. 75-106.

MUTTI, E.; NORMARK, W. R. Comparing Examples of Modern and Ancient Turbidite Systems: Problems and Concepts. In: LEGGETT, J. K.; ZUFFA, G. G. **Marine Clastic Sedimentology**. Dordrecht: [s. n.], 1987. cap. 1, p. 1-38.

MUTTI, E.; RICCI LUCCHI, F. Le torbiditi dell'Appennino Settentrionale: introduzione all'analisi di facies. **Memorie della Società Geografica Italiana**, [s. l.], n. 11, p. 161-199, 1972.

NECOD. **Simulação física de correntes de alta densidade para análise da geometria externa de bolos turbidíticos e caracterização textural de seus depósitos**: Contrato Petrobrás/ FAURGS nº 0050.0013777.05.02. 2007. 63 p. Relatório final - IPH/ UFRGS, Porto Alegre, 2012.

NORMARK, W. R. Growth Patterns of Deep-Sea Fans. **The American Association of Petroleum Geologists Bulletin**, California, v. 54, n. 11, p. 2170-2195, nov. 1970.

PARKER, G. et al. Experiments on turbidity currents over an erodible bed. **Journal of Hydraulic Research**, Delf, v. 25, n. 1, p. 123-147, 1987.

PALANQUES, A. et al. Erosional and Depositional Patterns in the Valencia Mouth: An Example of a Modern Channel-Lobe Transition Zone. **Marine Geophysical Researches**, [s. l.], ed. 17, p. 503-517, 1995.

PARSONS, J. D. et al. The mechanics of marine sediment gravity flows. In: NITTROUER, Charles A. et al. **Continental margin sedimentation: from sediment transport to sequence stratigraphy**. Malden, USA: Wiley, 2007. p. 275-337.

PARSONS, J. D.; GARCIA, M. H. Similarity of gravity current fronts. **Physics of Fluids**, [s. l.], v. 10, n. 12, p. 3209-3213, dez 1998.

PETTINGILL, H. S. Global Overview of Deepwater Exploration and Production. In: WEIMER, P.; PETTINGILL, H. S.; NILSEN, T. H. (ed.). **Petroleum Systems of Deepwater Settings**. [S. l.]: Society of Exploration Geophysicists and European Association of Geoscientists and Engineers, 2004. p. 1-40.

PIPER, D. J. W.; SAVOYE, B. Processes of late Quaternary turbidity current flow and deposition on the Var deep-sea fan, north-west Mediterranean Sea. **Sedimentology**, [s. l.], v. 40, p. 557-582, 1993.

POHL, F. **Turbidity currents and their deposits in abrupt morphological transition zones**. Orientador: J.B.M. Middelburg. 2019. 216 p. Tese (Doutorado em Geociências) - Universidade de Utrecht, Utrecht, Holanda, 2019.

POHL, F. et al. Transport and Burial of Microplastics in Deep-Marine Sediments by Turbidity Currents. **Environmental Science Technology**, [s. l.], v. 54, ed. 7, p. 4180-4189, 2020.

POHL, F. et al. New flow relaxation mechanism explains scour fields at the end of submarine channels. **Nature Communications**, [s. l.], ed. 10, p. 1-8, set. 2019.

PONTOPOULOS, G. et al. Particle shape trends across experimental cohesive and non-cohesive sediment gravity flow deposits: Implications for particle fractionation and discrimination of depositional settings. **Sedimentology**, [s. l.], v. 69, p. 1495-1518, 2022.

PORTO, R. M. **Hidráulica Básica**. 4. ed. São Carlos - SP: EESC-USP, 2006. 540 p.

POSTMA, G.; NEMEC, W.; KLEINSPEHN, K. Large floating clasts in turbidites: a mechanism for their emplacement. **Sedimentary Geology**, Amsterdam, v. 58, p. 47-61, 1988.

PRELAT, Amandine et al. Intrinsic controls on the range of volumes, morphologies, and dimensions of submarine lobes. **Sedimentary Geology**, v. 232, n. 1-2, p. 66-76, 2010.

PRÉLAT, A.; HODGSON, D. M.; FLINT, S. S. Evolution, architecture and hierarchy of distributary deep-water deposits: a high-resolution outcrop investigation from the Permian Karoo Basin, South Africa. **Sedimentology**, [s. l.], n. 56, p. 2132–2154, 2009.

PUHL, E. **Morfodinâmica e condição de equilíbrio do leito sob a ação de correntes de turbidez**. Orientador: A. L. O. Borges. 2012. 178 p. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - UFRGS, Porto Alegre, 2012.

PUHL, E. **Parametrização de ensaios de simulação física de correntes de densidade**. Orientador: A. L. O. Borges. 2007. 140 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - UFRGS, Porto Alegre, 2007.

PYLES, D. R.; STRAUB, K. M.; GAGUEJANTE, J. G. Spatial variations in the composition of turbidites due to hydrodynamic fractionation. **Geophysical Research Letters**, [s. l.], v. 40, p. 3919-3923, 22 jul. 2013.

ROUSE, H. Modern conceptions of the mechanics of fluid turbulence. **American Society of Civil Engineers**, [s. l.], n. 102, p. 463–543, 1937.

SIMPSON, J. E. **Gravity Currents in the Environment and the Laboratory**, 2 ed. Cambridge University Press, 1987. 244p

SPYCHALA, Y. T. et al. The influence of basin setting and turbidity current properties on the dimensions of submarine lobe elements. **Sedimentology**, [s. l.], n. 67, p. 3471–3491, 2020.

STANBROOK, D. S.; BENTLEY, M. Practical turbidite interpretation: The role of relative confinement in understanding reservoir architectures. **Marine and Petroleum Geology**, [s. l.], v. 135, ed. 105372, 2022.

STEEL, E. et al. The role of buoyancy reversal in turbidite deposition and submarine fan geometry. **Geology**, [s. l.], n. 45, p. 35–38, 2017.

STEVENSON, C. J. et al. Reconstructing the sediment concentration of a giant submarine gravity flow. **Nature Communications**, [s. l.], n. 9, p. 1-7, 2018

WENTWORTH, C. K. A Scale of Grade and Class Terms for Clastic Sediments. **The Journal of Geology**, Chicago, v. 30, n. 5, p. 337-424, 1922.

WONGSAROJ, W. et al. Extended Short-Time Fourier Transform for Ultrasonic Velocity Profiler on Two-Phase Bubbly Flow Using a Single Resonant Frequency. **Applied Sciences**, [s. l.], v. 9, ed. 50, p. 1-21, 24 dez. 2018.

WYNN, R. B. et al. Characterization and recognition of deep-water channel-lobe transition zones. **AAPG Bulletin**, [s. l.], v. 86, n. 8, p. 1441-1462, ago 2002.

WILKIN, J. *et al.* The response of high density turbidity currents and their deposits to an abrupt channel termination at a slope break: Implications for channel-lobe transition zones. **Sedimentology**, [s. l.], n. 70, p. 1164-1194, 2023.

WINSEMANN, J. et al. Re-examining models of shallow-water deltas: Insights from tank experiments and field examples. **Sedimentary Geology**, [s. l.], n. 421, p. 1-19, jul. 2021.

XU, J. P. Normalized velocity profiles of field-measured turbidity currents. **Geology**, California, v. 38, n. 6, p. 563–566, 2010.

ZAKERI, A.; HOEG, K.; NADIM, F. Submarine debris flow impact on pipelines: Part I: Experimental investigation. **Coastal Engineering**, [s. l.], n. 55, p. 1209–1218, 2008.

APÊNDICE A – RESULTADO DO ENSAIO DE GRANULOMETRIA DOS CARVÕES 205, 210 E SEM RÓTULO

	Ref. da Amostra:	Amostra nº1	Amostra nº 2	Amostra nº 3	Amostra nº 4
		Carvão 205	Carvão 210	Carvão sem rótulo	Carvão 405
MÉTODO FOLK & WARD (μm)	MÉDIA (M_G):	50,136	162,555	34,332	33,780
	DESVIO PADRÃO (σ_G):	4,822	2,619	2,265	5,380
	ASSIMETRIA (Sk_G):	0,239	0,339	0,389	0,174
	CURTOSE (K_G):	1,020	1,122	1,208	1,062
MÉTODO FOLK & WARD (ϕ)	MÉDIA (M_2):	4,318	2,621	4,864	4,888
	DESVIO PADRÃO (σ_I):	2,270	1,389	1,179	2,428
	ASSIMETRIA (Sk_I):	0,239	0,339	0,389	0,174
	CURTOSE (K_G):	1,020	1,122	1,208	1,062
MÉTODO FOLK & WARD (Descrição)	MÉDIA:	Silte Muito Grosso	Areia Fina	Silte Muito Grosso	Silte Muito Grosso
	DESVIO PADRÃO:	Muito mal selecionado	Mal selecionado	Mal selecionado	Muito mal selecionado
	ASSIMETRIA:	Assimetria muito negativa	Assimetria muito positiva	Assimetria muito positiva	Assimetria muito negativa
	CURTOSE:	Mesocurtica	Leptocurtica	Leptocurtica	Mesocurtica
	D_5 (μm):	2,065	15,143	4,570	1,342
	D_{10} (μm):	5,007	39,116	9,802	3,084
	D_{16} (μm):	9,480	62,697	15,049	5,885
	D_{25} (μm):	18,361	90,970	21,993	11,715
	D_{50} (μm):	60,469	184,722	39,801	39,442
	D_{75} (μm):	148,205	317,497	59,185	101,477
	D_{84} (μm):	219,848	370,878	67,560	166,067
	D_{90} (μm):	289,003	411,462	74,722	257,915
	D_{95} (μm):	372,759	464,038	84,556	361,039
	(D_{90} / D_{10}) (μm):	57,720	10,519	7,623	83,639
	($D_{90} - D_{10}$) (μm):	283,996	372,345	64,920	254,831
	(D_{75} / D_{25}) (μm):	8,072	3,490	2,691	8,662
	($D_{75} - D_{25}$) (μm):	129,844	226,527	37,192	89,762
	D_5 (ϕ):	8,920	6,045	7,774	9,541
	D_{10} (ϕ):	7,642	4,676	6,673	8,341
	D_{16} (ϕ):	6,721	3,995	6,054	7,409

D ₂₅ (φ):	5,767	3,458	5,507	6,415
D ₅₀ (φ):	4,048	2,437	4,651	4,664
D ₇₅ (φ):	2,754	1,655	4,079	3,301
D ₈₄ (φ):	2,185	1,431	3,888	2,590
D ₉₀ (φ):	1,791	1,281	3,742	1,955
D ₉₅ (φ):	1,424	1,108	3,564	1,470
(D ₉₀ / D ₁₀) (φ):	0,234	0,274	0,561	0,234
(D ₉₀ - D ₁₀) (φ):	-5,851	-3,395	-2,930	-6,386
(D ₇₅ / D ₂₅) (φ):	0,478	0,479	0,741	0,515
(D ₇₅ - D ₂₅) (φ):	-3,013	-1,803	-1,428	-3,115
GRUPO TEXTURAL MAIOR	Lama	Areia	Lama	Lama
NOME DO SEDIMENTO	Silte arenoso	Areia Siltosa	Silte arenoso	Silte arenoso
% CASCALHO:	0,00	0,00	0,00	0,00
% AREIA:	48,85	84	20,4	37,52
% LAMA (SILTE+ARG):	51,15	16,00	79,60	62,48
% SILTE	42,70	14,15	75,09	50,29
% ARGILA:	8,45	1,85	4,51	12,19
% AREIA M GROSSA:	0,00	0,00	0,00	0,00
% AREIA GROSSA:	0,48	1,58	0,00	0,46
% AREIA MÉDIA:	12,57	35,45	0,00	9,95
% AREIA FINA:	16,03	27,50	0,04	10,26
% AREIA M FINA:	19,77	19,47	20,36	16,85
% SILTE GROSSO:	16,00	7,53	40,36	17,68
% SILTE MÉDIO:	12,21	3,29	22,08	14,57
% SILTE FINO:	8,82	1,98	9,03	10,65
% SILTE M FINO:	5,67	1,35	3,62	7,39
% ARGILA:	8,45	1,85	4,51	12,19

APÊNDICE B – DIMENSIONAMENTO DA MISTURA

A mistura utilizada nos ensaios foi composta de água e carvão. Na preparação desta, os valores de vazão, concentração volumétrica da mistura e duração de ensaio já haviam sido definidos. O volume de mistura a ser preparado foi calculado conforme equações 17, 18 e 19.

$$V_{\text{total}} = V_{\text{mistura}} + V_{\text{morto}} \quad \text{Equação 17}$$

Visto que:

$$V_{\text{mistura}} = Q_{\text{ensaio}} \times t_{\text{ensaio}} \quad \text{Equação 18}$$

Tem-se que:

$$V_{\text{total}} = Q_{\text{ensaio}} \times t_{\text{ensaio}} + V_{\text{morto}} \quad \text{Equação 19}$$

Onde:

V_{total} é o volume total de mistura a ser preparado;

V_{mistura} é o volume de mistura a ser utilizada no ensaio;

V_{morto} é o volume residual no reservatório, o qual é necessário para o funcionamento do agitador mecânico;

Q_{ensaio} é a vazão a ser empregada no ensaio;

t_{ensaio} é a duração prevista do ensaio.

Após definido o volume total a ser preparado, o volume e a massa de sedimentos, foram determinados por meio das equações 20 e 21.

$$V_{\text{sed}} = C \times V_{\text{total}} \quad \text{Equação 20}$$

$$M_{\text{sed}} = \rho_{\text{sed}} \times V_{\text{sed}} \quad \text{Equação 21}$$

Onde:

V_{sed} é o volume de sedimentos a ser adicionado para formar a mistura;

C é a concentração calculada da mistura;

M_{sed} é a massa de sedimentos a ser adicionado na mistura;

ρ_{sed} é a massa específica do carvão.

De posse do volume da mistura e dos sedimentos, o volume de água foi calculado conforme equação 22 e 23.

$$V_{\text{total}} = V_{\text{água}} + V_{\text{sed}} \quad \text{Equação 22}$$

$$V_{\text{água}} = V_{\text{total}} - V_{\text{sed}} \quad \text{Equação 23}$$

Onde:

$V_{\text{água}}$ é volume de água a ser adicionado na mistura

APÊNDICE C – VALORES DE CONCENTRAÇÃO DOS MEDIDORES A E C

Tabela 26 – Valores de concentrações obtidas nos medidores A e C: Etapa 3 - variação da vazão com quebra de declividade entre o trecho confinado e desconfinado; Etapa 4 - variação da concentração da mistura injetada; Etapa 5 - variação da inclinação do fundo do trecho confinado

Ensaio	Distância em relação ao início do desconfinamento (cm)	Altura da corrente (cm)	Medidor A (%)	Medidor C (%)	Dif. entre os medidores A e C	Relação entre medidor A e C
EA 15 (Etapa 3)	25	0,5	0,042	0,041	0,001	1,024
		1,0	0,041	0,042	-0,001	0,976
		2,5	0,038	0,047	-0,009	0,809
		5,0	0,020	0,022	-0,002	0,909
		10,0	0,023	0,022	0,001	1,045
		Média	0,028	0,030	-0,002	0,933
	100	0,5	0,131	0,150	-0,019	0,873
		1,0	0,079	0,079	0,000	1,000
		2,5	0,060	0,076	-0,016	0,789
		5,0	0,058	0,060	-0,002	0,967
		10,0	0,041	0,036	0,005	1,139
		Média	0,062	0,066	-0,004	0,939
	200	0,5	0,083	0,090	-0,007	0,922
		1,0	0,060	0,064	-0,004	0,938
		2,5	0,057	0,060	-0,003	0,950
5,0		0,041	0,038	0,003	1,079	
10,0		0,039	0,038	0,001	1,026	
Média		0,049	0,049	0,000	1,000	
300	0,5	0,064	0,072	-0,008	0,889	
	1,0	0,043	0,053	-0,010	0,811	
	2,5	0,026	0,039	-0,013	0,667	
	5,0	0,019	0,018	0,001	1,056	
	10,0	0,020	0,020	0,000	1,000	
	Média	0,026	0,030	-0,004	0,867	
EA 30 (Etapa 3)	25	0,5	0,248	0,260	-0,012	0,954
		1,0	0,184	0,166	0,018	1,108
		2,5	0,057	0,055	0,002	1,036
		5,0	0,045	0,054	-0,009	0,833
		10,0	0,025	0,027	-0,002	0,926
		Média	0,072	0,074	-0,002	0,973
	100	0,5	0,449	0,460	-0,011	0,976
		1,0	0,196	0,160	0,036	1,225
		2,5	0,080	0,097	-0,017	0,825
		5,0	0,071	0,060	0,011	1,183
		10,0	0,050	0,036	0,014	1,389
		Média	0,108	0,101	0,007	1,069
	200	0,5	0,321	0,231	0,090	1,390
		1,0	0,153	0,112	0,041	1,366
		2,5	0,121	0,083	0,038	1,458
5,0		0,068	0,073	-0,005	0,932	
10,0		0,052	0,057	-0,005	0,912	

Ensaio	Distância em relação ao início do desconfinamento (cm)	Altura da corrente (cm)	Medidor A (%)	Medidor C (%)	Dif. entre os medidores A e C	Relação entre medidor A e C
EA 45* (Etapa 3)	300	Média	0,102	0,087	0,015	1,172
		0,5	0,084	0,100	-0,016	0,840
		1,0	0,046	0,070	-0,024	0,657
		2,5	0,033	0,070	-0,037	0,471
		5,0	0,020	0,030	-0,010	0,667
		10,0	0,017	0,030	-0,013	0,567
		Média	0,029	0,047	-0,018	0,617
		25	0,5	0,290	0,300	-0,010
	1,0		0,205	0,196	0,009	1,046
	2,5		0,118	0,125	-0,007	0,944
	5,0		0,089	0,090	-0,001	0,989
	10,0		0,088	0,065	0,023	1,354
	Média		0,121	0,117	0,004	1,034
	100	0,5	0,600	0,690	-0,090	0,870
		1,0	0,307	0,241	0,066	1,274
		2,5	0,188	0,166	0,022	1,133
		5,0	0,113	0,094	0,019	1,202
		10,0	0,109	0,067	0,042	1,627
		Média	0,183	0,161	0,022	1,137
	200	0,5	0,466	0,270	0,196	1,726
		1,0	0,287	0,183	0,104	1,568
2,5		0,190	0,180	0,010	1,056	
5,0		0,086	0,106	-0,020	0,811	
10,0		0,081	0,055	0,026	1,473	
Média		0,154	0,128	0,026	1,203	
300	0,5	0,112	0,150	-0,038	0,747	
	1,0	0,081	0,119	-0,038	0,681	
	2,5	0,047	0,080	-0,033	0,588	
	5,0	0,029	0,054	-0,025	0,537	
	10,0	0,023	0,040	-0,017	0,575	
	Média	0,043	0,069	-0,026	0,623	
EB 1 (Etapa 4)	25	0,5	0,119	0,132	-0,013	0,902
		1,0	0,096	0,114	-0,018	0,842
		2,5	0,073	0,062	0,011	1,177
		5,0	0,044	0,036	0,008	1,222
		10,0	0,016	0,020	-0,004	0,800
		Média	0,054	0,052	0,002	1,038
	100	0,5	0,172	0,158	0,014	1,089
		1,0	0,136	0,131	0,005	1,038
		2,5	0,094	0,098	-0,004	0,959
		5,0	0,068	0,071	-0,003	0,958
		10,0	0,048	0,050	-0,002	0,960
		Média	0,083	0,084	-0,001	0,988
200	0,5	0,139	0,139	0,000	1,000	
	1,0	0,107	0,104	0,003	1,029	
	2,5	0,073	0,080	-0,007	0,913	
	5,0	0,064	0,053	0,011	1,208	

Ensaio	Distância em relação ao início do desconfinamento (cm)	Altura da corrente (cm)	Medidor A (%)	Medidor C (%)	Dif. entre os medidores A e C	Relação entre medidor A e C
EB 10 (Etapa 4)		10,0	0,042	0,031	0,011	1,355
		Média	0,070	0,064	0,006	1,094
	300	0,5	0,108	0,097	0,011	1,113
		1,0	0,073	0,080	-0,007	0,913
		2,5	0,050	0,041	0,009	1,220
		5,0	0,040	0,029	0,011	1,379
		10,0	0,019	0,017	0,002	1,118
		Média	0,045	0,039	0,006	1,154
	25	0,5	2,070	2,100	-0,030	0,986
		1,0	0,490	0,480	0,010	1,021
		2,5	0,330	0,330	0,000	1,000
		5,0	0,220	0,213	0,007	1,033
		10,0	0,200	0,220	-0,020	0,909
		Média	0,403	0,406	-0,003	0,993
	100	0,5	1,880	1,503	0,377	1,251
		1,0	1,067	1,040	0,027	1,026
		2,5	0,376	0,382	-0,006	0,984
		5,0	0,176	0,155	0,021	1,135
		10,0	0,140	0,110	0,030	1,273
		Média	0,424	0,379	0,045	1,119
200	0,5	0,586	0,461	0,125	1,271	
	1,0	0,330	0,346	-0,016	0,954	
	2,5	0,218	0,319	-0,101	0,683	
	5,0	0,179	0,164	0,015	1,091	
	10,0	0,142	0,105	0,037	1,352	
	Média	0,223	0,221	0,002	1,009	
300	0,5	0,140	0,181	-0,041	0,773	
	1,0	0,139	0,133	0,006	1,045	
	2,5	0,043	0,080	-0,037	0,538	
	5,0	0,038	0,050	-0,012	0,760	
	10,0	0,020	0,050	-0,030	0,400	
	Média	0,052	0,074	-0,022	0,703	
EB 15 (Etapa 4)	25	0,5	2,392	2,210	0,182	1,082
		1,0	1,016	0,992	0,024	1,024
		2,5	0,460	0,490	-0,030	0,939
		5,0	0,390	0,405	-0,015	0,963
		10,0	0,310	0,376	-0,066	0,824
		Média	0,597	0,609	-0,012	0,980
	100	0,5	2,077	1,833	0,244	1,133
		1,0	1,592	1,355	0,237	1,175
		2,5	0,453	0,518	-0,065	0,875
		5,0	0,253	0,291	-0,038	0,869
		10,0	0,145	0,173	-0,028	0,838
		Média	0,537	0,529	0,008	1,015
	200	0,5	0,685	0,651	0,034	1,052
		1,0	0,412	0,490	-0,078	0,841
		2,5	0,300	0,416	-0,116	0,721

Ensaio	Distância em relação ao início do desconfinamento (cm)	Altura da corrente (cm)	Medidor A (%)	Medidor C (%)	Dif. entre os medidores A e C	Relação entre medidor A e C
EC 2 (Etapa 5)		5,0	0,230	0,221	0,009	1,041
		10,0	0,120	0,130	-0,010	0,923
		Média	0,269	0,296	0,000	1,000
	300	0,5	0,162	0,244	-0,082	0,664
		1,0	0,128	0,160	-0,032	0,800
		2,5	0,072	0,094	-0,022	0,766
		5,0	0,051	0,074	-0,023	0,689
		10,0	0,022	0,061	-0,039	0,361
		Média	0,064	0,096	-0,032	0,666
		25	0,5	0,201	0,220	-0,019
	1,0		0,171	0,170	0,001	1,006
	2,5		0,103	0,110	-0,007	0,963
	5,0		0,082	0,070	0,012	1,171
	10,0		0,039	0,050	-0,011	0,780
	Média		0,093	0,094	-0,001	0,989
	100	0,5	0,310	0,440	-0,130	0,705
		1,0	0,293	0,236	0,057	1,242
		2,5	0,150	0,161	-0,011	0,932
		5,0	0,114	0,079	0,035	1,443
		10,0	0,044	0,033	0,011	1,333
		Média	0,136	0,127	0,009	1,071
	200	0,5	0,187	0,240	-0,053	0,779
		1,0	0,136	0,160	-0,024	0,850
		2,5	0,086	0,123	-0,037	0,699
5,0		0,073	0,080	-0,007	0,913	
10,0		0,049	0,050	-0,001	0,980	
Média		0,084	0,101	-0,017	0,832	
300	0,5	0,096	0,130	-0,034	0,738	
	1,0	0,068	0,100	-0,032	0,680	
	2,5	0,037	0,060	-0,023	0,617	
	5,0	0,030	0,040	-0,010	0,750	
	10,0	0,027	0,030	-0,003	0,900	
	Média	0,039	0,054	-0,015	0,722	
EC 3 (Etapa 5)	25	0,5	0,209	0,260	-0,051	0,804
		1,0	0,196	0,170	0,026	1,153
		2,5	0,110	0,090	0,020	1,222
		5,0	0,085	0,080	0,005	1,063
		10,0	0,046	0,050	-0,004	0,920
		Média	0,101	0,097	0,004	1,041
	100	0,5	0,370	0,350	0,020	1,057
		1,0	0,308	0,280	0,028	1,100
		2,5	0,170	0,180	-0,010	0,944
		5,0	0,111	0,100	0,011	1,110
		10,0	0,070	0,050	0,020	1,400
		Média	0,152	0,140	0,012	1,086
	200	0,5	0,214	0,250	-0,036	0,856
		1,0	0,186	0,180	0,006	1,033

Ensaio	Distância em relação ao início do desconfinamento (cm)	Altura da corrente (cm)	Medidor A (%)	Medidor C (%)	Dif. entre os medidores A e C	Relação entre medidor A e C
EC 5 (Etapa 5)		2,5	0,122	0,140	-0,018	0,871
		5,0	0,086	0,090	-0,004	0,956
		10,0	0,081	0,060	0,021	1,350
		Média	0,112	0,114	-0,002	0,982
	300	0,5	0,106	0,130	-0,024	0,815
		1,0	0,075	0,140	-0,065	0,536
		2,5	0,051	0,090	-0,039	0,567
		5,0	0,030	0,050	-0,020	0,600
		10,0	0,028	0,030	-0,002	0,933
		Média	0,044	0,056	-0,012	0,786
	25	0,5	0,341	0,314	0,027	1,086
		1,0	0,323	0,265	0,058	1,219
		2,5	0,198	0,244	-0,046	0,811
		5,0	0,129	0,166	-0,037	0,777
		10,0	0,108	0,066	0,042	1,636
		Média	0,173	0,178	-0,005	0,972
	100	0,5	0,730	0,706	0,024	1,034
		1,0	0,361	0,287	0,074	1,258
		2,5	0,190	0,222	-0,032	0,856
		5,0	0,147	0,141	0,006	1,043
		10,0	0,120	0,063	0,057	1,905
		Média	0,214	0,195	0,019	1,097
	200	0,5	0,534	0,277	0,257	1,928
		1,0	0,320	0,234	0,086	1,368
2,5		0,203	0,188	0,015	1,080	
5,0		0,096	0,129	-0,033	0,744	
10,0		0,091	0,052	0,039	1,750	
Média		0,171	0,143	0,028	1,196	
300	0,5	0,122	0,160	-0,038	0,763	
	1,0	0,113	0,118	-0,005	0,958	
	2,5	0,100	0,095	0,005	1,053	
	5,0	0,054	0,056	-0,002	0,964	
	10,0	0,045	0,051	-0,006	0,882	
	Média	0,072	0,077	-0,005	0,935	

* O ensaio EA 45 também pode ser enquadrado nas etapas 4 e 5 com a denominação de EB 5 e EC 4, respectivamente.

Fonte: Autor (2023)

APÊNDICE D – DIÂMETRO MÉDIO E D_{50} DO DEPÓSITO FORMADO NA REGIÃO CONFINADA

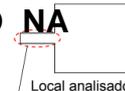
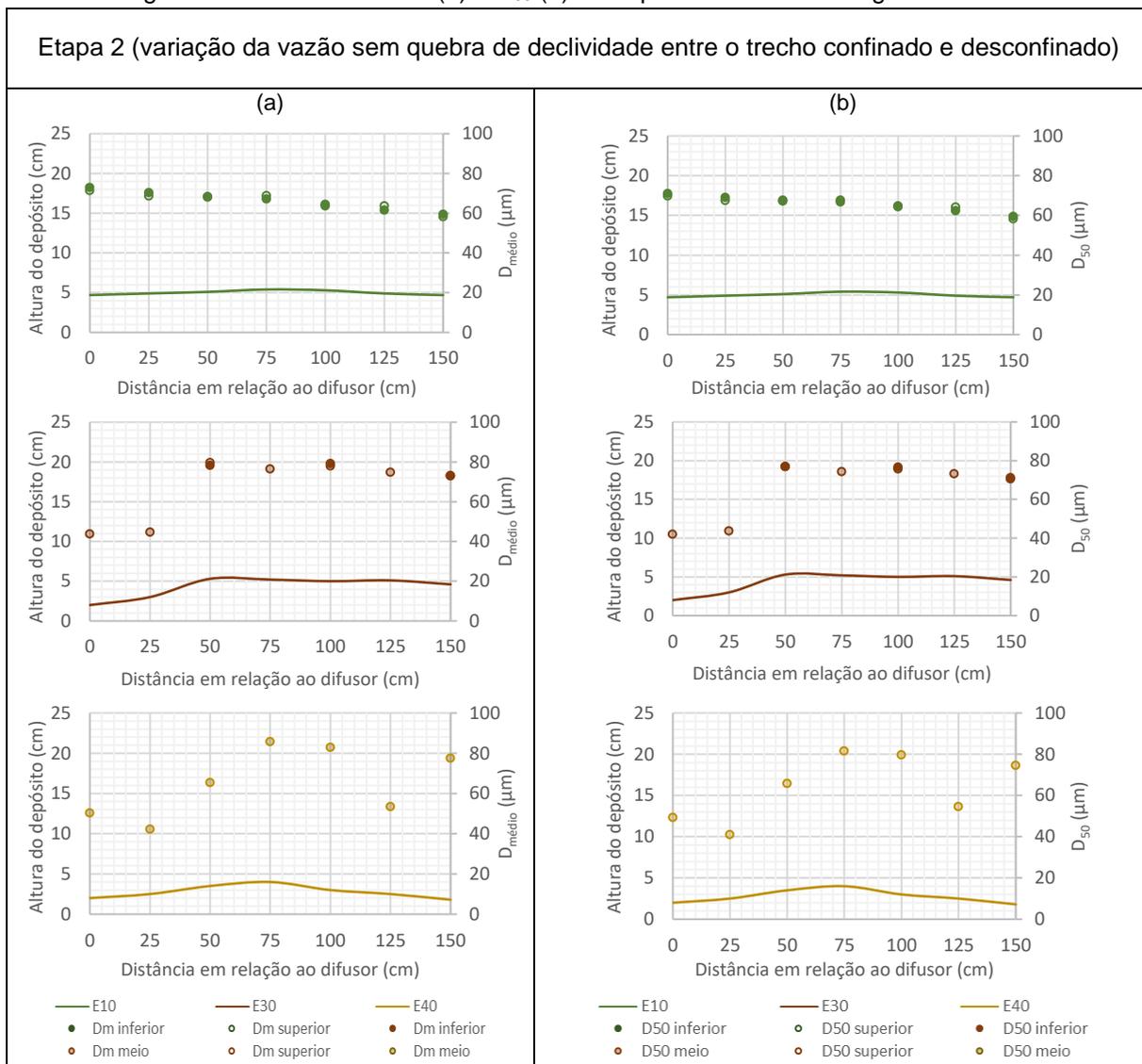
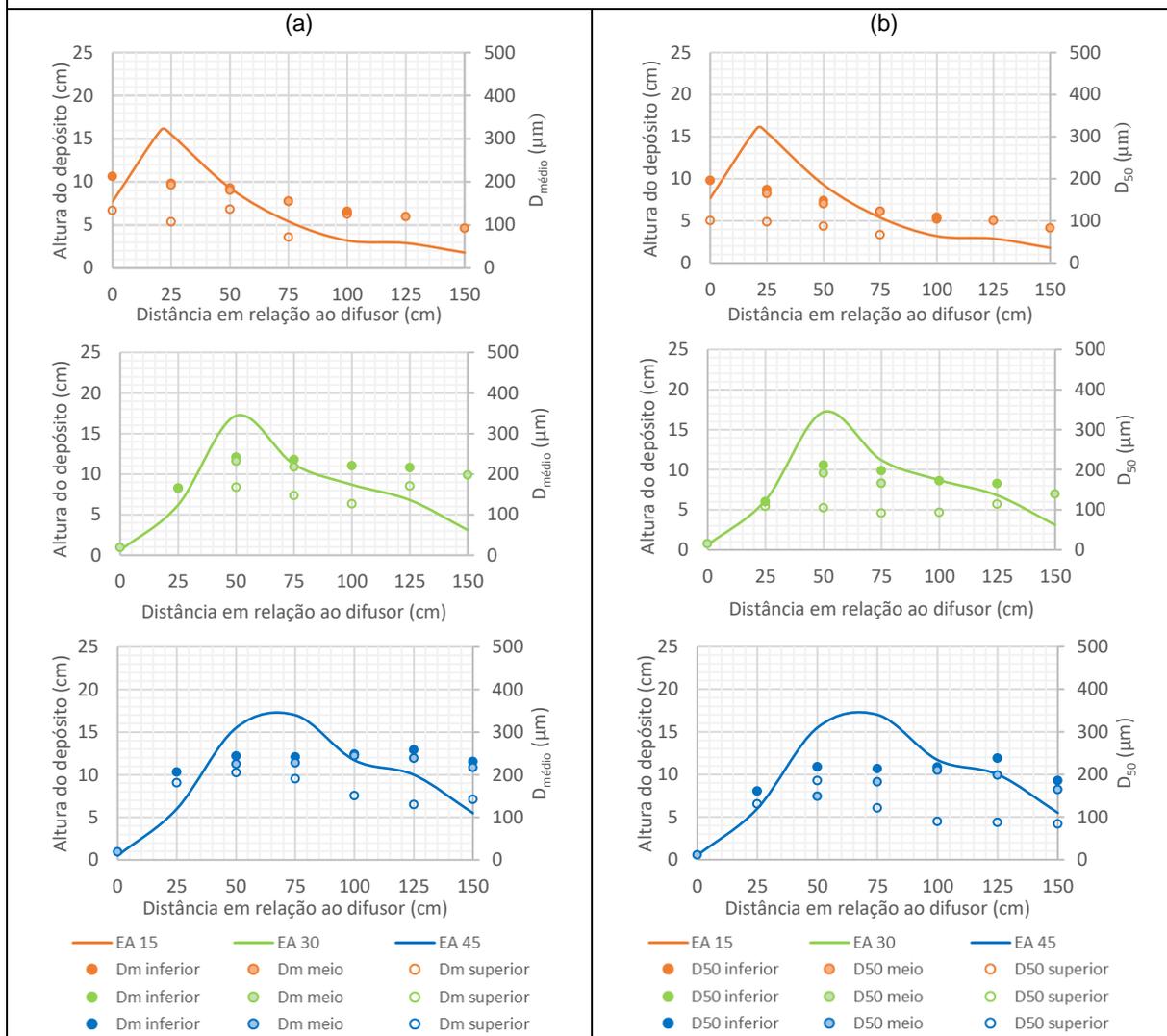


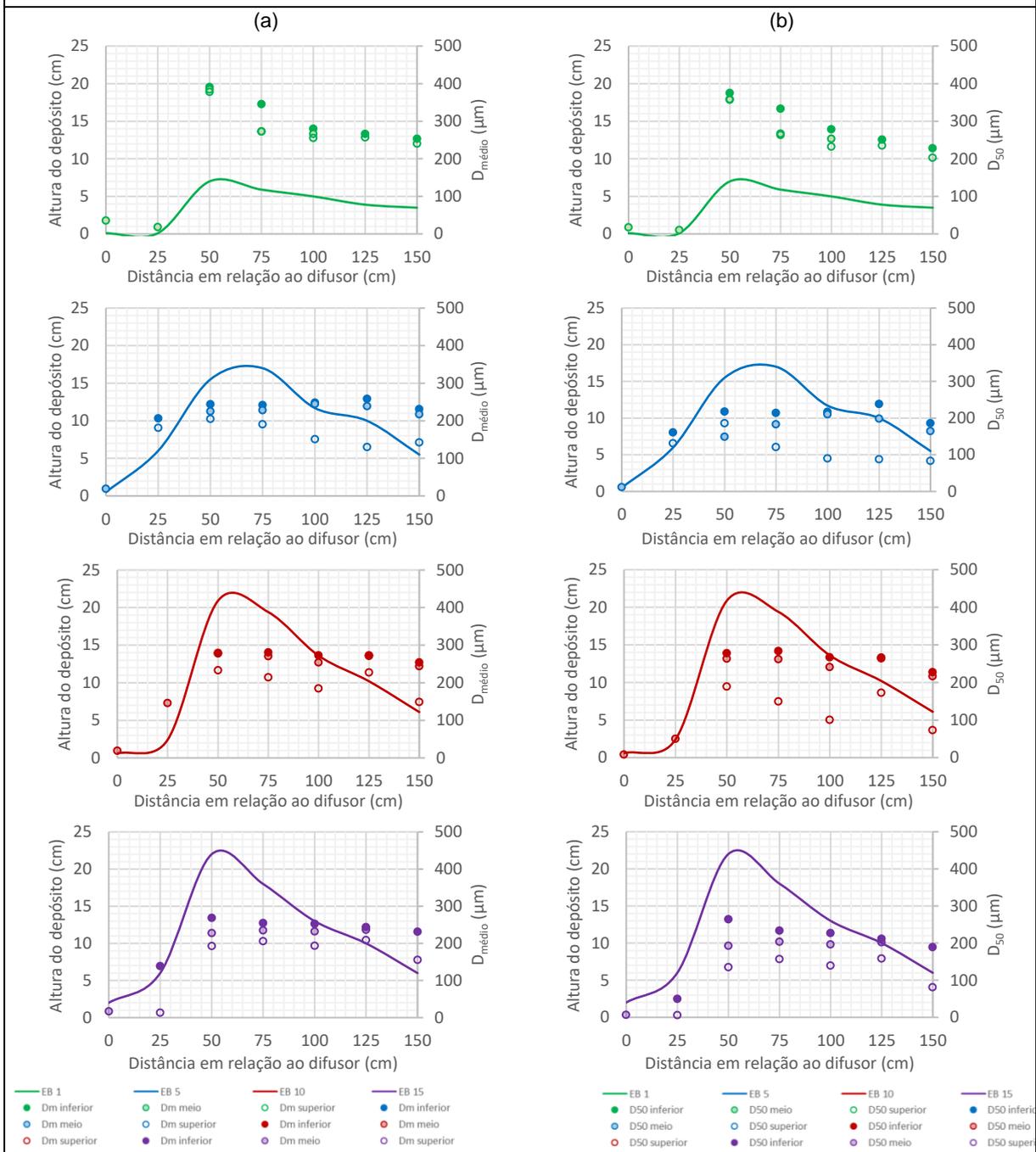
Figura 92 - Diâmetro médio (a) e D_{50} (b) do depósito formado na região confinada



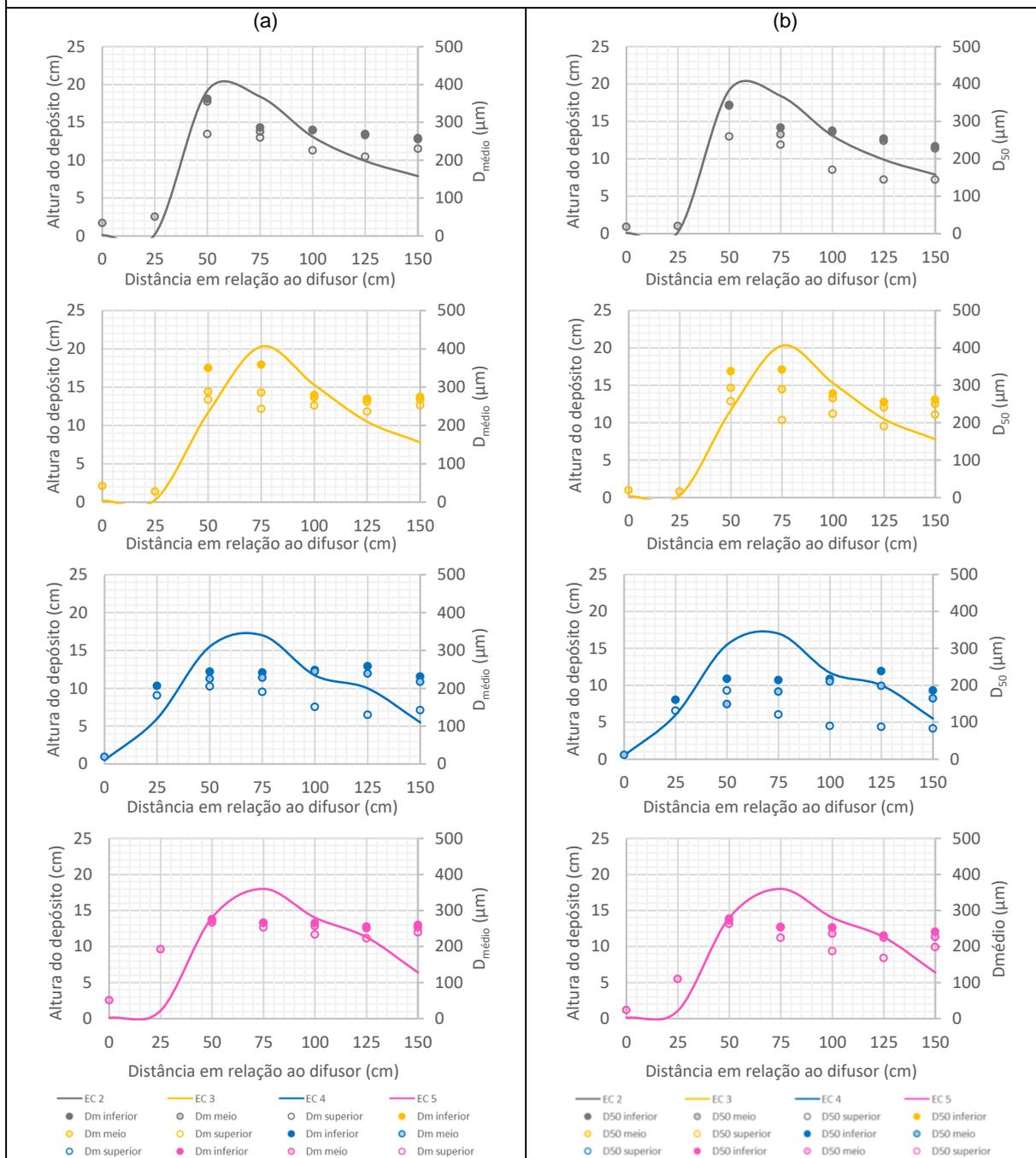
Etapa 3 - variação da vazão com quebra de declividade entre o trecho confinado e desconfinado



Etapa 4 - variação da concentração da mistura injetada



Etapa 5 (variação da inclinação do fundo do trecho confinado)



Fonte: Autor (2023)