

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

PATRICIA BUFFON

APLICABILIDADE DOS CONCEITOS DE COMPETÊNCIA DO ESCOAMENTO E
DE CAPACIDADE DE TRANSPORTE ÀS CORRENTES DE TURBIDEZ

PORTO ALEGRE

2018

PATRICIA BUFFON

APLICABILIDADE DOS CONCEITOS DE COMPETÊNCIA DO ESCOAMENTO E
DE CAPACIDADE DE TRANSPORTE ÀS CORRENTES DE TURBIDEZ

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

Orientadora: Prof^a Dr^a ANA LUIZA DE OLIVEIRA BORGES

Coorientador: Prof Dr RAFAEL MANICA

PORTO ALEGRE

2018

CIP - Catalogação na Publicação

Buffon, Patricia
APLICABILIDADE DOS CONCEITOS DE COMPETÊNCIA DO
ESCOAMENTO E DE CAPACIDADE DE TRANSPORTE ÀS CORRENTES
DE TURBIDEZ / Patricia Buffon. -- 2018.
163 f.
Orientador: Ana Luiza de Oliveira Borges.

Coorientador: Rafael Manica.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas
Hidráulicas, Programa de Pós-Graduação em Recursos
Hídricos e Saneamento Ambiental, Porto Alegre, BR-RS,
2018.

1. fluxos estratificados. 2. hidráulica fluvial.
3. modelagem física. 4. turbiditos. 5. assoreamento
de reservatórios. I. de Oliveira Borges, Ana Luiza,
orient. II. Manica, Rafael, coorient. III. Título.

PATRICIA BUFFON

APLICABILIDADE DOS CONCEITOS DE COMPETÊNCIA DO ESCOAMENTO E
DE CAPACIDADE DE TRANSPORTE ÀS CORRENTES DE TURBIDEZ

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

Aprovado em: Porto Alegre, 12 de março de 2018.

Prof^ª. Dr^ª Ana Luiza de Oliveira Borges – UJF université Joseph Fourier Grenoble I
Orientadora

Prof. Dr Rafael Manica – IPH UFRGS
Examinador

Prof. Dr Fernando Mainardi Fan – IPH UFRGS
Examinador

Dr^ª Renata dos Santos Alvarenga Kuchle – IGEO UFRGS
Examinadora

AGRADECIMENTOS

Não tenho palavras suficientes para agradecer ao grande número de pessoas que contribuíram para a realização desse trabalho, sem as quais ele não teria sido possível. Meu coração é pura gratidão a vocês.

Agradeço à minha orientadora, Professora Ana Luiza, que sempre me inspira ao transmitir a filosofia dos estudos em modelagem física do transporte de sedimentos. À orientação, dedicação e transmissão de conhecimento, meus eternos agradecimentos.

Ao meu coorientador, Professor Rafael Manica, agradeço pelas inúmeras oportunidades proporcionadas desde que ingressei no Neced.

Aos técnicos do laboratório, Cristian, Marcelo, Felipe e Pâmela, meus sinceros agradecimentos pelo auxílio durante o trabalho experimental, sem o qual a realização desse trabalho não teria sido possível.

Agradeço à Juliana e à Carolina pelas conversas, dicas compartilhadas e ajuda durante o desenvolvimento de diversas atividades desse trabalho.

Agradeço ao Bruno pelo desenvolvimento da rotina de cálculos que possibilitou a montagem das imagens de forma automatizada.

Aos colegas Camila, Cristiano, Richard, Débora, George e Lélis, agradeço pelo convívio durante essa e outras etapas. Também agradeço ao Professor Eduardo, Professor Brito e aos demais membros da equipe.

Aos que não vejo mais diariamente, mas que também foram fundamentais ao longo da minha trajetória nesse grupo, também agradeço! Ao Professor Maestri pelas inúmeras conversas, cafés e contribuições ao trabalho. À Eva, ao Farina, à Gislene e à Rose: saudades! À Michelle, pelas conversas divertidíssimas.

Agradeço ao Marco, ao Paulo e ao Tiago pelas trocas realizadas durante o andamento do Projeto Processos I, as quais culminaram na ideia de explorar a eficiência de transporte das correntes de turbidez neste trabalho.

Na figura dos excelentes professores que tive durante essa etapa, agradeço ao IPH e à UFRGS.

Agradeço à CAPES pela concessão da bolsa de estudos durante o mestrado.

Agradeço à minha família, pai, mãe, mana, Gui, mano, e vó Maria (*in memorian*), pelo apoio incondicional na busca dos meus sonhos e por tudo que me proporcionaram na vida! À Bibi, que sem nem ainda falar me arranca muitos sorrisos.

Agradeço ao William pela grande aventura do amor.

Agradeço à Juliana pela parceria de Hermanas.

Agradeço às minhas *roomies* Cathe e Cami pelo compartilhamento das nossas vidas durante essa etapa.

Agradeço às amigas que entre um encontro e outro ajudaram a tornar a vida mais divertida. Agradeço à galera da ambiental e ao Glauco e à Julia por também estarem presentes durante essa finaleira.

MUITO OBRIGADA!

RESUMO

Os conceitos de competência do escoamento e de capacidade de transporte foram desenvolvidos para escoamentos fluviais e acabam sendo transferidos para a modelagem de correntes de turbidez. No entanto, não é claro até que ponto o estabelecimento de analogias entre o ambiente fluvial e as correntes de turbidez pode ser realizado. Nesse contexto, o principal objetivo deste trabalho foi avaliar os conceitos de competência e de capacidade nas correntes de turbidez. O estudo foi desenvolvido experimentalmente, em um canal de inclinação variável de 4 m de comprimento, 40 cm de altura e 12 cm de largura. Um leito móvel foi construído em um trecho intermediário do canal utilizando sedimento - carvão mineral ($\rho = 1405 \text{ kg/m}^3$) - com tamanho areia média. No total, 30 simulações de correntes de turbidez contínuas foram realizadas, utilizando o mesmo sedimento, porém com tamanho areia muito fina. Foram simuladas três declividades diferentes (6%, 0,3% e 0,015%), vazões de injeção entre 15 e 25 l/min, concentrações iniciais variando entre 0,03% e 5,5% e a duração dos ensaios ficou compreendida entre 3 e 30 min. O levantamento do perfil longitudinal do leito móvel, antes e após o ensaio, foi realizado e todo o sedimento foi coletado. Três quantidades distintas de sedimento foram quantificadas: a quantidade depositada antes do leito móvel, a quantidade depositada no leito móvel e a quantidade depositada depois do leito móvel. O cálculo da eficiência de transporte das correntes de turbidez no trecho do leito móvel, bem como das suas descargas sólidas, foi realizado. Também foram realizadas análises granulométricas do sedimento depositado antes e após do leito móvel. Por fim, parâmetros do fluxo foram obtidos (altura e velocidade) através de análises visuais e números adimensionais clássicos do transporte sólido em canais abertos foram avaliados. A partir da interpretação dos dados, conclui-se que os conceitos de competência do 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. A relação entre a eficiência de transporte desses fluxos e a descarga sólida dos mesmos indicou que a partir de uma região a eficiência tornou-se invariante. Essa relação possui curvas com tendência logarítmica e as suas assíntotas ocorreram em valores de eficiência da ordem de 50% (inclinação de 6%) e de 40% (inclinações de 0,3% e 0,015%). A relação entre o diâmetro característico do sedimento depositado depois do leito e antes do leito indicou uma diminuição de cerca de 18% no tamanho dos grãos depositados a jusante.

Palavras –chave: fluxos estratificados, hidráulica fluvial, modelagem física, turbiditos, assoreamento de reservatórios.

ABSTRACT

The modeling of turbidity currents uses the concepts of competence and flow capacity that have been developed based on river hydraulics. However, the analogies between the fluvial environment and turbidity currents are not very clear. The main purpose of this study was to evaluate the competence and flow capacity of turbidity currents. The study was performed using an experimental channel 4 m long, 40 cm high, and 12 cm wide with variable slope. A mobile bed of medium sand-size - mineral coal ($\rho=1405 \text{ kg/m}^3$) - was constructed in an intermediate area of the channel. In total, 30 simulations of continuous turbidity currents were performed and the sediment used in the turbidity currents was very fine sand-size mineral coal. The simulations were accomplished considering three different channel slopes (6%, 0.3% e 0.015%); injection discharge varied between 15 and 25 l/min, and initial volumetric concentrations varied between 0.03% and 5.5%. The simulations lasted between 3 and 30 minutes. The longitudinal profile of the mobile bed was analyzed before and after each simulation, and all the sediment was collected at the end. Three different amounts of sediment were quantified: the amount of sediment deposited before, on, and after the mobile bed. Based on this data, both the transport efficiency and solid discharge of the turbidity current on the mobile bed were determined. Particle-size distribution of the deposited sediment before and after the mobile bed was also carried out. Finally, flow parameters were obtained (high and velocity) considering visual evaluation and the classical dimensional numbers in sediment transport in open channel flows were analyzed. The data interpretation revealed that the competence and flow capacity parameters were not able to reflect the grain diameter transported by the simulated currents and a maximum flow capacity of these flows, as usually is observed in fluvial flows. The relation between the transport efficiency and solid discharge of these flows demonstrated that after a certain point, the efficiency became constant. This relation resulted in log trend curves with asymptotes located at efficiency values of approximately 50% (6% slope) and 40% (0.3% and 0.015% slopes). The characteristic diameter of the sediment deposited after the mobile bed presented a reduction of 18% when compared to the sediment deposited before the mobile bed.

Keywords: stratified flows, river hydraulics, physical simulation, turbidites, reservoir sedimentation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1: Representação esquemática dos perfis de velocidade, concentração e tensão de cisalhamento de um escoamento em canal aberto e de uma corrente de turbidez. Fonte: adaptado de Manica (2009)..... 6
- Figura 2: Esquerda: Vórtice de Kelvin-Helmholtz em uma corrente de turbidez simulada em laboratório. Fonte: Boffo *et al* (2014). Direita: Vórtices de Kelvin-Helmholtz em uma pluma de sedimentos (fluxo homopical) no Golfo do México. Fonte: NASA's Earth Observatory (2009). Legenda: as setas vermelhas indicam o sentido do fluxo. 6
- Figura 3: Mudanças longitudinais do perfil de velocidade e de concentração de sedimentos, durante a transição de um escoamento à superfície livre para uma corrente de turbidez. Fonte: Chien e Wan (1999). 8
- Figura 4: O terremoto Grand Banks de 1929 e a subsequente quebra de cabos submarinos. As flechas indicam o local do rompimento dos cabos devido ao fluxo gravitacional de sedimentos proveniente do deslizamento, mostrando a defasagem temporal com que ocorreram e as suas distâncias à região do epicentro. O esquema também mostra a velocidade estimada do fluxo e o gradiente do fundo (1:20, 1:80...). Fonte: Hsü, 2004. 9
- Figura 5: Curva de Hjulström (1936) modificada por Sundbord (1956). Fonte: Hsü, 2004. 13
- Figura 6: Curva de Shields: a curva em destaque é a curva de início de movimento que resultou dos experimentos de Shields. Fonte: Shields (1936). 13
- Figura 7: Início do movimento (Shields, 1936) e início da suspensão, segundo van Rijn (1984) que expõe também as curvas de outros autores (Bagnold e Engelund). Onde: $D_* = D_{50}s - 1gv^{21/3}$, $u_{*,cr}$ = velocidade de cisalhamento crítica (m/s), $s = \rho_s/\rho$, D_{50} = diâmetro característico dos grãos (m), g = aceleração da gravidade local (m/s^2), ν = viscosidade cinemática (m^2/s^2), ρ_s = massa específica do sedimento (kg/m^3) e ρ = massa específica do fluido (kg/m^3). Fonte: van Rijn (1984). 15
- Figura 8: Interpretação geométrica das Tensões de Reynolds. Fonte: Leeder (1999). 16
- Figura 9: Gráfico adimensional da distribuição de sólidos em suspensão de Hunter Rouse. Onde: " n/n_a " é a concentração relativa em qualquer ponto, adimensionalizada

a partir da concentração em um nível de referência acima do leito, “a”; $d' = d - a$ é uma altura relativa que diminui de uma altura qualquer do escoamento “d” a altura de referência “a”, logo $a/d' = 0$ quando $d = a$; $(d'+a)/d$ representa a relação entre uma altura qualquer de escoamento “d'+a” e a altura total do escoamento “d”; $y = d$ e $y' = d'$. Fonte: Rouse (1937). 17

Figura 10: Relação entre os parâmetros π_1 e π_2 encontrada por Bordas, Borges e Medeiros (1988) para o transporte sólido fluvial. Fonte: Bordas, Borges e Medeiros (1988). 19

Figura 11: Relação entre a concentração de sedimentos no fluxo e o índice de intensidade do escoamento. Fonte: Chien e Wan (1999). 21

Figura 12: Diferentes vistas do experimento de Kuenen e Sengupta (1970). Acima: vista transversal; Abaixo, da esquerda para a direita: vista superior, vista transversal mostrando o posicionamento de uma pá e dos sifões, vista transversal no momento do ensaio. Fonte: Kuenen e Sengupta (1970). 22

Figura 13: Esquema experimental (vista longitudinal) de Parker *et al* (1987). Fonte: Parker *et al* (1987). 25

Figura 14: Gráfico do coeficiente E_s em função do parâmetro Z que por sua vez é especificado a partir dos parâmetros $\mu = u^*/\omega$ e $R_p = (Rgd)^{1/2}d/v$, da seguinte forma: $Z = \mu R_p^{0,75}$, onde: u^* é a velocidade de cisalhamento (m/s), $\omega =$ velocidade de queda do sedimento (m/s), $R = (\rho_s - \rho_a)/\rho_a$, $\rho_s =$ massa específica do sedimento (kg/m³), $\rho_a =$ massa específica do fluido ambiente (kg/m³), $g =$ aceleração da gravidade local (m/s²), $d =$ diâmetro do sedimento (m) e $v =$ viscosidade cinemática do fluido (m²/s). Fonte: Parker *et al* (1987). ... 27

Figura 15: Desenho esquemático do canal bidimensional de vidro – Fora de escala. Os números em vermelho indicam a distância em centímetros, a partir do início do canal. Créditos da ilustração: Carolina H. Boffo. 32

Figura 16: Detalhe da transição entre o fundo fixo e o leito móvel. 32

Figura 17: Difusor e tranquilizadores na entrada do canal. 33

Figura 18: Ponta linimétrica e suporte utilizado nas medições do perfil longitudinal do leito móvel. 34

Figura 19: Enquadramento das câmeras utilizado nas filmagens. 34

Figura 20: Curvas granulométricas do sedimento utilizado na composição do leito e da mistura. 37

Figura 21: Espátula confeccionada para padronizar a construção do leito móvel. 38

Figura 22: Desenho esquemático do canal, ressaltando a delimitação dos locais de coleta do sedimento.	40
Figura 23: Exemplo da leitura da altura da corrente realizada pela rotina de cálculos.	42
Figura 24: Desenho esquemático do cálculo do volume do depósito. Créditos da ilustração: Carolina H. Boffo.	43
Figura 25: Desenho esquemático da estimativa das descargas sólidas.	44
Figura 26: Relação da concentração volumétrica (CV) da mistura de injeção com a duração do ensaio.....	56
Figura 27: Relação entre o parâmetro α e o número de Froude densimétrico. Fonte: Chien e Wan (1999).....	67
Figura 28: Relação entre o diâmetro característico D50 do material transportado pela corrente de turbidez para depois do leito móvel (M3) e a velocidade média de avanço da corrente.	70
Figura 29: Relação entre o número adimensional D *do material transportado pela corrente de turbidez para depois do leito móvel (M3) e a velocidade média de avanço da corrente.	70
Figura 30: Relação entre o parâmetro de Shields e o número adimensional de Reynolds do grão para os dados experimentais desse trabalho e para a curva de início do movimento dos grãos formulada por Shields.....	71
Figura 31: Relação entre os parâmetros adimensionais π_1 e $\pi_2 \times \pi_3$ para os dados experimentais desse trabalho.	72
Figura 32: Relação entre o conjunto de variáveis de Bagnold e a descarga sólida.	73
Figura 33: Relação entre a velocidade média de avanço da corrente e a descarga sólida.	74
Figura 34: Relação entre a concentração de sedimentos (g/l) - Tabela 14 e o parâmetro de intensidade do escoamento (π_4) - Tabela 15 para os dados experimentais desse trabalho em comparação com aqueles apresentados por Chien e Wan (1999).	75
Figura 35: Relação da eficiência de transporte com a descarga sólida no início do leito móvel.....	76
Figura 36: Relação da eficiência de transporte com a descarga sólida no início do leito móvel.....	77

Figura 37: Relação da eficiência de transporte com a descarga sólida no início do leito móvel e as linhas de tendência ajustadas.	79
Figura 38: Relação da eficiência de transporte com o número de Froude densimétrico.	82
Figura 39: Relação da eficiência de transporte com o número de Froude densimétrico para os ensaios localizados na Zona assintótica.	82
Figura 40: Relação da eficiência de transporte com o número de Reynolds.	83
Figura 41: Relação da eficiência de transporte com a taxa de geração de depósito.	85
Figura 42: Relação da descarga sólida com a taxa de geração do depósito.	85
Figura 43: Relação da eficiência de transporte e da taxa de geração de depósito com a descarga sólida no início do leito móvel.	86
Figura 44: Relação da eficiência de transporte com a relação entre o diâmetro característico D90 do sedimento transportado para depois do leito móvel e do sedimento injetado no canal.	88
Figura 45: Relação da eficiência de transporte com a relação entre o diâmetro característico D50 do sedimento transportado para depois do leito móvel e do sedimento injetado no canal.	88
Figura 46: Relação da eficiência de transporte com a relação entre o diâmetro característico D10 do sedimento transportado para depois do leito móvel e do sedimento injetado no canal.	89
Figura 47: Relação da eficiência de transporte com a relação entre o diâmetro característico D90 do sedimento transportado para depois do leito móvel e do sedimento injetado no canal – ajuste linear.	90
Figura 48: Desenho esquemático da integração das massas de jusante para montante. Créditos da ilustração: Carolina H. Boffo.	91
Figura 49: Relação entre a eficiência de transporte e a distância para os ensaios localizados na zona com descarga sólida no início do leito menor do que 10 g/min.	92
Figura 50: Relação entre a eficiência de transporte e a distância para os ensaios localizados na zona com descarga sólida no início do leito entre 10 g/min e 50 g/min.	92
Figura 51: Relação entre a eficiência de transporte e a distância para os ensaios localizados na zona de transição.	93

Figura 52: Relação entre a eficiência de transporte e a distância para os ensaios localizados na zona assintótica.	93
Figura 53: Relação entre o expoente B das curvas exponenciais ajustadas para a relação entre a eficiência de transporte e a distância a eficiência de transporte, para os ensaios localizados na zona ascendente.	94
Figura 54: Relação entre o expoente B das curvas exponenciais ajustadas para a relação entre a eficiência de transporte e a distância a eficiência de transporte, para os ensaios localizados na zona assintótica.....	95
Figura 55: Relação entre a eficiência de transporte e a distância para a relação obtida através das Equações 31 e 32 e a diferença entre ambas.	97

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Resultado da análise do desenvolvimento espacial das correntes de turbidez simuladas por Parker et al (1987). Fonte: Parker et al (1987).	26
Tabela 2: Ensaios realizados e as respectivas condições de inclinação e tamanho dos grãos utilizados na composição do leito móvel.	47
Tabela 3: Resultado do balanço de massa: massas coletadas e diâmetros do sedimento.	49
Tabela 4: Ensaios realizados e a respectiva concentração volumétrica da mistura injetada, medida antes e após do ensaio.	51
Tabela 5: Diâmetros característicos dos sedimentos presentes nas amostras da mistura de injeção coletadas antes e após do ensaio.	52
Tabela 6: Contribuição da temperatura para a diferença de massa específica entre a mistura sedimentar e o fluido ambiente.	54
Tabela 7: Ensaios realizados e a respectiva duração.	55
Tabela 8: Descarga sólida e vazão na seção de injeção.	57
Tabela 9: Descargas sólidas estimadas na entrada e na saída do leito móvel.	58
Tabela 10: Ensaios realizados e as respectivas eficiências de transporte.	59
Tabela 11: Ensaios realizados e as respectivas taxas de geração de depósito no trecho do leito móvel.	60
Tabela 12: Ensaios realizados e as respectivas alturas das correntes simuladas (média e desvio padrão) e os períodos analisados.	62
Tabela 13: Ensaios realizados e as respectivas velocidades médias de avanço determinadas no trecho do leito móvel e no trecho da sonda do ecógrafo.	63
Tabela 14: Ensaios realizados e os respectivos parâmetros estimados a aproximadamente 30 centímetros antes do fim do leito móvel.	66
Tabela 15: Ensaios realizados e os respectivos parâmetros adimensionais estimados, além do conjunto de variáveis de Bagnold.	68
Tabela 16: Análise da eficiência de transporte nas assíntotas horizontais.	78
Tabela 17: Ensaios realizados e as respectivas relações entre os diâmetros característicos D10, D50 e D90 do sedimento transportado para depois do leito móvel e do sedimento injetado no canal.	87

Tabela 18: Ensaios da zona ascendente e as respectivas constantes ajustadas para os ajustes exponenciais da relação entre a eficiência de transporte e a distância.

..... 94

Tabela 19: Ensaios da zona assintótica e as respectivas constantes ajustadas para os ajustes exponenciais da relação entre a eficiência de transporte e a distância.

..... 96

LISTA DE SÍMBOLOS

A = área da seção transversal da corrente de turbidez (m)

b = largura do canal (m)

c_b = concentração no nível de referência (-)

C_c = concentração volumétrica média da corrente de densidade (-)

CM = concentração em massa (kg/m^3)

CV = concentração volumétrica (-)

CV injeção = concentração volumétrica da mistura de injeção (-)

d = diâmetro do grão (m)

d_i = diâmetro do grão transportado(m)

D_* = diâmetro do grão adimensionalizado (-)

D_{10} , D_{50} e D_{90} = diâmetros característicos dos grãos (m)

f_i e f_0 = coeficientes de perda de carga nas superfícies superior e inferior, respectivamente (-)

F_r = número de Froude (-)

$F_{r,d}$ = número de Froude densimétrico (-)

g' = aceleração da gravidade reduzida (m/s^2)

g = aceleração da gravidade local (m/s^2)

h = altura do escoamento (m)

h_c = altura da corrente de densidade (m)

H = altura da corrente de turbidez (m)

I = declividade do fundo (-)

k = constante de von Kármán (-)

M = massa de carvão na mistura (kg)

M total = todo o sedimento injetado no canal (kg)

M1 = todo o sedimento depositado antes do início do leito móvel (kg)

M2* = todo o sedimento no trecho do leito móvel (kg)

M2 = depósito gerado pela corrente de turbidez no trecho do leito móvel (kg)

M3 = todo o sedimento depositado após o leito móvel (kg)

q = vazão unitária (m²/s)

Q_{injeção} = vazão de injeção (m³/s)

Q_c = vazão da corrente de turbidez (m³/s)

Q_s = descarga sólida da corrente de turbidez (kg/s)

Q_s* = descarga sólida estimada pelo conjunto de variáveis de Bagnold (kg/m³)

q_{s,v} = descarga sólida volumétrica unitária (m²/s)

Q_{s total} = Q_{s injeção} = descarga sólida na injeção (kg/s)

Q_{s LMI} = descarga sólida no início do leito móvel (kg/s)

Q_{s LMF} = descarga sólida no início do leito móvel (kg/s)

Re = número de Reynolds (-)

R* = número de Reynolds do grão

T = temperatura da água (°C)

u = velocidade do escoamento (m/s)

u_c = velocidade da corrente de densidade (m/s)

u* = velocidade de cisalhamento (m/s)

u*_{cr} = velocidade de cisalhamento crítica (m/s)

U = velocidade do escoamento (m/s)

U_c = velocidade média da corrente de densidade (m/s)

V = velocidade da corrente de turbidez (m/s)

Vol = volume de mistura a ser preparada (m³)

Vol_a = volume de água na mistura (m^3)

z = número de Rouse (-)

α = parâmetro que expressa a razão entre a resistência na interface e a resistência no fundo (-)

γ = peso específico do fluido (N/m^3)

γ_{ct} = peso específico da corrente de turbidez (N/m^3)

γ_s = peso específico do sedimento (N/m^3)

μ_{ct} = coeficiente de viscosidade dinâmico da corrente de turbidez (kg/s^2m^2)

μ = coeficiente de viscosidade dinâmico do fluido (kg/s^2m^2)

ν = viscosidade cinemática do fluido (m^2/s)

ν_c = viscosidade cinemática da corrente de densidade (m^2/s)

ν_{ct} = viscosidade cinemática da corrente de turbidez (m^2/s)

π_1 = número adimensional da potência (-)

π_2 = número adimensional da descarga sólida volumétrica (-)

π_3 = número adimensional do diâmetro (-)

π_4 = índice de intensidade do escoamento (-)

ρ = massa específica do fluido (kg/m^3)

ρ_a = massa específica do fluido ambiente (kg/m^3)

ρ_c = massa específica da corrente de densidade (kg/m^3)

ρ_s = massa específica do sedimento (kg/m^3)

ρ_m = massa específica da mistura (kg/m^3)

τ_0 = tensão de cisalhamento junto ao fundo (N/m^2)

τ_{0cor} = tensão de cisalhamento junto ao fundo corrigida (N/m^2)

$\frac{1}{\Psi}$ = parâmetro de Shields (-)

Ψ = descarga s3lida por unidade de largura (m^2/s)

ω = velocidade de queda do sedimento em suspens3o (m/s)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Justificativa	2
1.2 Questão de Pesquisa	3
1.3 Objetivos.....	3
1.3.1 Objetivo Geral	3
1.3.2 Objetivos específicos.....	3
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 Escoamentos à superfície livre <i>versus</i> correntes de densidade.....	4
2.2 Correntes de Densidade, Fluxos Gravitacionais de Sedimentos e Correntes de Turbidez.....	6
2.2.1 Formas de ocorrência das correntes de turbidez.....	7
2.2.2 Modelagem física das correntes de turbidez.....	9
2.3 Mobilidade dos sedimentos: competência e capacidade de transporte.....	11
2.3.1 Competência e capacidade de transporte de escoamentos fluviais.....	12
2.3.2 Competência e capacidade de transporte de correntes de turbidez	21
3 APARATO EXPERIMENTAL E METODOLOGIA.....	31
3.1 Aparato experimental	31
3.1.1 Canal, alimentação e saída.....	31
3.1.2 Ponta linimétrica e suporte para medição.....	33
3.1.3 Câmeras fotográficas	34
3.1.4 Ecógrafo médico.....	35
3.1.5 Peneiras.....	35
3.1.6 Analisador de partículas	35
3.1.7 Outros equipamentos	35
3.2 Sedimento	36
3.3 Metodologia experimental.....	37
3.3.1 Antes do ensaio.....	37

3.3.2 Ensaio	38
3.3.3 Depois do ensaio.....	39
3.4 Tratamento dos dados adquiridos	40
3.4.1 Duração do ensaio e velocidade de avanço das correntes de turbidez	41
3.4.2 Alturas das correntes de turbidez e série temporal de imagens	41
3.4.3 Perfis longitudinais e volumes do leito móvel.....	42
3.4.4 Balanço de massa e descargas sólidas	43
3.4.5 Concentração volumétrica da mistura sedimentar	44
3.4.6 Vazão de injeção.....	45
3.4.7 Diâmetros característicos.....	45
3.5 Ensaios realizados e configuração do canal	46
4 RESULTADOS	48
4.1 Balanço de massa.....	48
4.2 Condições iniciais dos ensaios realizados	50
4.2.1 Mistura.....	50
4.2.2 Duração.....	54
4.2.3 Descarga sólida na injeção	56
4.3 Propriedades sedimentológicas no trecho do leito móvel	57
4.3.1 Descargas sólidas no trecho do leito móvel.....	58
4.3.2 Eficiência de transporte no trecho do leito móvel	59
4.3.3 Taxa de geração de depósito no trecho do leito móvel.....	60
4.4 Propriedades das correntes de turbidez a 30 cm antes do fim do leito móvel	61
4.4.1 Alturas das correntes a 30 cm antes do fim do leito móvel.....	61
4.4.2 Velocidade média de avanço das correntes de turbidez	62
4.4.3 Estimativa de parâmetros adimensionais do fluxo a 30 cm antes do fim do leito móvel	64
5 DISCUSSÃO	69

5.1 Avaliação da aplicabilidade dos conceitos de competência do escoamento e de capacidade de transporte nas correntes de turbidez.....	69
5.1.1 Competência do escoamento	69
5.2.2 Capacidade de transporte do escoamento.....	71
5.2 Avaliação da eficiência de transporte das correntes de turbidez	75
5.2.1 Eficiência X Descarga sólida.....	76
5.2.3 Eficiência X Parâmetros adimensionais do fluxo.....	81
5.2.4 Eficiência X Taxa de geração de depósito.....	84
5.2.5 Eficiência X Diâmetros dos grãos	86
5.2.6 Eficiência X Distância entre a seção transversal inicial e final	90
6 CONCLUSÕES	99
7 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	102
8 BIBLIOGRAFIA	104

1 INTRODUÇÃO

Pode-se dizer que a Sedimentologia é a parte da ciência que se propõe ao estudo da presença dos sedimentos no meio natural, englobando todo o ciclo dos sedimentos. Os sedimentos se originam da degradação de rochas e da posterior erosão do solo, fruto da degradação causada pelo impacto das gotas de chuva e pelo escoamento superficial difuso e concentrado. Sendo a precipitação um fator determinante na geração dos sedimentos, a unidade espacial utilizada para a observação desse fenômeno é a bacia hidrográfica. Esses sedimentos são carregados até o mar, através dos rios, e acabam por serem transportados até distâncias muito longas no fundo do mar, através de processos hidráulicos que diferem daqueles que regem um escoamento fluvial puramente dito, e onde após se depositarem, estão sujeitos a outros processos, inseridos no âmbito da Geologia.

O estudo da interação dos sedimentos com o fluido que o transporta possui aplicações nas mais diversas áreas do conhecimento. A quantificação do aporte de sedimentos na seção de um rio e da quantidade de sedimentos que o mesmo tem capacidade de transportar é muito importante na predição da estabilidade das margens do mesmo. Quando um rio é barrado, o curso natural dos sedimentos é parcialmente interrompido, causando consequências a montante e a jusante deste. No reservatório de uma barragem, por exemplo, com o passar do tempo, ocorre o assoreamento e a perda da capacidade de armazenamento de água. Ainda, o transporte de sedimentos muitas vezes está relacionado com a qualidade da água dos corpos hídricos.

O processo hidráulico responsável pelo transporte de sedimentos em correntes de turbidez pode diferir substancialmente daquele que ocorre em escoamentos fluviais, pois o fluido acima do escoamento não é o ar, mas sim, a água. As correntes de turbidez surgem como um tipo de fluxo através do qual ocorre o movimento dos sedimentos em reservatórios de barragens, causando o seu assoreamento (situação indesejável), mas, as mesmas correntes, transportando os sedimentos aportados pela rede fluvial aos mares, propiciam a formação de depósitos sedimentares (turbiditos) que, em condições propícias, podem se tornar importantes reservatórios de hidrocarbonetos. Os conceitos de competência do escoamento e de capacidade de transporte foram desenvolvidos em escoamentos fluviais e acabam sendo transferidos para a modelagem de correntes de

turbidez. No entanto, ainda carece de estudos sobre até que ponto o estabelecimento de analogias entre o ambiente fluvial e as correntes de turbidez pode ser realizada.

O Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), foi criado na década de 1950, dedicando-se às questões da Engenharia Hidráulica e em especial ao uso da técnica da modelagem física em escala. No entanto, destaca-se, devido à finalidade deste trabalho, o desenvolvimento de pesquisas referentes ao transporte de sedimentos em ambientes fluviais e marinhos. Vinculado ao IPH, em 1999, foi criado o Núcleo de Estudos em Correntes de Densidade (Necod), que se dedica à simulação física de correntes de turbidez no âmbito da indústria do petróleo, sendo o local de desenvolvimento deste trabalho. Além de ser importante na indústria do petróleo, a modelagem das correntes de turbidez também tem aplicações em outras áreas do conhecimento, como por exemplo, em obras hidráulicas (MORRIS e FAN, 1992) e em estudos da área ambiental (AKIYAMA e STEFAN, 1986).

O presente trabalho pretende explorar a compreensão e a delimitação dos limites da transferência de conceitos e de parâmetros da hidráulica fluvial usualmente empregados para o estudo das correntes de turbidez, a partir da modelagem física.

1.1 Justificativa

O conhecimento das relações entre as características hidrodinâmicas dos fluxos e os processos de erosão, de transporte e de deposição de sedimentos auxilia na interpretação de registros geológicos. Ou seja, a partir da análise de uma rocha sedimentar é possível inferir quais as características do fluxo responsável pela deposição dos sedimentos presentes no mesmo. Também é possível inferir as características do fluxo responsável por causar erosão, assim como, por transportar sedimentos, quando ocorre a preservação dos registros na rocha ao longo do tempo, como formas no fundo, por exemplo. Essa interpretação tem como base os conceitos de capacidade de transporte e competência do escoamento, desenvolvidos no contexto dos escoamentos fluviais e posteriormente aplicados em outros tipos de fluxos importantes no transporte de sedimentos, como é o caso das correntes de turbidez.

A compreensão de turbiditos e outros tipos de rochas sedimentares, em campo, é útil pois se transformam em modelos análogos, que, por sua vez, são ferramentas na interpretação de possíveis reservatórios de hidrocarbonetos, a qual é realizada a partir de

dados de batimetria, sísmica, testemunhos, etc. A técnica da modelagem física também é uma ferramenta importante neste contexto, à medida que permite o estudo de uma área específica, a partir de um modelo físico reduzido da mesma, bem como a obtenção de tendências acerca de parâmetros que caracterizam o fluxo e o depósito, a partir de modelos físicos hipotéticos. Portanto, essas são importantes ferramentas na tomada de decisão referente à exploração de hidrocarbonetos, na fase de anteprojeto.

A questão de pesquisa, explanada na próxima sessão e que deu origem a essa pesquisa, surgiu a partir do questionamento sobre a pertinência da adoção de conceitos próprios a escoamentos fluviais para as correntes de turbidez, uma vez que são fluxos diferentes, visto que ambos, apesar de serem escoamentos à superfície livre, ocorrem, o primeiro sob uma camada de fluido de massa específica muito menor do que a sua e o outro sob uma camada de fluido que possui massa específica similar.

1.2 Questão de Pesquisa

“O conceito de competência de escoamentos fluviais e de capacidade de transporte é aplicável às correntes de turbidez?”

1.3 Objetivos

Os objetivos foram divididos em objetivo geral e objetivos específicos para melhor compreensão.

1.3.1 Objetivo Geral

- Avaliar a pertinência da aplicação de conceitos de capacidade de transporte e de competência do escoamento às correntes de turbidez, através do emprego da técnica de modelagem física.

1.3.2 Objetivos específicos

- Estimar a descarga sólida de correntes de turbidez simuladas experimentalmente;
- Avaliar a aplicação dos conceitos de competência do escoamento e de capacidade de transporte nas correntes de turbidez simuladas;
- Avaliar se há interação das correntes de turbidez com o fundo;
- Avaliar como a descarga sólida varia ao longo de um trecho do canal.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica foi abordada considerando as diferenças existentes entre escoamentos à superfície livre e correntes de densidade (também denominadas de correntes de gravidade e de fluxos estratificados). Nesse contexto, a revisão bibliográfica foi dividida em seções cujos conteúdos foram essenciais para o desenvolvimento deste trabalho.

2.1 Escoamentos à superfície livre *versus* correntes de densidade

Segundo Streeter (1961), um escoamento à superfície livre pode ser considerado como sendo uma corrente de densidade em que a diferença entre a massa específica do fluido ambiente e do fluido que se movimenta é muito grande e a resistência na interface entre os fluidos pode ser desprezada. Já as correntes de densidade podem ser consideradas análogas a escoamentos à superfície livre se a aceleração da gravidade for tomada como reduzida (Equação 1). A gravidade reduzida, portanto, pode variar entre os limites da gravidade local (escoamento à superfície livre) e zero (não há escoamento), sendo que mesmo valores muito próximos a zero podem gerar movimento (correntes de densidade).

$$g' = g \frac{\rho_c - \rho_a}{\rho_c} \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

g' = aceleração da gravidade reduzida (m/s^2);

g = aceleração da gravidade local (m/s^2);

ρ_a = massa específica do fluido ambiente (kg/m^3);

ρ_c = massa específica da corrente de densidade (kg/m^3).

O número de Froude (Equação 2), que classifica os regimes de escoamento em canais segundo a relação entre as forças de inércia e de gravidade, continua sendo aplicável para o caso das correntes de densidade, sendo conhecido nesse caso como o número de Froude densimétrico. O trabalho de Sequeiros (2012) mostra a variação do número de Froude e do número de Froude densimétrico com a inclinação, deixando claro

que a faixa desses valores para as correntes de densidade é muito mais restrita do que para escoamentos à superfície livre. Segundo Chien e Wan (1999), como a gravidade reduzida é muito menor do que a gravidade, mesmo que a declividade seja baixa as correntes de densidade podem ser classificadas como supercríticas.

$$F_r = \frac{u}{\sqrt{gh}} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

F_r = número de Froude (-);

u = velocidade do escoamento (m/s);

h = altura do escoamento (m);

g = aceleração da gravidade local (m/s²).

Um exemplo hipotético de comparação entre os perfis de tensão de cisalhamento, velocidade e concentração em um canal aberto e em uma corrente de densidade está exposto na Figura 1. Como pode-se notar no perfil de tensão de cisalhamento, a resistência na interface entre os fluidos não pode ser desprezada no caso das correntes de densidade, pois causa diferenças significativas nos seus perfis de velocidade e de concentração. Qualquer aceleração ou desaceleração da corrente tende a causar um aumento da perturbação na interface e, como consequência, um sistema de vórtices aparece (LEEDER, 1999). Esses vórtices são chamados de Instabilidades de Kelvin-Helmholtz e são importantes mecanismos de mistura entre a corrente de densidade e o fluido ambiente. A Figura 2 exhibe a visualização desses vórtices através da modelagem física de uma corrente de turbidez e de uma pluma de sedimentos do Rio Mississippi no Golfo do México.

Figura 1: Representação esquemática dos perfis de velocidade, concentração e tensão de cisalhamento de um escoamento em canal aberto e de uma corrente de turbidez. Fonte: adaptado de Manica (2009).

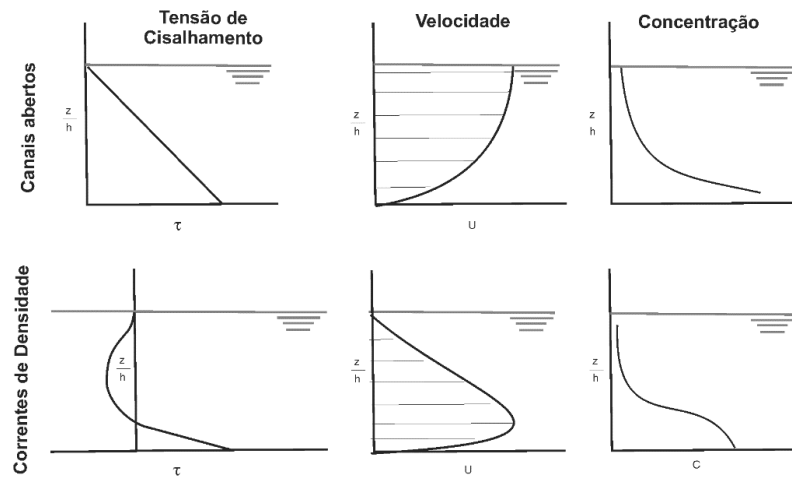
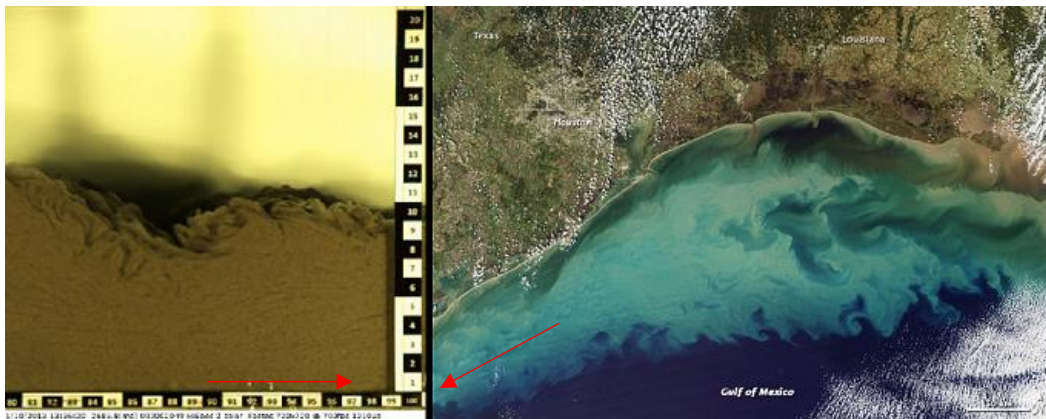


Figura 2: Esquerda: Vórtice de Kelvin-Helmholtz em uma corrente de turbidez simulada em laboratório. Fonte: Boffo *et al* (2014). Direita: Vórtices de Kelvin-Helmholtz em uma pluma de sedimentos (fluxo homopical) no Golfo do México. Fonte: NASA's Earth Observatory (2009). Legenda: as setas vermelhas indicam o sentido do fluxo.



2.2 Correntes de Densidade, Fluxos Gravitacionais de Sedimentos e Correntes de Turbidez

Simpson (1997) cita vários exemplos de correntes de densidade que ocorrem devido a fenômenos naturais e não naturais, tais como: tempestades de areia, brisa do mar avançando para o continente, avalanches de neve, vazamento de gases, derramamento de óleo e plumas de rios entrando no mar. Nota-se, a partir dos exemplos citados, que a causa

da variação da massa específica pode ter natureza diversa (concentração de sólidos, temperatura). No entanto, a presença de sólidos em suspensão modificando a massa específica da água é a abordagem realizada neste trabalho.

Middleton e Hampton (1973) definem os Fluxos Gravitacionais de Sedimentos (FGS), classificando-os, de forma geral, em quatro tipos, de acordo com o principal mecanismo de suporte dos grãos:

- Correntes de turbidez: componente vertical da turbulência;
- Fluxos fluidizados: escape de fluidos entre os grãos;
- Fluxos de grãos: interação entre os grãos;
- Fluxos de detritos: matriz formada por uma mistura de fluido e sedimentos finos.

As correntes de turbidez podem ser classificadas de acordo com a relação entre a massa específica da corrente e a massa específica do fluido ambiente, sendo comumente utilizada a classificação apresentada por Mulder e Alexander (2001):

- Homopical: quando a massa específica da corrente de turbidez e do fluido ambiente são iguais;
- Mesopical: quando a massa específica da corrente de turbidez é maior do que a massa específica do fluido ambiente acima dela, mas menor do que a massa específica do fluido abaixo dela;
- Hipopical: quando a massa específica da corrente de turbidez é menor do que a massa específica do fluido ambiente;
- Hiperpical: quando a massa específica da corrente de turbidez é maior do que a massa específica do fluido ambiente.

Cabe ressaltar que as correntes de turbidez hiperpicais foram o foco de estudo desse trabalho. Nas próximas seções, alguns aspectos dessas correntes de turbidez são abordados.

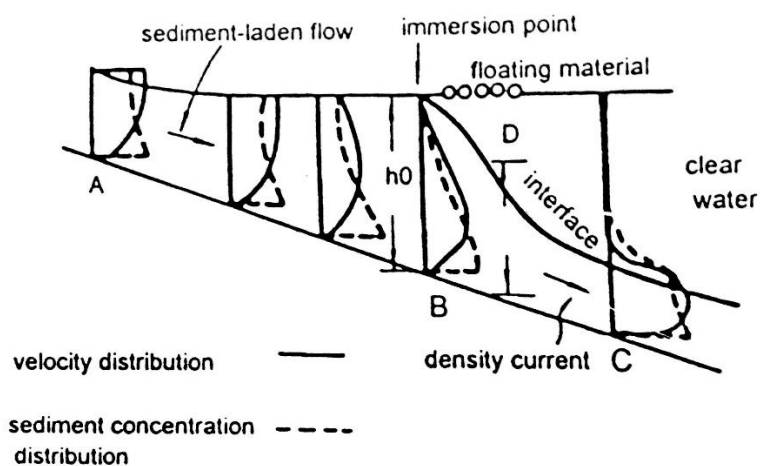
2.2.1 Formas de ocorrência das correntes de turbidez

As correntes de turbidez podem ocorrer em inúmeros ambientes: reservatórios de barragens, lagos, canais, oceano raso e profundo, sendo que a formação destes fluxos pode se dar de formas variadas, entre elas: a partir da entrada de um aporte fluvial ou por deslizamentos associados à incorporação de fluido ambiente, favorecendo o contraste de

densidade (PIPER e NORMARK, 2009). No primeiro caso, os fluxos tendem a se estenderem por até vários dias e no outro por minutos ou algumas horas.

O processo de transição de um escoamento fluvial em uma corrente de turbidez é descrito por Chien e Wan (1999) - Figura 3. No ponto B ocorre a imersão e, a partir deste ponto, a interface entre a corrente de turbidez e a água do reservatório muda continuamente, passando por um ponto de inflexão (ponto D), até que fique aproximadamente constante (ponto C). O ponto B, ponto de imersão, é referido pelos autores como “*immersion point*”, mas também pode ser encontrado na literatura como “*plunging point*” ou “*plunge point*”. Segundo Sentürk (1994), os sedimentos carregados pelo rio, quando chegam no lago de uma barragem, depositam-se, especialmente as frações mais grossas de sedimentos - as mais finas, normalmente são transportadas até próximo ao barramento, também por correntes de turbidez, contribuindo para o assoreamento do reservatório.

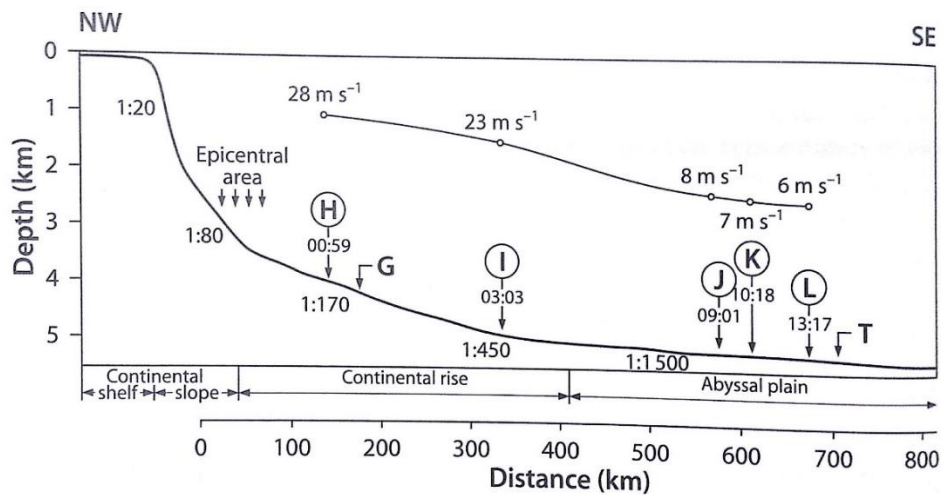
Figura 3: Mudanças longitudinais do perfil de velocidade e de concentração de sedimentos, durante a transição de um escoamento à superfície livre para uma corrente de turbidez. Fonte: Chien e Wan (1999).



O deslizamento de taludes e posterior transformação do fluxo também é uma reconhecida forma de iniciação das correntes de turbidez (PIPER e NORMARK, 2009). Exemplo comumente citado na literatura é o do evento de Grand Banks ocorrido em 1929. Nesse evento o fluxo formado através de um deslizamento, devido a um terremoto de magnitude 7,2 na escala Richter e com epicentro no Oceano Atlântico (Sudeste do

Canadá), pôde ser monitorado através de uma sequência de rompimento de cabos submarinos (Figura 4).

Figura 4: O terremoto Grand Banks de 1929 e a subsequente quebra de cabos submarinos. As flechas indicam o local do rompimento dos cabos devido ao fluxo gravitacional de sedimentos proveniente do deslizamento, mostrando a defasagem temporal com que ocorreram e as suas distâncias à região do epicentro. O esquema também mostra a velocidade estimada do fluxo e o gradiente do fundo (1:20, 1:80...).
Fonte: Hsü, 2004.



2.2.2 Modelagem física das correntes de turbidez

Middleton (1966) lista, através de uma relação funcional (Equação 3), as principais variáveis que influenciam na dinâmica das correntes de densidade. São elas: a velocidade, a altura da corrente, a massa específica, a viscosidade cinemática, o coeficiente de perda de carga nas superfícies superior e inferior da corrente; a massa específica do fluido ambiente, a declividade e a aceleração da gravidade. A aceleração da gravidade reduzida engloba os termos de massa específica da corrente e do fluido ambiente e a própria aceleração da gravidade. Além disso, outros parâmetros são importantes na simulação de correntes de turbidez: o tamanho, a velocidade de queda e a concentração das partículas (MIDDLETON, 1966).

$$f_1(u_c, h_c, g', \nu_c, f_i, f_0, I) \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

u_c = velocidade da corrente de densidade (m/s);

h_c = altura da corrente de densidade (m);

g' = aceleração da gravidade reduzida (m/s^2);

ν_c = viscosidade cinemática da corrente de densidade (m^2/s);

f_i e f_0 = coeficientes de perda de carga nas superfícies superior e inferior, respectivamente, (-);

I = declividade do fundo (-).

Os principais números adimensionais na modelagem física das correntes de turbidez são obtidos através da relação funcional expressa pela Equação 3: o número de Froude densimétrico e o número de Reynolds (Equações 4 e 5, respectivamente). O número de Froude densimétrico, assim como o número de Froude, expressa a relação quadrática entre as forças de inércia e as forças gravitacionais. O número de Reynolds, por sua vez, expressa a relação entre as forças de inércia e as forças viscosas. O critério de modelagem desses fluxos é baseado na igualdade do número de Froude densimétrico entre o modelo e o protótipo (MIDDLETON, 1966; BAAS *et al.*, 2014). Normalmente, os sedimentos utilizados na modelagem possuem massa específica menor do que os sedimentos presentes na escala real; desse modo, evita-se que o tamanho dos sedimentos seja demasiadamente reduzido nas simulações. Tal redução da massa específica é feita com base na redução em escala da velocidade de queda dos sedimentos presentes no protótipo e no modelo.

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

Onde:

$F_{r,d}$ = número de Froude densimétrico (-);

u_c = velocidade da corrente de densidade (m/s);

h_c = altura da corrente de densidade (m);

g' = aceleração da gravidade reduzida (m/s^2).

$$Re = \frac{u_c h_c}{\nu_c} \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

Re = número de Reynolds (-);

u_c = velocidade da corrente de densidade (m/s);

h_c = altura da corrente de densidade (m);

ν_c = viscosidade cinemática da corrente de densidade (m²/s).

Heller (2017) adverte que a modelagem a partir da igualdade do número de Froude não garante que a relação entre as forças de inércia e viscosas (número de Reynolds) seja adequadamente representada. Para determinados tipos de fluxos, como é o caso das 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. Segundo o autor, a partir desse valor o fenômeno estudado possui invariância com o número de Reynolds. Um exemplo clássico, citado por Heller (2017) são as curvas do diagrama de Moddy para condutos fechados. Parsons e García (1998) demonstraram que a similaridade dos processos de mistura, na cabeça das correntes de turbidez, ocorrem para valores de número de Reynolds maiores do que 1000. Entretanto, os autores ressaltaram que esse valor não pode ser considerado universal, já que apenas a parte inicial (cabeça) das correntes foi analisada. Kneller e Bruckee (2000) utilizou como critério para esse limite o número de Reynolds maior ou igual a 2000, que é o valor aplicado no caso dos condutos fechados.

2.3 Mobilidade dos sedimentos: competência e capacidade de transporte

Neste capítulo são abordados brevemente os conceitos de competência e capacidade de transporte de sedimentos em escoamentos à superfície livre e que são também utilizados nos fluxos de correntes de turbidez e que serviram de referencial teórico para a motivação deste trabalho. Em um segundo momento, são abordados estudos realizados dentro deste contexto para as correntes de turbidez hiperpicnais.

2.3.1 Competência e capacidade de transporte de escoamentos fluviais

Em um rio, a forma como os sedimentos podem ser transportados são agrupadas em duas categorias de transporte: arraste (que compreende as modalidades de transporte: deslizamento, rolamento e saltação) e suspensão (que compreende as modalidades suspensão e turbidez). O transporte ocorre com o início do movimento do grão que dá origem ao conceito de competência do escoamento, sendo essa atrelada ao tamanho dos grãos transportados. Já o conceito de capacidade de transporte está atrelado à quantidade de sedimentos que o escoamento consegue transportar, considerando o somatório das vazões sólidas transportadas por arraste e suspensão.

O início do movimento de grão é resultado do equilíbrio entre três forças: a força de arraste, a força de sustentação e o peso submerso do sedimento. Os primeiros trabalhos que abordaram esse fenômeno foram o de Hjulstrom (1936 – *apud* HSÜ, 2004) e de Shields (1936). Hjulstrom (1936) - Figura 7 - elaborou um diagrama relacionando a velocidade de início do movimento com o tamanho do grão e Shields (1936) - Figura 8 - compôs um diagrama onde relacionou os números adimensionais de Shields (Equação 6) e de Reynolds do grão (Equação 8) para expressar esse fenômeno. Analisando os números adimensionais adotados para representar as condições de início do movimento do grão, nota-se que outras variáveis, além daquelas que Hjulström utilizara (velocidade média e tamanho do grão), foram consideradas, tais como: a inclinação, a diferença de massa específica entre o sedimento e o fluido, a viscosidade e, finalmente, a tensão de cisalhamento (Equação 7) crítica a partir da qual o sedimento, em repouso no leito, começa a se movimentar.

Figura 5: Curva de Hjulström (1936) modificada por Sundbord (1956).
Fonte: Hsü, 2004.

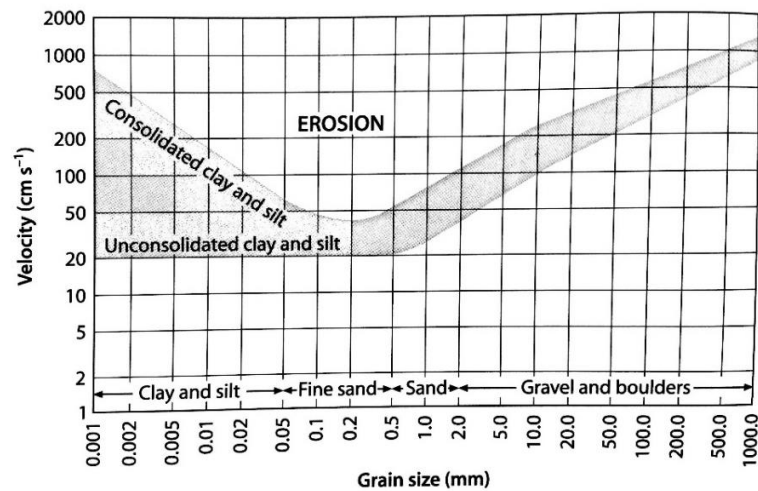
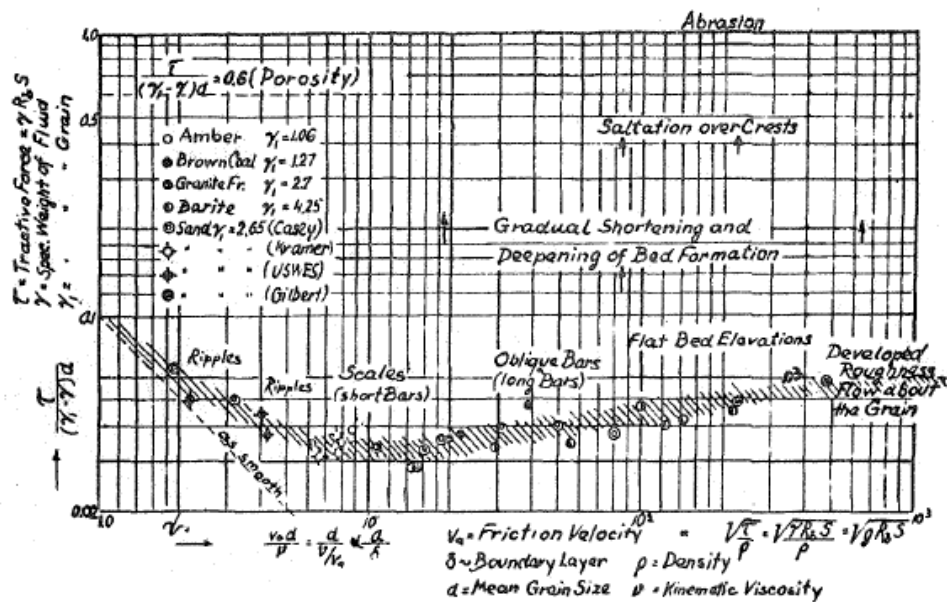


Figura 6: Curva de Shields: a curva em destaque é a curva de início de movimento que resultou dos experimentos de Shields. Fonte: Shields (1936).



O critério para o início da suspensão está na estabilidade entre a força de sustentação (turbulência) e a velocidade de queda do sedimento. A Figura 7 mostra as curvas de início do movimento do sedimento e da suspensão, segundo três autores, expressas na forma do diagrama de Shields. Na região compreendida entre a curva de início do movimento e a curva do início da suspensão sugere-se que o grão esteja sendo transportado por arraste.

A Figura 7 mostra as curvas de início do movimento do sedimento e da suspensão, segundo três autores, expressas na forma do diagrama de Shields. Na região compreendida entre a curva de início do movimento e a curva do início da suspensão sugere-se que o grão esteja sendo transportado por arraste.

$$\frac{1}{\Psi} = \frac{\tau_0}{(\gamma_s - \gamma)d} \quad \text{Equação 6}$$

$$\tau_0 = \gamma h I \quad \text{Equação 7}$$

$$R_* = \frac{u_* d}{\nu} \quad \text{Equação 8}$$

Onde:

$\frac{1}{\Psi}$ = parâmetro de Shields (-);

τ_0 = tensão de cisalhamento junto ao fundo (N/m²);

R_* = número de Reynolds do grão;

γ = peso específico do fluido (N/m³);

γ_s = peso específico do sedimento (N/m³);

d = diâmetro do grão (m);

h = altura do escoamento (m);

I = inclinação do canal (-);

u_* = velocidade de cisalhamento (m/s);¹

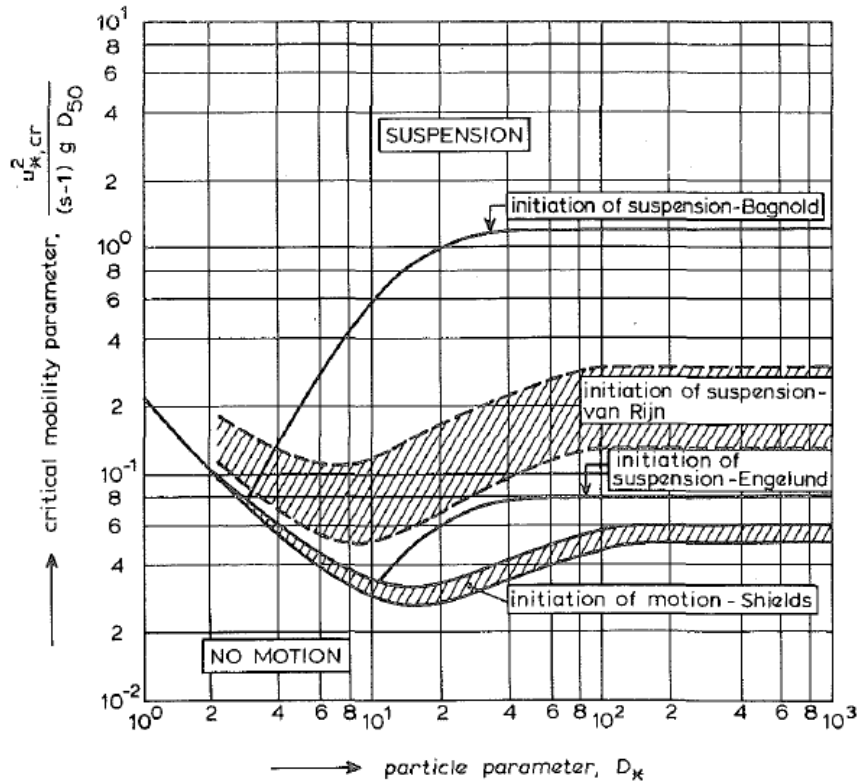
ν = viscosidade cinemática do fluido (m²/s).

¹ $u_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}$, onde: τ_0 é a tensão de cisalhamento junto ao fundo e ρ é a massa específica do fluido.

Figura 7: Início do movimento (Shields, 1936) e início da suspensão, segundo van Rijn (1984) que expõe também as curvas de outros autores (Bagnold e Engelund). Onde:

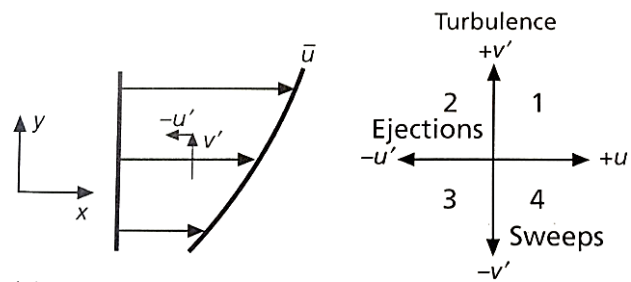
$$D_* = D_{50} \left[\frac{(s-1)g}{\nu^2} \right]^{1/3}, \quad u_{*,cr} = \text{velocidade de cisalhamento crítica (m/s)}, \quad s = \frac{\rho_s}{\rho},$$

D_{50} = diâmetro característico dos grãos (m), g = aceleração da gravidade local (m/s^2),
 ν = viscosidade cinemática (m^2/s^2), ρ_s = massa específica do sedimento (kg/m^3) e
 ρ = massa específica do fluido (kg/m^3). Fonte: van Rijn (1984).



A tensão de cisalhamento é composta por dois termos, de origens diferentes: um componente molecular e outro turbilhonar (conceito proposto por Boussinesq em 1877), sendo esse relacionado com as oscilações da velocidade (conceito proposto por Reynolds em 1895). As oscilações da velocidade (u' e v') provêm da decomposição da velocidade instantânea em um valor médio e uma variação (oscilação) em torno dessa média. A Figura 8 ilustra a caracterização das oscilações da velocidade em estruturas coerentes de acordo com o sinal das mesmas. As estruturas “*ejections*”, chamadas de ejeções, são responsáveis pelo movimento ascendente, e as estruturas “*sweeps*”, chamadas de rebaixamentos, são responsáveis pelo movimento descendente. As oscilações da velocidade seriam as responsáveis pelo início do movimento dos grãos e pelo transporte de sedimentos, os quais podem inibir a magnitude das mesmas.

Figura 8: Interpretação geométrica das Tensões de Reynolds. Fonte: Leader (1999).



Rouse (1937), definiu um número adimensional, chamado de número de Rouse (Equação 9) que representa os diferentes perfis de concentração de sedimento em suspensão ao longo de uma vertical do escoamento, conforme a Figura 9.

$$z = \frac{\omega}{k \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}} \quad \text{Equação 9}$$

Onde:

z = número de Rouse (-);

ω = velocidade de queda do sedimento (m/s);

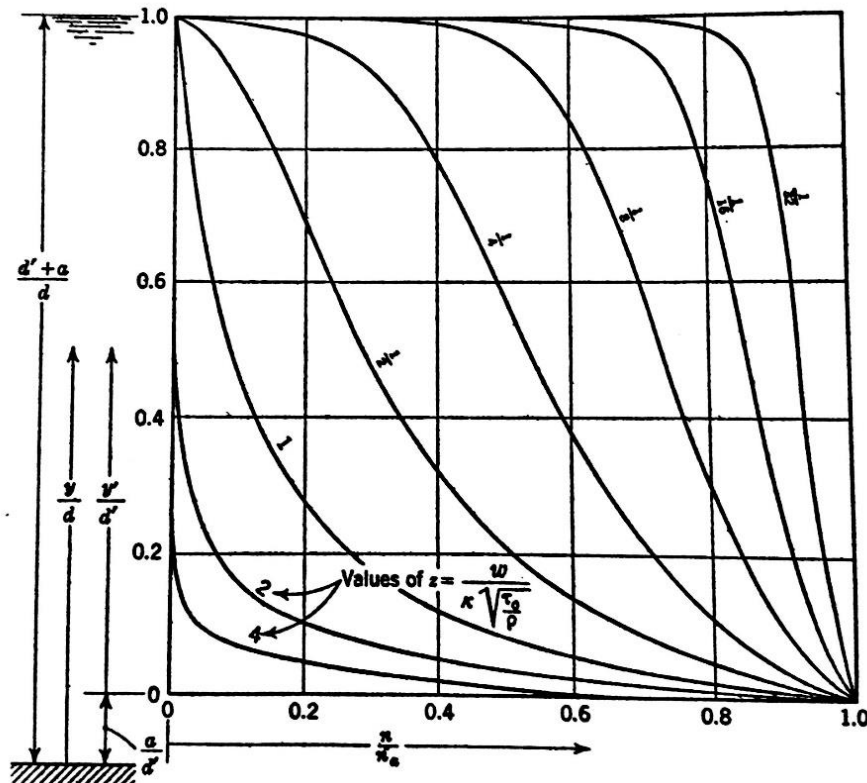
k = constante de von Kármán (-);

τ_0 = tensão de cisalhamento junto ao fundo (N/m²);

ρ = massa específica do fluido (kg/m³);

Figura 9: Gráfico adimensional da distribuição de sólidos em suspensão de Hunter Rouse. Onde: " n/n_a " é a concentração relativa em qualquer ponto, adimensionalizada a partir da concentração em um nível de referência acima do leito, " a "; $d' = d - a$ é uma altura relativa que diminui de uma altura qualquer do escoamento " d " a altura de referência " a ", logo $a/d' = 0$ quando $d = a$; $(d'+a)/d$ representa a relação entre uma altura qualquer de escoamento " $d'+a$ " e a altura total do escoamento " d "; $y = d$ e $y' = d'$.

Fonte: Rouse (1937).



O conceito de capacidade de transporte dos escoamentos permite com que seja estabelecida como uma condição de equilíbrio da calha fluvial. Se o aporte sedimentar for menor do que a vazão sólida que o escoamento tem capacidade de transportar (capacidade de transporte), provavelmente ocorrerá a erosão do leito e das margens. No caso em que o aporte sedimentar é maior do que a capacidade de transporte, ocorrerá a deposição da quantidade de sedimentos em excesso.

Bordas, Borges e Medeiros (1988) mostram que a partir da análise dimensional das variáveis importantes do transporte de sedimentos na natureza é possível agrupar as variáveis em três parâmetros adimensionais, aqui chamados de π_1 , π_2 e π_3 (Equações Equação 10 e Equação 11 e Equação 12, respectivamente). O parâmetro π_1 é o adimensional da potência, o parâmetro π_2 é o adimensional da descarga sólida

volumétrica e, por fim, o parâmetro π_7 é um adimensional do diâmetro dos grãos. Bordas, Borges e Medeiros (1988) relacionaram o parâmetro π_1 e π_2 , conforme o exposto na Figura 10:

$$\pi_1 = \frac{\gamma q l}{\gamma_s v} \quad \text{Equação 10}$$

$$\pi_2 = \frac{q_{s,v}}{v} \quad \text{Equação 11}$$

$$\pi_3 = \frac{d_i g^{1/3}}{v^{2/3}} \quad \text{Equação 12}$$

Onde:

π_1 = número adimensional da potência (-);

π_2 = número adimensional da descarga sólida volumétrica (-);

π_3 = número adimensional do diâmetro (-)

q = vazão unitária (m^2/s);

$q_{s,v}$ = descarga sólida volumétrica unitária (m^2/s);

γ = peso específico do fluido (N/m^3);

γ_s = peso específico do sedimento (N/m^3);

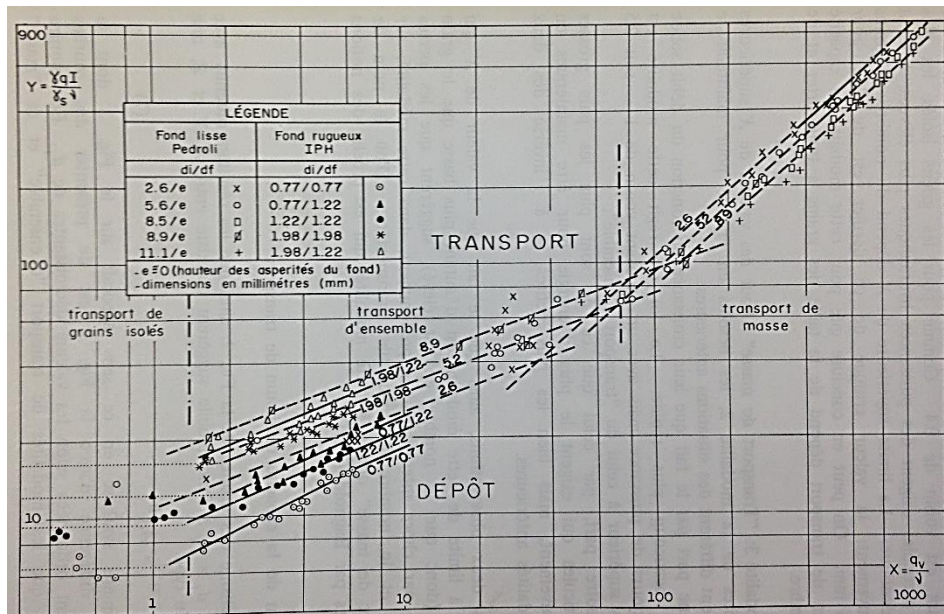
d_i = diâmetro do grão transportado(m);

v = viscosidade cinemática do fluido (m^2/s)

g = aceleração da gravidade local (m/s^2).

Nota-se que, em função da descarga sólida em transporte, existem três diferentes regiões que caracterizam a dependência entre a quantidade de sedimentos em movimento e o escoamento que a conduz: região de grãos isolados (ou movimento incipiente), a região de movimento em conjunto e a região de movimento em massa (ou generalizado).

Figura 10: Relação entre os parâmetros π_1 e π_2 encontrada por Bordas, Borges e Medeiros (1988) para o transporte sólido fluvial. Fonte: Bordas, Borges e Medeiros (1988).



Sha (1965) *apud* Chien e Wan (1999), analisando dados de suspensão coletados em canais experimentais, bem como em rios da China e Ásia Central, estabeleceu que a concentração do sedimento depende principalmente da velocidade efetiva (excesso de velocidade acima daquela necessária para movimentar as partículas), da velocidade de queda das partículas e de seu diâmetro. Esta relação de dependência mostra o ajuste de leis do tipo $S_m = f(U, \omega, I, h, d)$ para a definição de equações de capacidade de transporte da carga em suspensão, conforme descrito por Chien e Wan (1999). Dentre os modelos propostos, Bagnold (1966) propõe um conjunto de variáveis para a estimativa do transporte sólido em suspensão, através a Equação 19.

$$Q_s^* = 0,01 \tau_0 U \frac{U}{\omega} \quad \text{Equação 13}$$

Onde:

Q_s^* = descarga sólida estimada pelo conjunto de variáveis de Bagnold (kg/m^3);

τ_0 = tensão de cisalhamento junto ao fundo (N/m^2) - Equação 7;

U = velocidade do escoamento (m/s);

ω = velocidade de queda do sedimento (m/s).

Uma relação comumente adotada para representar o transporte sólido em suspensão é expressar a concentração da carga de sedimentos em suspensão como função do índice de intensidade do escoamento expresso pela Equação 14.

$$\pi_4 = \frac{U^3}{gh\omega} \quad \text{Equação 14}$$

Onde:

π_4 = índice de intensidade do escoamento (-);

U = velocidade do escoamento (m/s);

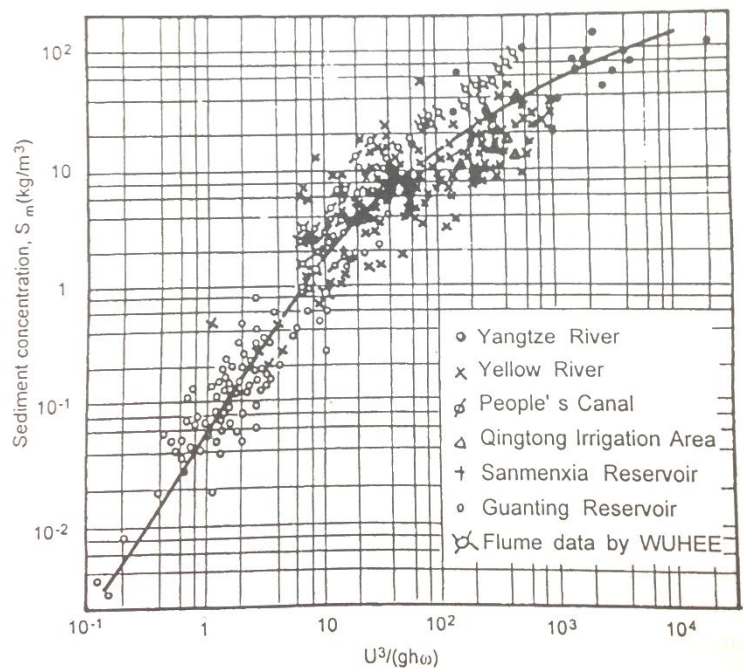
g = aceleração da gravidade local (m/s²);

h = altura do escoamento (m);

ω = velocidade de queda do sedimento (m/s);

A Figura 11 apresenta os valores destes parâmetros coletados em rios e reservatórios monitorados na China e em canais de laboratório. Nota-se, para valores mais baixos do índice de intensidade do fluxo, que a quantidade de sedimento em suspensão tem crescimento acentuado e depende diretamente do escoamento. À medida que aumenta o valor do índice de intensidade do escoamento, a variação da carga em transporte tende diminuir, sugerindo uma tendência a atingir um valor independente das características hidráulicas do escoamento.

Figura 11: Relação entre a concentração de sedimentos no fluxo e o índice de intensidade do escoamento. Fonte: Chien e Wan (1999).

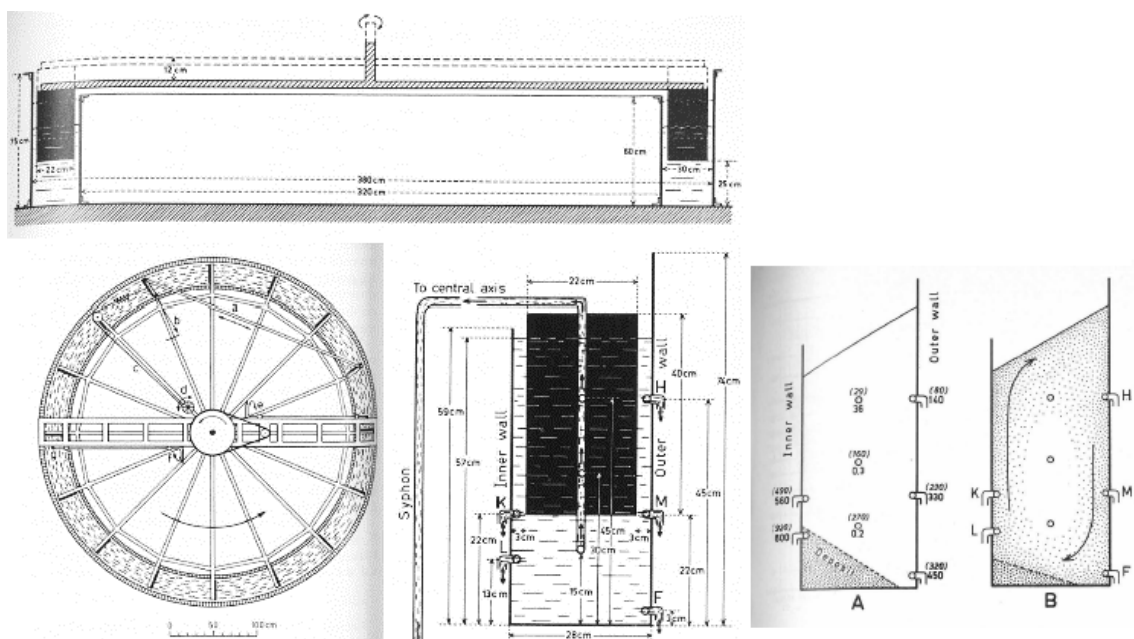


2.3.2 Competência e capacidade de transporte de correntes de turbidez

Os principais trabalhos diretamente dedicados ao estudo da competência e da capacidade de transporte das correntes de turbidez foram os de Kuenen e Sengupta (1970) e de Hiscott (1994). Ambos se propuseram a simular a capacidade de transporte e a competência de escoamentos: o primeiro através da modelagem física e, o segundo, através da modelagem numérica. Em ambos os trabalhos abordaram os conceitos observando a deposição dos grãos e não o arrancamento. Outros trabalhos abordaram os conceitos de competência do escoamento e capacidade de transporte de forma indireta, como é o caso de Parker *et al* (1987), Chamoun, de Cesare e Schleiss (2017) e Boffo *et al* (2017), detalhados a seguir.

Kuenen e Sengupta (1970) estudaram suspensões de argila e areia, em um canal circular de quatro metros de diâmetro (Figura 12). O canal possuía 30 centímetros de largura e 60 centímetros de profundidade. O movimento era obtido através de 16 pás, posicionadas a 25 centímetros do fundo do canal, que giravam segundo um eixo central e, assim, proporcionavam à água velocidades que podiam variar de alguns cm/s até 400 cm/s. Amostras da mistura em suspensão eram coletadas através de sifões de cobre (12,5 milímetros de diâmetro interno) posicionados horizontalmente e contra o fluxo.

Figura 12: Diferentes vistas do experimento de Kuenen e Sengupta (1970). Acima: vista transversal; Abaixo, da esquerda para a direita: vista superior, vista transversal mostrando o posicionamento de uma pá e dos sifões, vista transversal no momento do ensaio. Fonte: Kuenen e Sengupta (1970).



As velocidades decrescentes simuladas variaram basicamente entre 230 a 32 cm/s. Primeiramente, a maior velocidade era aplicada até que nenhum sedimento ficasse depositado no fundo, alguns minutos depois amostras eram coletadas e então a velocidade era reduzida em etapas.

O volume das amostras girava entorno de 500 a 800 cm³, as quais eram lavadas em uma peneira de 33 micra de abertura e o peso seco do sedimento retido era medido. Posteriormente, era calculada a concentração de sedimentos maiores do que 33 micra, na amostra.

No total, foram realizados 34 experimentos, onde a água presente no canal podia ser água doce ou salgada (adicionando sais à mistura), e a quantidade de sedimentos da fração menor do que 33 micra podia variar, bem como o tipo de sedimento utilizado (diferentes tipos de argilas). O mesmo vale para os sedimentos da fração maior do que 33 micra, pois foram utilizados diferentes tipos de areia, podendo variar também a quantidade.

Os autores explicam que o canal circular é útil ao estudar suspensões que percorrem grandes distâncias, como no caso das correntes de turbidez; no entanto, as pás também causam efeitos indesejáveis. Ainda, a suspensão marinha simulada por eles, difere de uma corrente de turbidez, pois não existe em seu experimento uma interface com uma camada de líquido ambiente. Apesar de o todo não ser uma corrente de turbidez, o fluxo foi considerado como sendo o equivalente à parte inferior de uma corrente de turbidez²; portanto, é necessário ter cautela ao utilizar os resultados, segundo os autores. No entanto, mesmo com todas essas ressalvas, e ainda que o estudo tenha significado um ponto de partida, inclusive hoje, este é considerado um dos mais importantes trabalhos experimentais sobre capacidade de transporte e competência das correntes de turbidez.

Os principais resultados obtidos pelos autores neste trabalho são referentes à relação da velocidade com o tamanho de grão dos sedimentos presentes na suspensão (competência) e com a quantidade de sedimentos mantidos em suspensão nas respectivas velocidades (capacidade), bem como a relação entre essas duas características. Os autores também dizem que quando a competência do escoamento e a capacidade de transporte são analisadas em conjunto, a combinação dessas duas características refletem o “poder” do escoamento.

Hiscott (1994) publicou os resultados de um estudo de simulação numérica que aborda a capacidade de transporte e a competência das correntes de turbidez, adotando o conceito de que é a capacidade de transporte, e não a competência, o principal mecanismo que controla a deposição das correntes de turbidez. Hiscott (1994) desenvolveu um programa de computador em linguagem FORTRAN, para calcular a proporção de sedimentos que deve se depositar quando uma corrente de turbidez está desacelerando. Tendo como base o turbidito interpretado por Komar (1985), foi considerada uma concentração volumétrica inicial de sedimentos (6%) de diferentes tamanhos de grão e os mesmos distribuídos, ao longo da vertical da corrente de turbidez, em diferentes proporções. Hiscott (1994) utilizou o número de Rouse (1937) para prever a distribuição vertical da concentração dos sedimentos, à medida que decrescia a velocidade de cisalhamento (u_*).

² A parte inferior (junto ao fundo) do perfil de velocidades de uma corrente de turbidez e o perfil de velocidade de um escoamento fluvial possuem semelhanças, como pode ser visualizado na Figura 1.

Neste trabalho, Hiscott (1994) concluiu que estimativas do fluxo, a partir de diâmetros característicos, tendo como base o conceito de competência, conduzem a resultados que subestimam o alcance do fluxo, uma vez que vários tamanhos de grão depositam-se, quando uma corrente de turbidez desacelera. Hiscott prova que a capacidade de transporte é o processo dominante na deposição de uma corrente de turbidez.

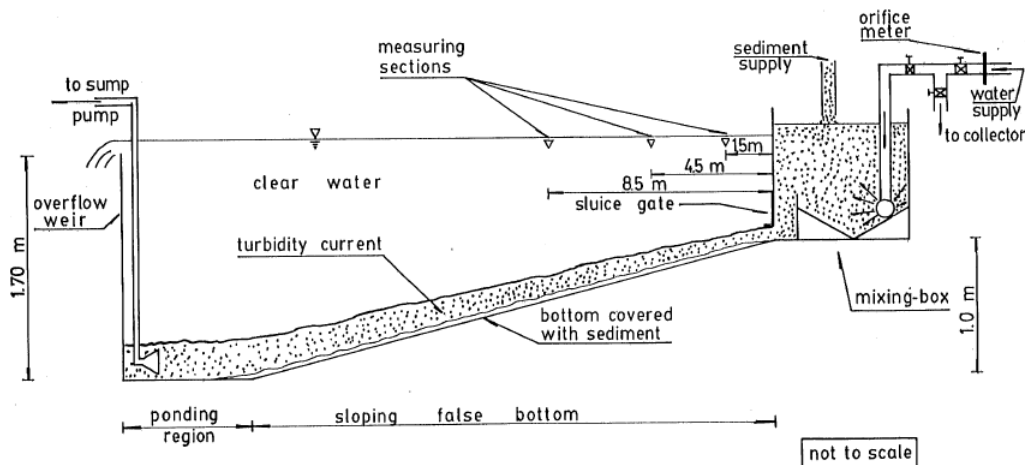
Parker et al (1987), conduziram experimentos de correntes de turbidez sobre um leito formado por sedimentos. O princípio básico dos experimentos foi que as correntes poderiam tanto erodir como depositar e a motivação para a realização do trabalho foi fornecer dados que subsidiassem a teoria de correntes de turbidez auto-suspensivas. Tal estado não foi verificado nos experimentos; no entanto, um resultado particularmente útil foi a validação de parâmetros³ das equações de movimento que regem as correntes de turbidez: o coeficiente de incorporação de fluido ambiente na parte superior da corrente (e_w), o coeficiente de incorporação do leito (E_s) pela corrente e o coeficiente de arraste (C_D). Destaca-se que a metodologia utilizada por Parker et al (1987) na simulação das correntes de turbidez foi a principal inspiração na concepção da metodologia utilizada neste trabalho.

Os experimentos foram realizados em um canal de 1,8 metros de profundidade, 2,7 metros de largura e 90 metros de comprimento (Figura 13). A coluna de água dentro do canal era de 1,7 metros e o reservatório de alimentação foi construído dentro do canal, ocupando 70 centímetros de altura. O reservatório era alimentado de água do rio Mississippi, através de um orifício (Q_{w0}), e de sedimentos, manualmente, através de um recipiente de volume conhecido (Q_{s0}). Foram mantidas constantes as vazões durante o experimento. Um misturador foi instalado para que não houvesse deposição dentro do reservatório e para que a mistura fosse bem homogeneizada. A temperatura da água do canal e da mistura no reservatório foi medida para garantir que não houvesse estratificação. A mistura entrava no canal através de uma comporta de altura variável (h_0 , U_0 e C_0) no fundo do reservatório. A inclinação do canal (I) variou de 5 % a 8 % e o comprimento do leito variou de 20 metros a 12,5 metros. Após esse trecho inclinado, havia uma região sem inclinação de 3 a 5 metros de comprimento. No final do canal, havia um vertedor para manter o nível d'água constante e, no fundo, a corrente era

³ Apenas o coeficiente E_s é abordado nesta revisão bibliográfica.

bombeada com a mesma vazão da alimentação. O experimento durava de 6 a 8 minutos, terminando no momento em que a corrente refletia para montante.

Figura 13: Esquema experimental (vista longitudinal) de Parker *et al* (1987). Fonte: Parker *et al* (1987).



O leito tinha a espessura de um a dois centímetros (alisado o máximo possível e muitas vezes o sedimento era molhado previamente, para evitar a formação bolhas de ar) e comprimento de, no mínimo, 10 metros a partir da saída do reservatório. O sedimento utilizado foi sílica, tanto para o leito como para a mistura. Foram utilizados dois tipos de sílica: um com $D_{50} = 30 \mu\text{m}$ e outro com $D_{50} = 60 \mu\text{m}$.

Medições de velocidade e concentração foram realizadas ao longo da vertical e em três pontos localizados ao longo do canal, na parte central, após aproximadamente 1 a 1,5 minutos do início do ensaio, quando o fluxo já estava permanente e uniforme.

O medidor de velocidade (micro molinete de 3 mm de diâmetro) possuía acurácia de $\pm 1 \text{ mm/s}$ e intervalo de medição entre 2,5 e 100 cm/s. O mesmo foi posicionado de um a dois centímetros acima do leito até 30 centímetros, sendo tomadas de 5 a 6 medidas em cada seção. A concentração foi medida através da análise de amostras da corrente de turbidez, coletadas através de sifões. Em cada seção foram posicionados seis sifões feitos de tubos de bronze de 5 mm de diâmetro. As posições eram: 1,5 cm, 3,5 cm, 8,5 cm, 13,5 cm, 21,5 cm e 29,5 cm a partir do leito. As amostras eram coletadas em um *Becker*, por um período curto de tempo ($\sim 30 \text{ s}$).

Para cada ponto de medição foram calculados, através dos perfis coletados e das equações governantes⁴, a concentração volumétrica média C_c , a altura média h_c e a velocidade média U_c . Tendo isso, os autores calcularam se a corrente estava desacelerando ou acelerando e se estava depositando ou erodindo, observado a evolução da velocidade e da descarga sólida (Equação 15) nos três pontos de medição. A Tabela 1 mostra o resultado desta observação, mostrando que apenas duas correntes foram capazes de erodir o leito.

$$\Psi = U_c C_c h_c \quad \text{Equação 15}$$

Onde:

Ψ = descarga sólida por unidade de largura (m^2/s);

U_c = velocidade média da corrente de densidade (m/s);

C_c = concentração volumétrica média da corrente de densidade (-);

h_c = altura média da corrente de densidade (m).

Tabela 1: Resultado da análise do desenvolvimento espacial das correntes de turbidez simuladas por Parker et al (1987). Fonte: Parker et al (1987).

variation of U with x	variation of ψ with x	current	No. of runs
$dU/dx < 0$	$d\psi/dx < 0$	decelerating depositing	3
$dU/dx > 0$	$d\psi/dx < 0$	accelerating depositing	13
$dU/dx < 0$	$d\psi/dx > 0$	decelerating eroding	0
$dU/dx > 0$	$d\psi/dx > 0$	accelerating eroding	2

4

$$Uh = \int_0^{\infty} u dy$$

$$U^2h = \int_0^{\infty} u^2 dy$$

$$UCh = \int_0^{\infty} ucdy$$

Onde:

U = velocidade média (m/s);

C = concentração volumétrica média (-);

h = altura média (m);

u = velocidade instantânea (m/s);

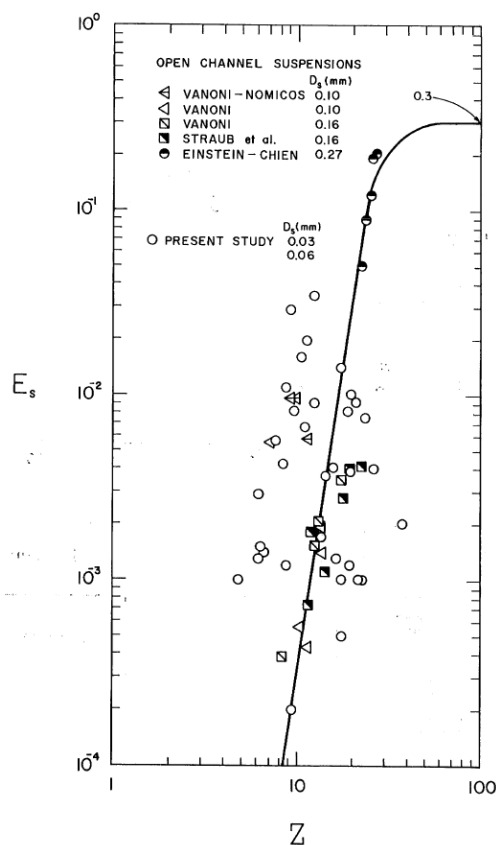
c = concentração volumétrica instantânea (-);

y = altura a partir do leito (m).

Os autores avaliaram o coeficiente de incorporação do material do leito pela corrente de turbidez (E_s), comparando os resultados com coeficientes E_s obtidos em estudos de canal à superfície livre, conforme a Figura 14. Nesta figura pode-se notar uma linha de tendência, ajustada a partir de dados extraídos de escoamentos à superfície livre, a qual descreve o coeficiente E_s em função do parâmetro Z , descrito na legenda da mesma. Observando-se o posicionamento dos pontos experimentais de Parker *et al* (1987) nota-se que para um mesmo valor do parâmetro Z tem-se uma variabilidade de até três ordens de grandeza. Se o parâmetro E_s fosse estimado através da linha ajustada ele, essa variabilidade não estaria sendo refletida adequadamente.

Figura 14: Gráfico do coeficiente E_s em função do parâmetro Z que por sua vez é especificado a partir dos parâmetros $\mu = u_* / \omega$ e $R_p = (Rgd)^{1/2}d/v$, da seguinte forma: $Z = \mu R_p^{0,75}$, onde: u_* é a velocidade de cisalhamento (m/s), ω = velocidade de queda do sedimento (m/s), $R = (\rho_s - \rho_a) / \rho_a$, ρ_s = massa específica do sedimento (kg/m^3), ρ_a = massa específica do fluido ambiente (kg/m^3), g = aceleração da gravidade local (m/s^2), d = diâmetro do sedimento (m) e v = viscosidade cinemática do fluido (m^2/s).

Fonte: Parker *et al* (1987).



Os autores calcularam através dos dados experimentais o coeficiente E_s a partir da equação de conservação da fase sólida (Equação 16). Esta equação representa a variação da descarga sólida ao longo do sentido principal do fluxo $\left(\frac{d\Psi}{dx}\right)$. O lado direito desta equação é composto por duas parcelas, F_b (fluxo de sedimentos próximo ao leito, do leito para a corrente, dado pela Equação 17), e ωc_b (fluxo de sedimentos próximo ao leito, da corrente para o leito). Por consequência, quando:

- $F_b > \omega c_b$: ocorre erosão;
- $F_b = \omega c_b$: estado de equilíbrio;
- $F_b < \omega c_b$: ocorre deposição.

$$\frac{d\Psi}{dx} = \frac{dU_c C_c h}{dx} = F_b - \omega c_b \quad \text{Equação 16}$$

$$F_b = \omega E_s \quad \text{Equação 17}$$

Onde:

U_c = velocidade média da corrente de densidade (m/s);

C_c = concentração média da corrente de densidade (-);

h_c = altura média da corrente de densidade (m);

ω = velocidade de queda do sedimento (m/s);

c_b = concentração no nível de referência (-).

Para finalizar, os autores consideraram os experimentos válidos para a estimativa de parâmetros que regem as equações governantes do movimento das correntes de turbidez, apesar de todas as ressalvas e incertezas experimentais citadas ao longo do artigo, como por exemplo: imprecisão da posição, com relação ao leito, dos medidores de velocidade e sifões, alimentação de sedimentos feita manualmente com precisão aproximada de 10 %, influência das condições de entrada na primeira seção de medição, falhas de medição da velocidade pela presença de sedimentos, funcionamento imperfeito do sifão na coleta de misturas, etc. Ainda, embora os autores tenham classificado apenas duas correntes como erodíveis, quase todas correntes geraram formas de leito.

Talling *et al* (2015) abordaram os avanços recentes e as principais temáticas no futuro das pesquisas sobre correntes de turbidez. Os avanços enfatizados pelos autores no tópico “Importância do amortecimento da turbulência, tamanho de grão, competência e capacidade – avanços recentes”⁵ que estão relacionados com este trabalho, referem-se a dois estados de equilíbrio aonde para uma mesma velocidade é possível a existência de um fluxo mais turbulento e menos concentrado e outro que é o oposto. No entanto, descata-se que esse estados foram verificados a partir de dados obtidos no rio Amarelo, localizado na China. Os autores ressaltam a necessidade de novos estudos experimentais para correntes de turbidez focados na relação entre a potência do fluxo, competência e capacidade de transporte.

Alguns estudos experimentais recentes abordaram o conceito de **eficiência das correntes de turbidez** (CHAMOUN; DE CESARE e SCHLEISS, 2017; BOFFO *et al*, 2017; BUFFON, 2014 e MANICA, 2009). Em todos os trabalhos o conceito de eficiência de transporte (razão entre o sedimento transferido para jusante e o sedimento retido) ou de retenção de sedimentos (razão entre o sedimento depositado e o sedimento transferido para jusante) foi aplicado de forma global no canal ou tanque experimental utilizado. Os dois trabalhos mais relevantes no contexto dessa pesquisa são o de Chamoun, de Cesare e Schleiss (2017) e o de Boffo *et al* (2017).

Chamoun, de Cesare e Schleiss (2017) aplicaram o conceito de eficiência de transporte ao estudo de descargas de fundo em barragens, estruturas que permitem a passagem de fluxos de correntes de turbidez, evitando o assoreamento do reservatório. Nesse estudo foram utilizadas diferentes inclinações e a concentração e a vazão de injeção foram mantidas constantes. O resultado mais relevante sob a ótica dessa pesquisa é que a eficiência de transporte das correntes de turbidez através da descarga de fundo atingiu valores que variaram com a mudança de declividade do canal, sendo que as maiores inclinações proporcionaram o aumento da eficiência.

Boffo *et al* (2017) utilizaram o conceito da eficiência de transporte no estudo de correntes de turbidez com o intuito de buscar padrões na geração de depósitos turbidíticos. Foram simulados fluxos com uma extensa faixa de concentração volumétrica na injeção, para a mesma condição de inclinação do canal experimental e de vazão na injeção. Como principais resultados destaca-se a invariância da eficiência de transporte para fluxos com

⁵ Importance of turbulence Damping, Grain Size, Competence, and Capacity (TALLING *et al*, 2015).

concentrações volumétricas variando de 2% a aproximadamente 20%. Para concentrações superiores a 20% a eficiência de transporte variou positivamente com o acréscimo da concentração volumétrica. Essa mudança de comportamento foi relacionada com a transição do regime reológico e do principal mecanismo de suporte de grãos das suspensões.

Pode-se concluir, através da revisão bibliográfica apresentada, que poucos trabalhos foram realizados com foco específico nos conceitos de competência do escoamento e de capacidade de transporte das correntes de turbidez (KUENEN e SENGUPTA, 1970; HISCOTT, 1994). No entanto, o trabalho de Hiscott (1994) e de Parker *et al* (1987) sugerem que erros significativos podem ocorrer quando os conceitos e parâmetros oriundos da hidráulica fluvial são aplicados no caso das correntes de turbidez. Esse trabalho, portanto, buscou preencher a lacuna que existe entre a origem desses conceitos e a sua aplicação em correntes de densidade.

Nesse contexto, também foram apresentados alguns trabalhos que abordaram a eficiência das correntes de turbidez, destacando-se os trabalhos de Chamoun, de Cesare e Schleiss (2017) e de Boffo *et al* (2017). A eficiência no contexto desse trabalho foi utilizada como uma forma alternativa de avaliar o resultado da combinação dos conceitos de competência e de capacidade de transporte dos fluxos, ou seja, o “poder” do escoamento, como referiram-se Kuenen e Sengupta (1970).

3 APARATO EXPERIMENTAL E METODOLOGIA

A descrição do aparato experimental e da metodologia foi dividida em quatro partes principais, descritas nas próximas subseções:

- 3.1) Aparato experimental;
- 3.2) Sedimento;
- 3.3) Metodologia experimental;
- 3.4) Tratamento dos dados adquiridos.

3.1 Aparato experimental

O aparato experimental utilizado nas simulações é descrito a seguir.

3.1.1 Canal, alimentação e saída

O canal bidimensional de vidro (Figura 15) possui dimensões de 400 cm de comprimento, 12 cm de largura e 40 cm de altura. O canal possui inclinação variável, ajustada através de dois tripés que sustentam o mesmo, e um fundo falso de acrílico, com exceção de um trecho de 95 centímetros de comprimento, que tem início a 220 centímetros de distância do início do canal. O fundo falso é coberto por uma lixa d'água grão 60, simulando uma rugosidade similar àquela dos leitos construídos com sedimento em trecho do canal situado entre 220 e 315 cm do canal (Figura 16).

Figura 15: Desenho esquemático do canal bidimensional de vidro – Fora de escala. Os números em vermelho indicam a distância em centímetros, a partir do início do canal. Créditos da ilustração: Carolina H. Boffo.

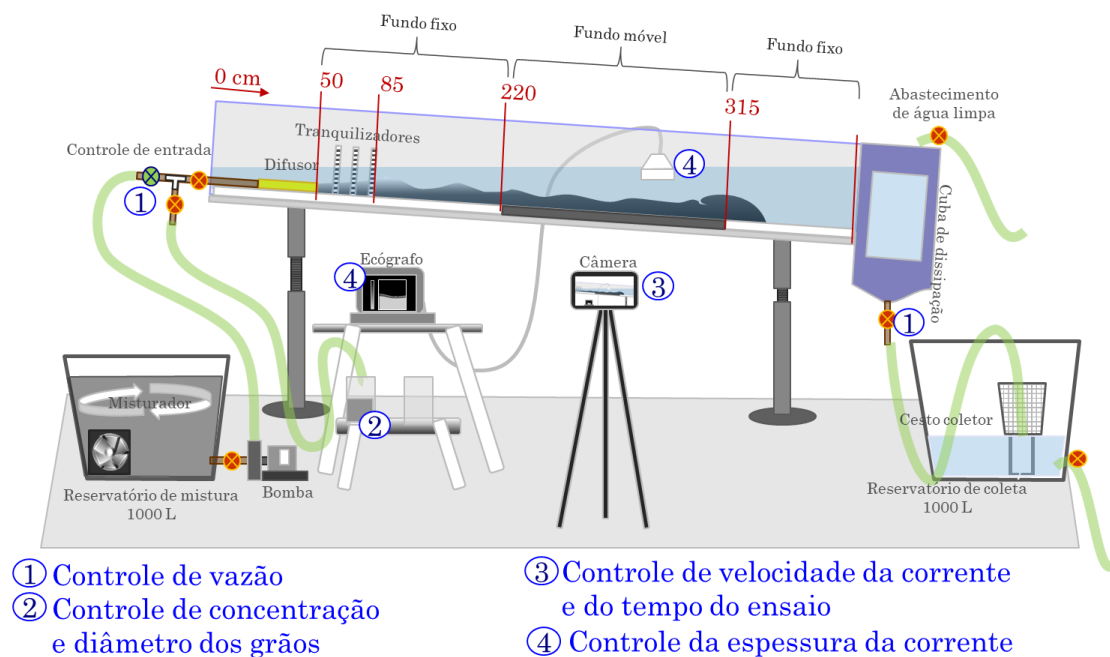


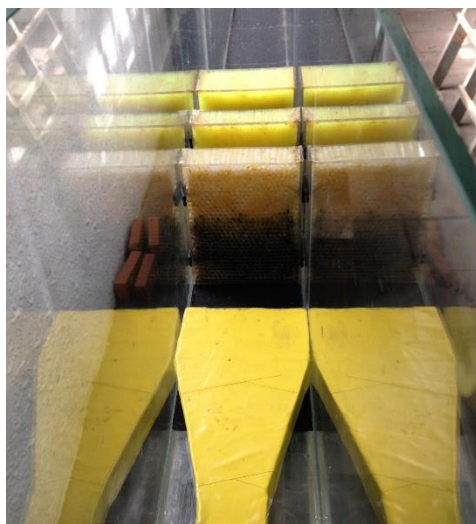
Figura 16: Detalhe da transição entre o fundo fixo e o leito móvel.



A alimentação é provida de um reservatório de 1000 litros de capacidade com misturador eletromecânico e um sistema de bombeamento para elevar a mistura até o canal. A tubulação de entrada tem o formato de um T, com registros nas três ramificações. O primeiro registro é do tipo gaveta, o qual permite a regulação da vazão de entrada. Os outros dois registros são do tipo esfera, utilizados para cessar ou permitir o escoamento

na tubulação quando necessário. Um difusor proporciona a entrada da mistura no canal à distância de 50 centímetros do início do mesmo e, à 10 centímetros do difusor, foram instalados três tranquilizadores de fluxo espaçados de 10 centímetros cada um (Figura 17).

Figura 17: Difusor e tranquilizadores na entrada do canal.



Na saída, o canal possui uma cuba (40 x 60 centímetros) com tubulação no fundo para o seu esvaziamento e um registro gaveta. A tubulação é direcionada para um coletor de sedimentos (tela de *nylon* com abertura de 32 micra) posicionado em um reservatório de 1000 litros, que recebe o excesso da corrente. Para garantir que o nível do fluido ambiente do canal seja constante, na cuba instalou-se uma tubulação de alimentação de água limpa com tranquilizador, cuja a vazão era de aproximadamente 5 l/min, de forma a compensar o volume de água drenado para o reservatório.

3.1.2 Ponta linimétrica e suporte para medição

Uma ponta linimétrica (Figura 18) com resolução de 0,1 milímetros foi utilizada para o levantamento do perfil longitudinal central do leito móvel, antes e após o ensaio. Também foi utilizado um suporte com 38 posições fixas e espaçadas de 2,5 cm para efetuar as medições nos mesmos pontos e na parte central do canal.

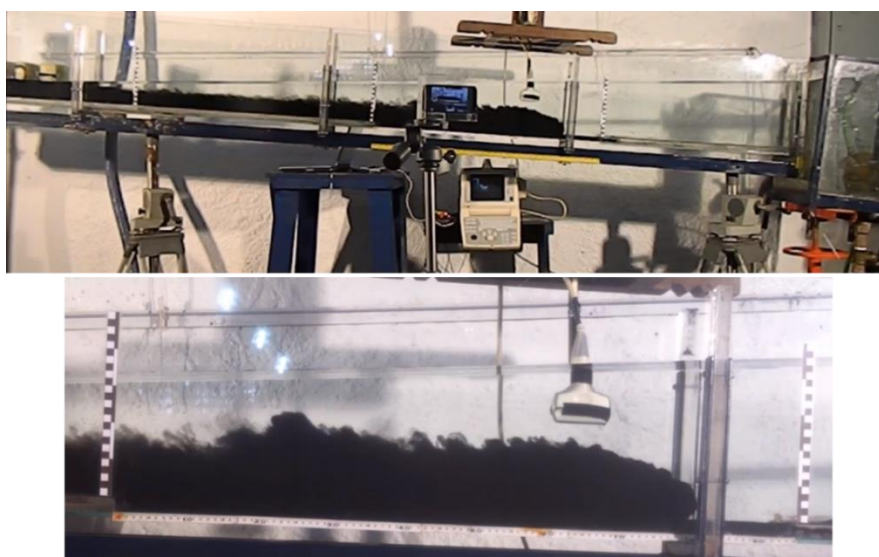
Figura 18: Ponta linimétrica e suporte utilizado nas medições do perfil longitudinal do leito móvel



3.1.3 Câmeras fotográficas

Duas câmeras fotográficas modelos Coolpix L120 da marca Nikon e iPhone A1332 da marca Apple foram utilizadas para registrar o ensaio. Os enquadramentos das câmeras permitiram registrar a passagem da corrente ao longo do comprimento do canal e ao longo do trecho do leito móvel (Figura 19).

Figura 19: Enquadramento das câmeras utilizado nas filmagens.



3.1.4 Ecógrafo médico

Um ecógrafo médico modelo LOGIQ™ α 100 e uma sonda linear L76 da marca GE Medical Systems (Figura 19) foram utilizados para a obtenção de imagens internas das correntes de turbidez simuladas. A sonda emite ondas de ultrassom com frequência de 7,5 MHz e capta o eco quando as mesmas colidem com um obstáculo, transformando-o em imagens com escala em tons de cinza. A imagem possui 6 centímetros de largura e 15 centímetros de altura (profundidade). Um *software* de aquisição de vídeos instalado em um computador conectado ao ecógrafo foi utilizado para a aquisição de imagens em tempo real. A frequência de aquisição de imagens foi de dois quadros por segundo e a sonda foi posicionada paralelamente ao fundo do canal a aproximadamente 285 centímetros do início do mesmo ou a aproximadamente 65 centímetros do início do leito móvel, considerando o ponto médio da sonda.

3.1.5 Peneiras

Três peneiras de dimensões 70 x 210 centímetros e com aberturas de 250 micra, 125 micra e 63 micra foram utilizadas para a seleção do sedimento com faixas de tamanho de grãos específicas. As peneiras foram confeccionadas com telas de aço inox e estruturas de madeira. Também foram utilizadas três peneiras pequenas de diâmetro com as mesmas aberturas para o repeneiramento (reaproveitamento) do sedimento após os ensaios e coleta dos dados.

3.1.6 Analisador de partículas

Um analisador de partículas a laser CILAS modelo 1180 foi utilizado para a análise granulométrica dos sedimentos. O equipamento permite diferenciar partículas com diâmetros variando entre 0,04 micra e 2500 micra através dos fenômenos da difração de um feixe de raio laser.

3.1.7 Outros equipamentos

Também foram utilizadas balanças (Marte modelo Ad 5002 – precisão de 0,01 g e Toledo modelo 3400-IV – precisão de 0,1 g), estufa, recipientes para a coleta de amostras, recipientes para a coleta do sedimento, termômetro e dois holofotes.

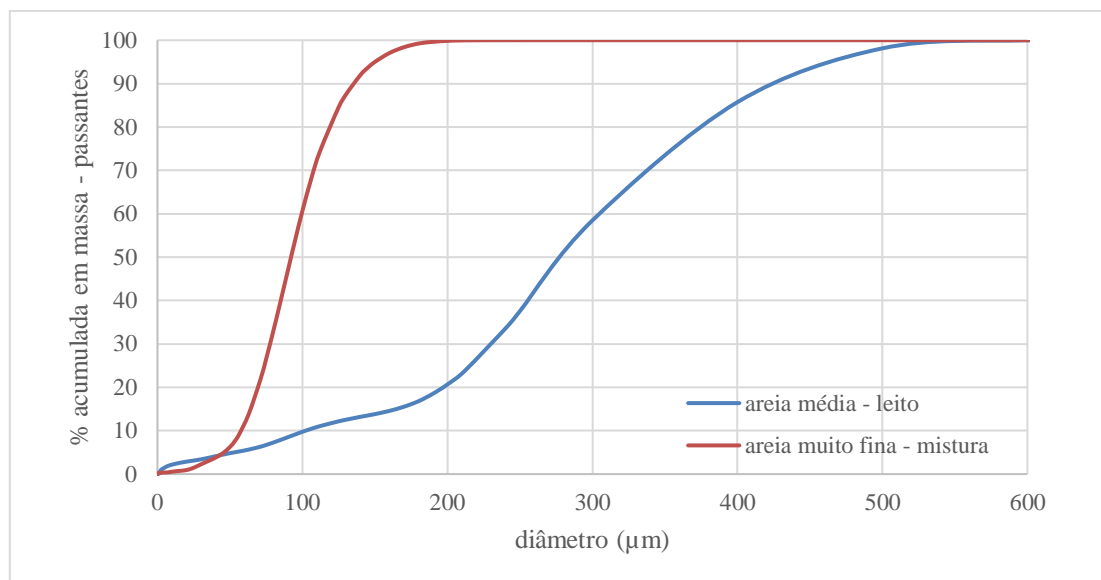
3.2 Sedimento

O sedimento utilizado foi o carvão mineral granular do tipo Cardiff que possui ampla distribuição granulométrica (frações argila a areia grossa - segundo a escala de grãos de Udden-Wentworth, 1922). O mesmo foi submetido a um processo de lavagem e peneiramento para a obtenção das frações granulométricas que foram utilizadas na composição do leito móvel e das correntes de turbidez simuladas.

O procedimento de obtenção dessas frações consistiu primeiramente na remoção da fração mais fina de sedimentos. Esse processo foi realizado em um reservatório de 2000 litros com misturador eletromecânico operando com frequência baixa, proporcionando a suspensão das partículas mais finas. Através da alimentação constante do reservatório a mistura em suspensão extravasava através de um orifício na parte superior do reservatório. O carvão remanescente foi peneirado a úmido afim de selecionar três faixas granulométricas distintas: areia muito fina (de 62 a 125 micra), areia fina (de 125 a 250 micra) e areia média (de 250 a 500 micra), segundo a escala de grãos de Udden-Wentworth (1922).

A fração areia muito fina (Figura 20) foi utilizada na composição da corrente e a fração areia média (Figura 20) foi utilizada na composição do leito. A massa específica e a porosidade das duas faixas granulométricas selecionadas foram determinadas através do método do picnômetro (CAUDURO; DORFMAN, s.d.) e a velocidade de queda de ambas as frações foi determinada através do método do siltômetro. A massa específica média do carvão resultou em 1405 kg/m^3 e a porosidade média resultou em 47,5%. A velocidade de queda média para a fração areia muito fina resultou em 0,010 m/s e para a fração areia média resultou em 0,23 m/s.

Figura 20: Curvas granulométricas do sedimento utilizado na composição do leito e da mistura.



3.3 Metodologia experimental

A metodologia experimental foi dividida em três partes principais: antes do ensaio, durante o ensaio e após o ensaio, abordadas separadamente nas próximas subseções.

3.3.1 Antes do ensaio

A etapa pré-ensaio consistiu na preparação da mistura sedimentar e do leito móvel, descritas abaixo, além da instalação dos equipamentos.

3.3.1.1 Mistura sedimentar

A quantidade de sedimentos e o volume de água necessários são calculados através das relações expressas nas Equações 18 e 19 de acordo com a concentração volumétrica pretendida. A homogeneização da mistura era realizada através do agitador eletromecânico instalado no reservatório de entrada.

$$M = \rho_s \cdot \text{Vol} \cdot C_v \quad \text{Equação 18}$$

$$\text{Vol}_a = \text{Vol} - (\text{Vol} \cdot C_v) \quad \text{Equação 19}$$

Onde:

M = massa de carvão na mistura (kg);

Vol = volume de mistura a ser preparada (m^3);

Vol_a = volume de água na mistura (m^3);

ρ_s = massa específica do sedimento (kg/m^3);

CV = concentração volumétrica (-).

3.3.1.2 Leito móvel

A preparação do leito móvel primeiramente se dava pela disposição do material seco sobre o trecho do canal previsto para recebê-lo, sendo acomodado com o auxílio de uma espátula (Figura 21). Em seguida o canal era preenchido lentamente com água, de jusante para montante. Para finalizar, os grãos deslocados para fora da seção do leito móvel eram removidos. Na sequência, era realizada a leitura do perfil longitudinal do leito móvel.

Figura 21: Espátula confeccionada para padronizar a construção do leito móvel



3.3.2 Ensaio

Considerando a entrada de água limpa na cuba que é mantida até cessar por completo o experimento e a vazão injetada no início do canal quando do início do ensaio, o registro de saída era regulado de forma a manter o nível de água no canal aproximadamente constante e igual a 18 centímetros na posição média do leito móvel.

Uma amostra da mistura era coletada (aproximadamente um litro) antes de iniciar a injeção da mistura no canal. O procedimento era realizado da seguinte maneira: a bomba era ligada e o registro esfera da tubulação direcionada para baixo era aberto; após um intervalo de tempo suficiente para o ajuste da vazão e para a limpeza da bomba e da tubulação a amostra era coletada. O ajuste da vazão era realizado por meio do posicionamento do registro gaveta, de acordo com a calibração realizada previamente aos experimentos. O ajuste aproximado estava na posição 45° e 90° para a menor (entre 15 e 20 l/min) e para a maior faixa de vazões simuladas (entre 20 e 25 l/min), respectivamente. A faixa de vazões utilizadas foi definida através da não adequabilidade de vazões menores do que 15 l/min e maiores do que 25 l/min à instalação experimental utilizada.

Após a amostragem da mistura, iniciava-se o ensaio propriamente dito e um fluxo contínuo se estabelecia após um período de tempo que variava para cada ensaio. A mistura que saía do canal era direcionada para o reservatório de saída passando pela tela que coletava os sedimentos. O corte da injeção de mistura (fim do ensaio) era determinado através de dois critérios. O primeiro deles era a saturação da cuba (predominância de sedimentos em suspensão na coluna de água) e o consequente retorno de sedimento no sentido contrário ao fluxo. O segundo deles era a limitação do volume de mistura no reservatório de entrada. Normalmente o segundo critério era aplicado na simulação das correntes de turbidez muito diluídas, pois a mistura terminava antes da saturação da cuba.

Concomitantemente ao fechamento do registro que permitia a entrada da mistura no canal, o registro de saída era ajustado para uma vazão menor novamente similar àquela de entrada de água limpa na cuba. Ambos os registros eram completamente fechados quando o fluxo terminava. Também, instantes após o término do ensaio, uma amostra da mistura era novamente coletada.

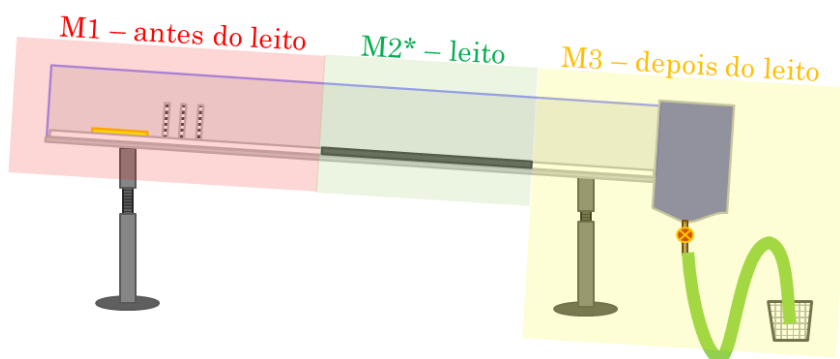
3.3.3 Depois do ensaio

Finalizado o ensaio, esperava-se a deposição dos sedimentos presentes na corrente de turbidez, antes de se proceder à nova leitura da seção longitudinal do leito móvel. Posteriormente, o canal era esvaziado lentamente e todo o sedimento era coletado. A coleta de sedimento foi dividida em três partes (Figura 22):

- Massa 1 (M1): todo o sedimento depositado antes do início do leito móvel, incluindo aquele depositado na região do difusor e do tranquilizador;

- Massa 2* (M2*): todo o sedimento depositado no trecho do leito móvel, incluindo o próprio leito móvel;
- Massa 3 (M3): todo o sedimento depositado após o leito móvel, incluindo o sedimento presente na cuba e na tela de coleta de sedimento (reservatório de saída).

Figura 22: Desenho esquemático do canal, ressaltando a delimitação dos locais de coleta do sedimento.



A coleta era realizada de jusante para montante e a metodologia aplicada para a coleta de cada quantidade descrita anteriormente é descrita a seguir. Primeiramente, a maior quantidade de sedimento era coletada com o auxílio de uma espátula e o sedimento remanescente era coletado utilizando água corrente. Após a decantação do material em recipientes de 12 litros, a água clara era removida e o sedimento era direcionado para a secagem na estufa. Quando completamente seco, o material era pesado e uma ou mais análises granulométricas eram realizadas. Após a aquisição dos dados o material era peneirado e utilizado nos próximos experimentos.

3.4 Tratamento dos dados adquiridos

O tratamento dos dados adquiridos nos ensaios é descrito nas subseções a seguir. Os principais dados adquiridos são: duração do ensaio, velocidade de avanço e altura das correntes de turbidez, perfis longitudinais e volume do leito móvel, balanço de massa e descargas sólidas, concentração e vazão da mistura de injeção e diâmetros característicos do sedimento injetado, utilizado na construção do leito móvel e depositado pelos fluxos antes e após do leito móvel.

3.4.1 Duração do ensaio e velocidade de avanço das correntes de turbidez

Os vídeos adquiridos com as câmeras fotográficas foram editados de modo a começarem no instante de abertura do registro que permitia a entrada da mistura no canal e a terminarem um minuto após ao fechamento do mesmo. Essa edição facilitou as análises visuais dos ensaios realizados.

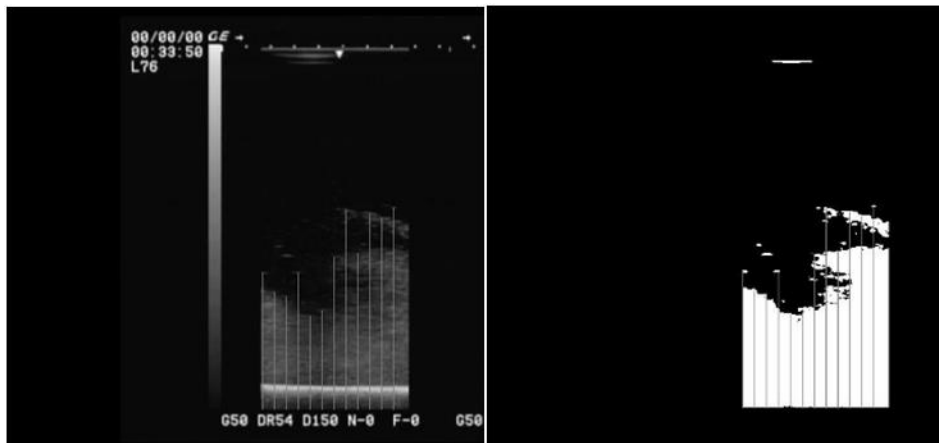
A análise dos vídeos permitiu a obtenção do tempo de duração do ensaio, bem como o cálculo da velocidade de avanço das correntes de turbidez simuladas. As velocidades de avanço da corrente foram obtidas analisando o tempo que a corrente de turbidez levou para percorrer a seção do leito móvel, tomando como referência o nariz da corrente.

3.4.2 Alturas das correntes de turbidez e série temporal de imagens

As imagens adquiridas com o uso do ecógrafo médico foram tratadas para a obtenção da espessura das correntes e para a montagem de uma série temporal das mesmas. Além disso, as imagens iniciais também foram utilizadas para estimar a velocidade de avanço das correntes no trecho capturado pelo ecógrafo (equivalente à largura da sonda que é de 6 centímetros).

A altura da corrente foi determinada de forma automatizada através de uma rotina desenvolvida no *software* Matlab. Em uma mesma imagem são realizadas 12 medições (linhas verticais) espaçadas de 0,5 centímetros na horizontal. Em cada linha vertical, a rotina considera como corrente de turbidez os *pixels* que possuem valor maior do que 0,2 (preto = 0 e branco = 1) e também os *pixels* com valores menores do que 0,2, desde que não sejam mais do que 40 *pixels* consecutivos, evitando que a rotina desconsidere a camada de mistura da corrente. Cabe ressaltar que a altura medida pela rotina de cálculos (Figura 23) inclui a espessura do depósito, sendo essa posteriormente subtraída do valor adquirido. Ainda, optou-se por analisar o número de imagens adquiridas durante um intervalo de tempo equivalente àquele que a corrente levou para chegar até a sonda do ecógrafo e o valor de altura adotado foi a média entre todos os valores obtidos. A rotina desenvolvida também possibilitou a montagem do conjunto das imagens temporais registradas, até aproximadamente 60 segundos após o término da injeção, utilizando uma imagem a cada 10 segundos (ANEXO II).

Figura 23: Exemplo da leitura da altura da corrente realizada pela rotina de cálculos.



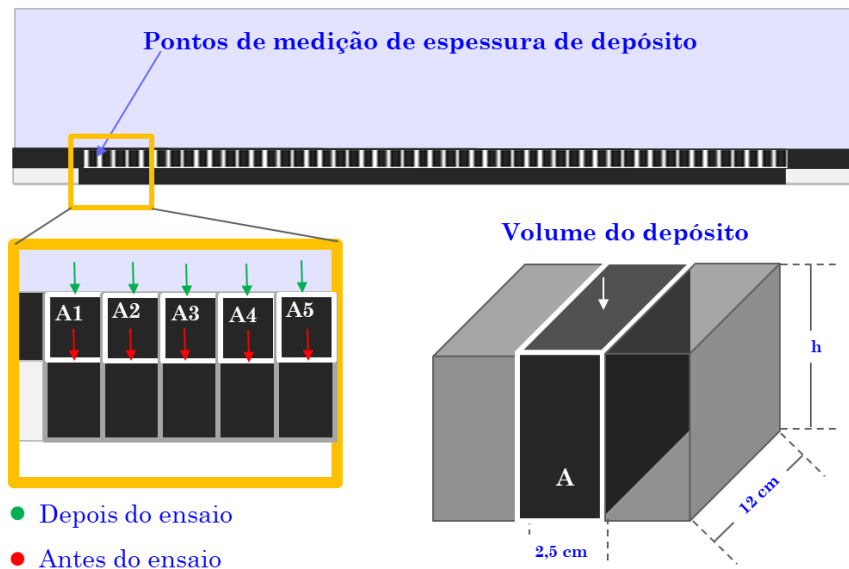
A velocidade de avanço na passagem da corrente pela sonda do ecógrafo foi estimada através da primeira e da última imagem nas quais o nariz da corrente de turbidez foi captado. A distância considerada corresponde à diferença entre as posições do nariz da corrente nessas duas imagens e o intervalo de tempo correspondente foi estimado através do número de imagens entre esses dois momentos, dado que uma imagem era adquirida a cada 0,5 s.

3.4.3 Perfis longitudinais e volumes do leito móvel

O levantamento do perfil longitudinal do depósito na seção do leito móvel foi realizado antes e depois do ensaio utilizando uma ponta linimétrica. Das leituras realizadas foram subtraídas as leituras do fundo do canal. Sendo assim, os valores resultantes correspondem às espessuras do depósito antes e após o ensaio (ANEXO I).

O volume do depósito antes e após o ensaio foi estimado através dos valores da espessura em cada ponto de medição (Figura 24), ou seja, para cada valor de espessura calculou-se uma parcela do volume, considerando que esse valor representa uma área que se estende 1,25 centímetros para montante e para jusante do ponto de coleta. O somatório de todas as parcelas corresponde ao volume do depósito, sendo que o volume estimado depois do ensaio menos o volume de antes do ensaio corresponde ao volume de depósito gerado pela corrente de turbidez na seção do leito móvel.

Figura 24: Desenho esquemático do cálculo do volume do depósito. Créditos da ilustração: Carolina H. Boffo.



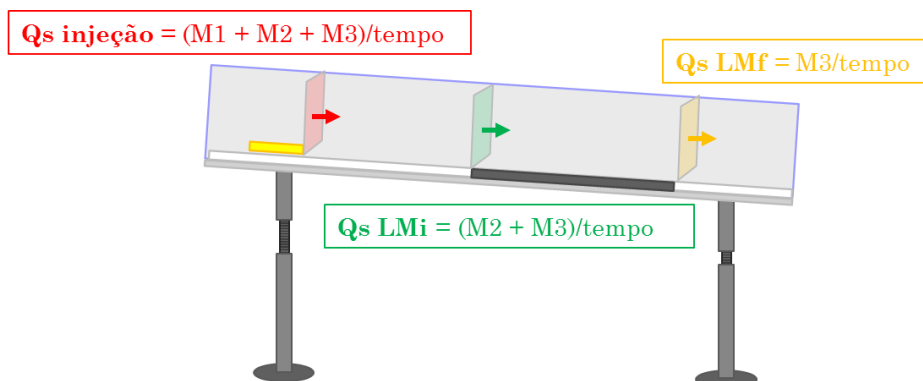
3.4.4 Balanço de massa e descargas sólidas

A massa do sedimento injetado no canal foi quantificada após o ensaio em três partes: no trecho antes do leito móvel (M_1), no leito (M_2^*) e depois do leito (M_3). Como já descrito na Subseção “3.3.3 Depois do ensaio” a quantidade coletada no trecho do leito móvel inclui o próprio leito móvel, construído antes do ensaio. De forma a quantificar a massa do depósito gerado pela corrente de turbidez no trecho do leito móvel, uma regra de três simples foi aplicada entre o volume do depósito após o ensaio, a massa do depósito após o ensaio (M_2^*) e o volume do leito móvel, resultando na massa do mesmo. Assim, foi possível subtrair da massa M_2^* a massa do sedimento utilizado na construção do leito móvel antes do ensaio, resultando na massa depositada pela corrente de turbidez (chamada de M_2). Para todas as análises realizadas posteriormente, apenas o depósito gerado pela corrente de turbidez foi levado em consideração. Considerou-se que a massa total injetada no canal (M_{total}) corresponde ao somatório das massas M_1 , M_2 e M_3 .

As descargas sólidas foram calculadas em três seções transversais: no início do canal (injeção), na entrada e na saída do leito móvel (Q_s total, Q_s LMI e Q_s LMf, respectivamente) - Figura 25. O cálculo foi realizado por meio da razão entre a massa de sedimento que foi transportada através da seção transversal e da duração do ensaio. Na entrada do canal, a massa de sedimento corresponde à soma das três quantidades levantadas (M_1 , M_2 e M_3), ou seja, a massa total injetada no canal. Na entrada do leito

móvel a massa de sedimento corresponde à soma das quantidades M2 e M3 e, por fim, na saída do leito móvel, a massa corresponde apenas à quantidade M3.

Figura 25: Desenho esquemático da estimativa das descargas sólidas.



3.4.5 Concentração volumétrica da mistura sedimentar

As amostras da mistura, coletadas na tubulação de injeção, antes e após cada ensaio, foram utilizadas para a obtenção do valor da concentração volumétrica da mistura injetada no canal. O procedimento para o cálculo desses valores, após secagem das amostras em estufa, consistiu em:

- Obtenção da massa de mistura coletada;
- Obtenção da massa de sedimentos secos na mistura;
- Obtenção da massa de água na mistura;
- Conversão dos valores de massa para volume;
- Cálculo da concentração volumétrica das misturas através da relação entre o volume de sedimentos e o volume da mistura nas amostras.

Os valores de massa são convertidos para valores em volume através da massa específica do sedimento (1405 kg/m^3) e da água que varia com a temperatura segundo a Equação 20). O valor médio da concentração volumétrica de cada ensaio foi utilizado para caracterizar a mistura sedimentar.

$$\rho = (0,9999 + (53,53 * 10^{-6})T - (72,42 * 10^{-7})T^2 + (27,28 * 10^{-9})T^3) * 1000 \quad \text{Equação 20}$$

Onde:

ρ = massa específica do fluido (kg/m^3);

T = temperatura da água ($^{\circ}\text{C}$).

3.4.6 Vazão de injeção

A vazão da mistura injetada no canal foi estimada, indiretamente, através do conhecimento da descarga sólida e da concentração volumétrica na injeção, conforme descrito na Equação 30. Dessa maneira foi possível estimar o valor da vazão de injeção, previamente inserida dentro de uma faixa de vazões, segundo a posição do registro gaveta na tubulação de entrada.

$$Q_{\text{injeção}} = \frac{Q_{S_{\text{injeção}}}}{\rho_s CV_{\text{injeção}}} \quad \text{Equação 21}$$

Onde:

$Q_{\text{injeção}}$ = vazão de injeção (l/min);

$Q_{S_{\text{injeção}}}$ = descarga sólida na injeção (g/min);

ρ_s = massa específica do sedimento = 1405 kg/m^3 ;

$CV_{\text{injeção}}$ = concentração volumétrica da mistura de injeção.

3.4.7 Diâmetros característicos

Foram realizadas análises granulométricas de uma ou mais amostras do sedimento presente no leito móvel, nos exemplares da mistura sedimentar utilizados para a determinação da sua concentração volumétrica e no sedimento coletado após o ensaio no trecho antes e depois do leito móvel.

As análises granulométricas realizadas forneceram diretamente os valores dos diâmetros característicos D10, D50 e D90. Nos casos em que foram realizadas mais de uma análise granulométrica (M1 e M3), a média entre os valores de D10, D50 e D90 foi utilizada na apresentação dos resultados.

3.5 Ensaios realizados e configuração do canal

A Tabela 2 apresenta os ensaios realizados, dando destaque às inclinações do canal e à granulometria do sedimento utilizado no leito móvel. Já as características das misturas e da injeção são abordadas na seção dos resultados.

Os ensaios EO1, EO5, EO6, EO7, EO8, EO9 e EO18 não constam na Tabela 2: por falta/falha na coleta de dados essenciais para a análise dos resultados (ensaios EO1 e EO6), por não formação de corrente hiperpicinal (ensaios EO7, EO8 e EO9) ou por falha metodológica (ensaios EO5 e EO18).

Foram impostas três inclinações diferentes ao canal que foram simuladas em ordem decrescente: 6 %, 0,3% e 0,015%. A amplitude total das inclinações simuladas corresponde à extensa faixa de declividades encontradas na natureza ao longo de um perfil longitudinal traçado da plataforma continental até a planície abissal, como pode ser observado na Figura 4 que mostra o perfil longitudinal de uma região do fundo oceânico no qual ocorreu o famoso evento dos Grand Banks em 1929.

Com relação aos diâmetros característicos (D10, D50 e D90) do sedimento utilizado na composição do leito é possível notar que todos os valores de D50 encontraram-se na faixa de areia média (Udden-Wentworth, 1922), com exceção do ensaio EO2. As distribuições granulométricas dos ensaios EO2, EO12, EO13, EO14 e EO15 foram consideradas um pouco abaixo daquela definida na metodologia (areia média). No entanto, a priori, essa diferença não prejudicou de forma significativa a análise e a comparação dos resultados.

Tabela 2: Ensaios realizados e as respectivas condições de inclinação e tamanho dos grãos utilizados na composição do leito móvel.

Ensaios realizados e configuração do canal				
Ensaio	Canal	Sedimento composto o leito móvel		
	Inclinação (-)	D10 (µm)	D50 (µm)	D90 (µm)
EO 2	0,06	75,40	214,46	381,20
EO 3		126,82	322,24	463,10
EO 4		133,21	305,25	454,22
EO 10		111,82	283,09	442,20
EO 11		118,98	301,85	452,14
EO 12		89,41	265,52	412,78
EO 13		94,66	254,58	384,08
EO 14		93,45	255,01	382,70
EO 15		102,16	278,62	431,92
EO 16		216,63	387,08	593,20
EO 17		231,16	402,36	604,25
EO 19	0,003	212,78	391,62	606,62
EO 20		224,16	414,21	642,29
EO 21		131,05	394,85	602,09
EO 22		134,12	382,66	592,84
EO 23		146,82	345,27	549,84
EO 24		226,26	400,90	612,16
EO 25		224,33	410,97	628,73
EO 26		220,60	386,58	591,93
EO 27		221,46	398,03	605,80
EO 28		224,60	402,49	613,87
EO 29	0,00015	224,05	388,05	593,34
EO 30		233,65	402,71	606,94
EO 31		227,18	404,61	617,21
EO 32		225,77	401,54	612,07
EO 33		231,44	408,76	623,77
EO 34		225,41	409,25	615,23
EO 35		222,96	402,33	608,92
EO 36		212,12	393,11	596,35
EO 37		230,11	415,57	629,57

4 RESULTADOS

Os resultados são apresentados nas próximas seções, hierarquizados de acordo com a ordem de utilização e divididos em quatro grandes grupos: balanço de massa, condições iniciais dos ensaios, propriedades sedimentológicas no trecho do leito móvel e propriedades das correntes de turbidez a aproximadamente 30 centímetros do fim do leito móvel. Por fim também é apresentada uma tabela resumo dos principais dados adquiridos.

4.1 Balanço de massa

O resultado do balanço de massa está exposto na Tabela 3. Nessa tabela estão contidos os dados referentes às massas de sedimento depositadas antes do leito móvel (M1), no leito (M2) e depois do leito (M3), assim como a quantidade total de sedimento injetada (M total). O sedimento coletado antes do leito e depois do leito teve amostras submetidas a análises granulométricas e os resultados também estão expostos nessa tabela.

A massa depositada antes do leito (M1) é sempre maior do que a massa depositada sobre e depois do leito (M2 e M3, respectivamente). Em nenhum ensaio M3 foi consideravelmente superior à M2, com exceção do ensaio EO12. Em parte dos ensaios com a maior inclinação, M2 e M3 apresentaram valores similares (EO3, EO11, EO12, EO13 e EO16).

Com relação às análises granulométricas apresentadas na Tabela 3, não há dados referentes a M1 para os ensaios EO11 e EO12. Em todos os ensaios ocorreu a diminuição dos diâmetros característicos e, no geral, os sedimentos transportados para depois do leito móvel apresentaram diâmetro característico D50 cerca de 18% menor do que os sedimentos depositados antes do leito.

Tabela 3: Resultado do balanço de massa: massas coletadas e diâmetros do sedimento.

Ensaio	injeção	antes do leito					no leito			depois do leito				
	M total	M1			M2			M3						
	massa	massa		diâmetros característicos			massa		volume	massa		diâmetros característicos		
	g	g	%	D10 (µm)	D50 (µm)	D90 (µm)	g	%	cm³	g	%	D10 (µm)	D50 (µm)	D90 (µm)
EO 2	1049	730	69,6	-	-	-	205	19,5	278,8	114	10,9	42,52	88,12	130,10
EO 3	297	208	70,0	54,38	108,01	159,00	45	15,0	63,4	44	14,9	45,51	87,05	127,19
EO 4	220	138	62,5	53,65	107,90	159,47	58	26,4	79,7	24	11,1	41,72	86,87	125,88
EO 10	654	328	50,2	50,31	100,44	148,53	249	38,0	395,8	77	11,8	31,32	81,51	121,02
EO 11	3285	1519	46,2	-	-	-	916	27,9	1448,4	850	25,9	38,05	75,75	112,54
EO 12	3192	1413	44,3	-	-	-	847	26,5	1259,2	932	29,2	33,94	76,78	114,22
EO 13	4709	2170	46,1	42,83	91,50	138,87	1306	27,7	2058,4	1232	26,2	34,83	76,29	112,70
EO 14	2582	1685	65,2	41,56	87,84	132,88	584	22,6	871,3	314	12,2	30,34	68,95	98,85
EO 15	769	448	58,3	37,96	87,22	128,20	204	26,6	295,6	117	15,2	32,74	72,88	103,52
EO 16	4014	1904	47,4	59,24	94,94	140,83	1071	26,7	1614,5	1039	25,9	52,07	81,36	118,24
EO 17	312	144	46,2	60,96	96,04	141,77	113	36,1	163,3	55	17,6	53,99	83,78	120,65
EO 19	979	700	71,5	57,97	92,72	136,70	177	18,1	258,1	101	10,3	48,73	76,77	110,02
EO 20	2951	1920	65,1	59,05	94,73	140,58	623	21,1	974,5	407	13,8	49,48	78,43	113,87
EO 21	5085	3153	62,0	58,53	93,63	138,83	1164	22,9	1863,0	768	15,1	49,78	77,73	111,70
EO 22	3113	2665	85,6	56,79	90,47	131,76	346	11,1	510,5	102	3,3	41,09	71,60	101,06
EO 23	522	406	77,8	62,49	96,21	141,87	81	15,6	118,0	35	6,6	52,46	79,12	114,04
EO 24	416	373	89,7	61,82	94,83	138,73	28	6,8	41,3	15	3,5	50,83	77,71	110,96
EO 25	1151	915	79,5	63,42	97,49	144,11	156	13,5	225,6	80	7,0	52,43	79,31	114,88
EO 26	1802	1400	77,7	61,94	96,29	141,81	256	14,2	377,7	146	8,1	51,26	77,89	111,30
EO 27	6961	4178	60,0	60,32	95,06	140,09	1614	23,2	2649,0	1169	16,8	51,72	78,77	113,69
EO 28	622	397	63,8	59,73	93,23	136,54	157	25,2	245,7	68	11,0	50,64	78,02	112,33
EO 29	611	459	75,1	60,57	94,52	139,12	94	15,4	141,8	58	9,5	50,21	77,30	110,77
EO 30	1010	811	80,3	58,85	92,51	135,76	142	14,1	205,1	56	5,6	47,21	75,24	107,48
EO 31	1890	1356	71,7	59,61	93,22	136,75	330	17,5	479,9	205	10,8	50,15	77,03	109,97
EO 32	2857	1957	68,5	60,81	94,18	137,51	525	18,4	792,4	375	13,1	50,71	77,67	111,04
EO 33	5993	3760	62,7	56,73	93,02	138,15	1307	21,8	2110,1	926	15,4	50,69	77,92	111,88
EO 34	5837	3566	61,1	61,55	95,75	141,12	1273	21,8	1987,0	998	17,1	51,08	77,78	111,22
EO 35	4349	2842	65,3	61,83	95,83	140,68	885	20,3	1334,7	623	14,3	52,44	78,62	112,45
EO 36	2305	1652	71,7	62,91	96,55	142,18	397	17,2	578,9	256	11,1	51,48	78,88	114,02
EO 37	1972	1436	72,8	63,15	96,51	141,87	336	17,0	463,5	200	10,2	51,79	79,17	114,86

4.2 Condições iniciais dos ensaios realizados

As condições iniciais dos ensaios realizados são abordadas considerando as características da mistura, da duração e da injeção, além das condições do canal, que já foram apresentadas na Tabela 2.

4.2.1 Mistura

4.2.1.1 Concentração volumétrica da mistura injetada

As concentrações volumétricas medidas instantes antes e depois do ensaio, a média e a diferença entre os valores estão expostas na Tabela 4. As concentrações volumétricas médias simuladas variaram entre 0,00030 e 0,039 nos ensaios com a maior inclinação; entre 0,0013 e 0,051 para os ensaios com inclinação intermediária e entre 0,0013 e 0,055 para os de menor inclinação. O range de concentrações volumétricas adotado está relacionado com o limite mínimo de sedimento necessário para a formação de uma corrente hiperpicnal e com o limite máximo suportado pela cuba na saída do canal, considerando a simulação de fluxos contínuos.

4.2.1.2 Diâmetros característicos do sedimento na mistura injetada

Os diâmetros característicos D10, D50 e D90 do sedimento utilizado para a composição da mistura sedimentar injetada no canal, a média e a diferença entre os valores estão expostos na Tabela 5. As análises granulométricas foram realizadas nas amostras de mistura coletadas instantes antes e depois do ensaio para o cálculo da concentração volumétrica. Todos os valores de D50 encontraram-se na faixa de areia muito fina (Udden-Wentworth, 1922).

Tabela 4: Ensaios realizados e a respectiva concentração volumétrica da mistura injetada, medida antes e após do ensaio.

Concentração volumétrica				
Ensaio	inicial	final	média	diferença (inicial - final)
	CV i (-)	CV f (-)	CV m (-)	CV dif (-)
EO 2	0,0053	0,0053	0,0053	0,0000
EO 3	erro	0,00073	0,00073	erro
EO 4	0,00032	0,00029	0,00030	0,00003
EO 10	0,0010	0,0011	0,0011	-0,0001
EO 11	0,011	0,011	0,011	0,000
EO 12	0,023	0,023	0,023	0,000
EO 13	0,035	0,042	0,039	-0,006
EO 14	0,021	0,022	0,022	-0,001
EO 15	0,0049	0,0050	0,0049	-0,0001
EO 16	0,039	0,036	0,037	0,004
EO 17	0,0014	0,0017	0,0016	-0,0002
EO 19	0,0058	0,0056	0,0057	0,0001
EO 20	0,019	0,017	0,018	0,002
EO 21	0,040	0,039	0,040	0,001
EO 22	0,037	0,038	0,037	-0,001
EO 23	0,0024	0,0021	0,0023	0,0003
EO 24	0,0020	0,0020	0,0020	0,0000
EO 25	0,0052	0,0054	0,0053	-0,0002
EO 26	0,010	0,010	0,010	0,000
EO 27	0,053	0,049	0,051	0,004
EO 28	0,0013	0,0014	0,0013	-0,0001
EO 29	0,0013	0,0013	0,0013	0,0000
EO 30	0,0050	0,0050	0,0050	0,0000
EO 31	0,010	0,010	0,010	0,000
EO 32	0,021	0,020	0,021	0,001
EO 33	0,058	0,053	0,055	0,005
EO 34	0,042	0,038	0,040	0,004
EO 35	0,030	0,030	0,030	0,000
EO 36	0,015	0,015	0,015	0,000
EO 37	0,0084	0,0086	0,0085	-0,0002

Tabela 5: Diâmetros característicos dos sedimentos presentes nas amostras da mistura de injeção coletadas antes e após do ensaio.

Ensaio	Diâmetros característicos											
	inicial			final			média			diferença (inicial - final)		
	D10 (µm)	D50 (µm)	D90 (µm)	D10 (µm)	D50 (µm)	D90 (µm)	D10 (µm)	D50 (µm)	D90 (µm)	D10 (µm)	D50 (µm)	D90 (µm)
EO 2	49,97	105,91	158,51	52,13	110,01	168,08	51,05	107,96	163,30	-2,16	-4,10	-9,57
EO 3	33,98	102,97	158,80	46,97	102,77	151,94	40,48	102,87	155,37	-12,99	0,20	6,86
EO 4	32,81	102,07	154,37	34,12	101,56	153,03	33,47	101,82	153,70	-1,31	0,51	1,34
EO 10	54,43	103,41	153,23	54,36	103,80	153,71	54,40	103,61	153,47	0,07	-0,39	-0,48
EO 11	43,69	88,64	135,19	43,03	89,00	136,47	43,36	88,82	135,83	0,66	-0,36	-1,28
EO 12	37,58	85,26	129,90	38,28	85,35	127,76	37,93	85,31	128,83	-0,70	-0,09	2,14
EO 13	37,34	84,62	124,95	39,15	85,80	127,76	38,25	85,21	126,36	-1,81	-1,18	-2,81
EO 14	34,58	80,62	120,81	36,01	81,20	121,42	35,30	80,91	121,12	-1,43	-0,58	-0,61
EO 15	39,75	85,73	128,08	37,61	84,41	124,20	38,68	85,07	126,14	2,14	1,32	3,88
EO 16	36,06	82,61	122,76	37,75	83,52	123,62	36,91	83,07	123,19	-1,69	-0,91	-0,86
EO 17	58,21	93,93	138,05	58,91	93,33	136,63	58,56	93,63	137,34	-0,70	0,60	1,42
EO 19	57,02	91,64	134,47	56,71	91,91	135,67	56,87	91,78	135,07	0,31	-0,27	-1,20
EO 20	57,71	93,95	139,81	56,73	91,81	135,68	57,22	92,88	137,75	0,98	2,14	4,13
EO 21	55,97	90,44	133,25	55,87	90,14	132,75	55,92	90,29	133,00	0,10	0,30	0,50
EO 22	54,79	89,37	130,00	54,63	89,41	130,11	54,71	89,39	130,06	0,16	-0,04	-0,11
EO 23	58,82	93,66	137,55	58,04	93,22	136,92	58,43	93,44	137,24	0,78	0,44	0,63
EO 24	58,98	93,76	137,57	59,38	93,97	138,01	59,18	93,87	137,79	-0,40	-0,21	-0,44
EO 25	59,67	94,54	139,26	60,18	94,85	139,33	59,93	94,70	139,30	-0,51	-0,31	-0,07
EO 26	59,60	93,38	136,42	59,93	94,24	138,54	59,77	93,81	137,48	-0,33	-0,86	-2,12
EO 27	57,60	91,17	132,89	57,80	92,02	134,75	57,70	91,60	133,82	-0,20	-0,85	-1,86
EO 28	57,41	92,10	135,48	56,63	90,66	132,07	57,02	91,38	133,78	0,78	1,44	3,41
EO 29	58,88	92,88	136,26	58,17	92,73	136,17	58,53	92,81	136,22	0,71	0,15	0,09
EO 30	56,57	89,72	128,77	58,61	92,71	135,95	57,59	91,22	132,36	-2,04	-2,99	-7,18
EO 31	57,43	90,94	132,97	57,88	91,64	134,41	57,66	91,29	133,69	-0,45	-0,70	-1,44
EO 32	58,85	92,13	134,29	58,73	91,77	133,19	58,79	91,95	133,74	0,12	0,36	1,10
EO 33	57,87	91,09	132,37	57,26	90,43	130,70	57,57	90,76	131,54	0,61	0,66	1,67
EO 34	57,66	90,75	131,08	57,15	89,92	128,78	57,41	90,34	129,93	0,51	0,83	2,30
EO 35	58,66	91,66	132,79	58,39	91,38	131,71	58,53	91,52	132,25	0,27	0,28	1,08
EO 36	60,10	93,37	136,48	60,61	94,60	138,68	60,36	93,99	137,58	-0,51	-1,23	-2,20
EO 37	58,71	92,33	134,47	59,73	93,75	137,16	59,22	93,04	135,82	-1,02	-1,42	-2,69

4.2.1.3 Massa específica

A massa específica da mistura sedimentar depende de dois fatores: temperatura e concentração volumétrica, segundo as Equações 20 e 22. Portanto, as contribuições de cada um destes fatores para a diferença entre a massa específica da mistura e do fluido ambiente foram analisadas com base nos valores médios da concentração volumétrica e das temperaturas da água no canal e na mistura (Tabela 4 e 6). A massa específica da mistura sedimentar e do fluido ambiente, a diferença entre ambas e a contribuição da diferença de temperatura entre os fluidos para o diferencial de massa específica encontram-se na Tabela 6.

$$\rho_m = \rho + (\rho_s - \rho)CV \quad \text{Equação 22}$$

Onde:

ρ_m = massa específica da mistura (kg/m^3);

ρ = massa específica do fluido (água) – Equação 20 (kg/m^3);

ρ_s = massa específica do sedimento (kg/m^3);

CV = concentração volumétrica (-).

As concentrações volumétricas das misturas dos ensaios EO3 e EO4 foram 0,00073 e 0,00030, respectivamente. Essas foram as menores concentrações simuladas e a formação da corrente de turbidez hiperpical nessas condições foi possível graças à elevada diferença de temperatura (até 2,5 °C) entre a água utilizada no preparo da mistura sedimentar (T_m) e a água (T_a) utilizada no preenchimento do canal. Essas temperaturas estão expostas na Tabela 6, bem como a média (T_{ct}) e a diferença entre as temperaturas da mistura e do fluido ambiente.

Como pode-se notar, 63 % da diferença de massa específica entre a mistura sedimentar e o fluido ambiente do ensaio EO3 deveu-se à diferença de temperatura. No ensaio EO4 essa porcentagem foi de 84%. Já no ensaio EO28, a temperatura contribuiu negativamente à diferença total entre as massas específicas, em uma quantidade de 57%. Essa foi a razão pela qual a corrente de turbidez formada no ensaio EO28 era homopical no início da sua passagem. Após a passagem da cabeça da corrente pelo canal, a mesma desenvolveu-se no fundo do mesmo, o que sugere que a diferença de temperatura foi amenizada pelos processos de mistura que ocorrem na entrada do canal e durante a

passagem da corrente. Por isso, no cálculo na massa específica das correntes de turbidez, que será abordado mais adiante, foi utilizado o valor médio entre a temperatura da mistura sedimentar e do fluido ambiente (T_{ct} - Tabela 6).

Tabela 6: Contribuição da temperatura para a diferença de massa específica entre a mistura sedimentar e o fluido ambiente.

Ensaio	Temperatura da água (°C)				Massa específica (kg/m ³)			
	mistura	canal	média	diferença	mistura	canal	diferença	
	T_m	T_a	T_{ct}	$\Delta T (T_m - T_a)$	ρ_m	ρ_a	$\Delta \rho (\rho_m - \rho_a)$	Contribuição ΔT (%)
EO 2	21,00	22,00	21,50	-1,00	1000,3	997,9	2,4	9
EO 3	24,00	26,00	25,00	-2,00	997,7	996,9	0,8	63
EO 4	24,50	27,00	25,75	-2,50	997,4	996,6	0,8	84
EO 10	18,00	18,00	18,00	0,00	999,1	998,7	0,4	0
EO 11	19,75	19,50	19,63	0,25	1003,0	998,4	4,6	-1
EO 12	17,50	17,50	17,50	0,00	1008,2	998,8	9,4	0
EO 13	18,00	18,00	18,00	0,00	1014,4	998,7	15,7	0
EO 14	17,50	17,50	17,50	0,00	1007,5	998,8	8,8	0
EO 15	15,50	15,00	15,25	0,50	1001,1	999,2	1,9	-4
EO 16	17,50	17,50	17,50	0,00	1014,0	998,8	15,2	0
EO 17	14,00	15,50	14,75	-1,50	999,9	999,1	0,8	25
EO 19	16,00	15,25	15,63	0,75	1001,3	999,1	2,2	-5
EO 20	14,80	14,80	14,80	0,00	1006,6	999,2	7,4	0
EO 21	16,00	14,80	15,40	1,20	1015,1	999,2	15,9	-1
EO 22	18,75	20,50	19,63	-1,75	1013,6	998,2	15,4	2
EO 23	20,75	20,50	20,63	0,25	999,1	998,2	0,9	-6
EO 24	20,00	21,25	20,63	-1,25	999,1	998,0	1,1	25
EO 25	21,25	22,00	21,63	-0,75	1000,2	997,9	2,3	7
EO 26	21,00	22,00	21,50	-1,00	1002,3	997,9	4,4	5
EO 27	19,75	20,50	20,13	-0,75	1019,1	998,2	20,9	1
EO 28	20,00	19,00	19,50	1,00	998,8	998,5	0,3	-57
EO 29	19,00	19,75	19,38	-0,75	999,0	998,3	0,7	22
EO 30	20,00	21,00	20,50	-1,00	1000,3	998,1	2,3	9
EO 31	21,00	22,00	21,50	-1,00	1002,2	997,9	4,3	5
EO 32	18,50	18,50	18,50	0,00	1007,0	998,6	8,5	0
EO 33	20,75	21,00	20,88	-0,25	1020,6	998,1	22,5	0
EO 34	18,00	18,00	18,00	0,00	1015,0	998,7	16,3	0
EO 35	19,00	20,00	19,50	-1,00	1010,7	998,3	12,4	2
EO 36	21,00	21,00	21,00	0,00	1004,3	998,1	6,2	0
EO 37	21,00	22,00	21,50	-1,00	1001,5	997,9	3,7	6

4.2.2 Duração

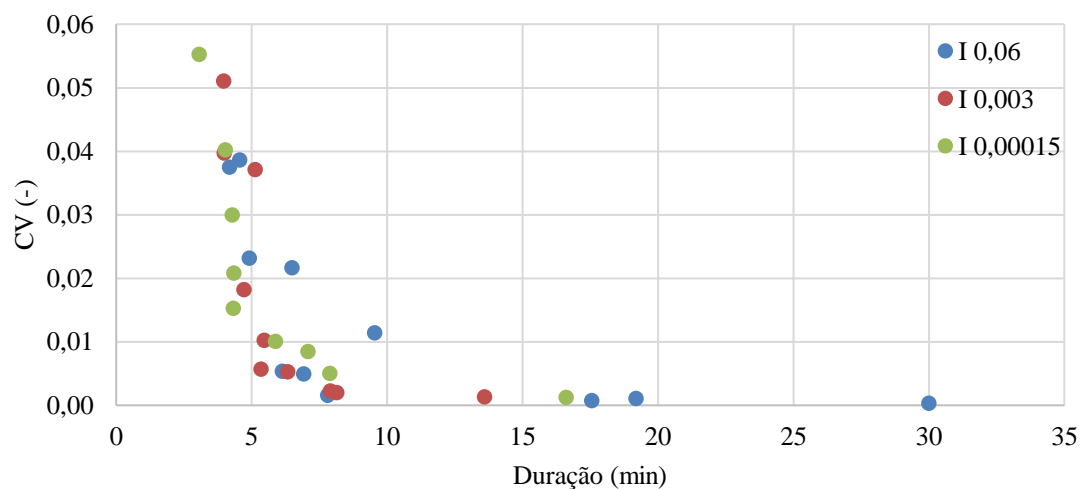
O tempo de duração dos ensaios, conforme apresentado na Tabela 7, foi inversamente proporcional às concentrações volumétricas simuladas, dado que quanto maior a concentração, mais rapidamente ocorria a saturação da cuba da saída e o retorno

de sedimentos no sentido contrário ao fluxo. A relação do tempo de ensaio com a concentração volumétrica pode ser visualizada na Figura 26.

Tabela 7: Ensaios realizados e a respectiva duração.

Ensaio	Duração (min)
EO 2	6,14
EO 3	17,56
EO 4	30,00
EO 10	19,19
EO 11	9,55
EO 12	4,91
EO 13	4,56
EO 14	6,49
EO 15	6,92
EO 16	4,19
EO 17	7,82
EO 19	5,35
EO 20	4,72
EO 21	3,99
EO 22	5,14
EO 23	7,92
EO 24	8,16
EO 25	6,34
EO 26	5,47
EO 27	3,97
EO 28	13,61
EO 29	16,62
EO 30	7,88
EO 31	5,89
EO 32	4,34
EO 33	3,08
EO 34	4,04
EO 35	4,28
EO 36	4,33
EO 37	7,08

Figura 26: Relação da concentração volumétrica (CV) da mistura de injeção com a duração do ensaio.



4.2.3 Descarga sólida na injeção

A descarga sólida no local da injeção foi calculada através da razão entre a massa total de sedimentos injetada (Tabela 3) e a duração do ensaio (Tabela 7), resultando nos valores expostos na Tabela 8. A vazão de injeção imposta pelo posicionamento do registro gaveta antes da entrada da mistura no canal (conforme descrito na subseção “3.1.1 Canal, alimentação e saída”) foi avaliada a partir dos valores de descarga sólida e de concentração volumétrica das misturas no início e no fim do ensaio (Tabela 4). Os valores de vazão calculados a partir do valor da concentração volumétrica inicial e final, a média e a diferença também estão expostas na Tabela 8.

Para cada inclinação foram simuladas vazões médias compreendidas entre 15 l/min e 25 l/min, com exceção dos ensaios EO14 e EO22 que apresentaram valores médios inferiores a 15 l/min e do ensaio EO34 que apresentou valores médios superiores a 25 l/min. A faixa entre 15 l/min e 25 l/min foi definida como sendo a faixa de vazões adequadas considerando a instalação experimental utilizada. O limite máximo foi definido com base na observação de jatos fortes para vazões superiores ao mesmo. O limite mínimo foi definido com base na observação do acúmulo excessivo e indevido de sedimentos entre os tranquilizadores para vazões inferiores ao mesmo. Alguns resultados apresentados posteriormente também sugerem que os ensaios EO14, EO22 e EO34 foram simulados com vazões inadequadas.

Tabela 8: Descarga s33lida e vaz33o na se33o de inje33o.

Descarga s33lida e vaz33o					
Ensaio	Descarga s33lida (g/min)	Vaz33o (l/min)			
	Qs inje33o	Qi	Qf	Qm	Q diferen33a (Qi - Qf)
EO 2	171,0	22,8	22,8	22,8	0,0
EO 3	16,9	erro	16,5	16,5	-
EO 4	7,3	16,5	18,1	17,3	-1,7
EO 10	34,1	23,2	21,5	22,4	1,6
EO 11	344,1	21,4	21,6	21,5	-0,1
EO 12	649,6	19,9	19,9	19,9	0,0
EO 13	1033,6	20,8	17,6	19,2	3,2
EO 14	398,1	13,3	12,9	13,1	0,3
EO 15	111,0	16,2	15,8	16,0	0,4
EO 16	957,5	17,4	19,1	18,2	-1,7
EO 17	39,9	19,6	17,0	18,3	2,6
EO 19	182,9	22,6	23,1	22,9	-0,5
EO 20	625,5	23,0	26,2	24,6	-3,2
EO 21	1274,6	22,7	23,0	22,8	-0,3
EO 22	605,6	11,8	11,5	11,6	0,3
EO 23	65,9	19,6	22,0	20,8	-2,4
EO 24	51,0	18,1	18,5	18,3	-0,3
EO 25	181,6	24,8	23,9	24,4	0,8
EO 26	329,2	22,8	23,0	22,9	-0,2
EO 27	1755,2	23,6	25,4	24,5	-1,9
EO 28	45,7	25,6	23,0	24,3	2,6
EO 29	36,7	20,4	20,5	20,4	-0,1
EO 30	128,1	18,1	18,1	18,1	0,0
EO 31	320,8	22,1	23,3	22,7	-1,1
EO 32	658,5	22,1	23,0	22,5	-0,9
EO 33	1947,3	24,0	26,3	25,1	-2,3
EO 34	1445,0	24,3	26,9	25,6	-2,6
EO 35	1015,9	24,1	24,1	24,1	-0,1
EO 36	532,5	24,6	24,9	24,7	-0,3
EO 37	278,4	23,6	23,0	23,3	0,6

4.3 Propriedades sedimentol33gicas no trecho do leito m33vel

As propriedades sedimentol33gicas foram analisadas no trecho do leito m33vel conforme descrito nas pr33ximas subse33es.

4.3.1 Descargas sólidas no trecho do leito móvel

Utilizando os dados do balanço de massa e da duração do ensaio também foi possível estimar as descargas sólidas na entrada e na saída do leito móvel (Q_s LMi e Q_s LMf, respectivamente), conforme descrito na subseção 3.4.4. Os resultados estão expostos na Tabela 9.

Tabela 9: Descargas sólidas estimadas na entrada e na saída do leito móvel.

Descargas sólidas - Leito móvel		
Ensaio	entrada	saída
	Q_s LMi (g/min)	Q_s LMf (g/min)
EO 2	52,0	18,6
EO 3	5,1	2,5
EO 4	2,8	0,8
EO 10	17,0	4,0
EO 11	185,0	89,0
EO 12	362,0	189,7
EO 13	557,2	270,5
EO 14	138,4	48,4
EO 15	46,3	16,9
EO 16	503,4	247,9
EO 17	21,5	7,0
EO 19	52,1	18,9
EO 20	218,4	86,4
EO 21	484,3	192,5
EO 22	87,1	19,8
EO 23	14,6	4,4
EO 24	5,2	1,8
EO 25	37,2	12,6
EO 26	73,4	26,7
EO 27	701,8	294,7
EO 28	16,6	5,0
EO 29	9,2	3,5
EO 30	25,2	7,2
EO 31	90,7	34,7
EO 32	207,4	86,4
EO 33	725,5	300,8
EO 34	562,1	247,0
EO 35	352,1	145,4
EO 36	150,8	59,1
EO 37	75,7	28,3

4.3.2 Eficiência de transporte no trecho do leito móvel

O conceito de eficiência de transporte foi utilizado para avaliar em termos relativos a diferença entre a descarga sólida que entra e que sai do trecho do leito móvel. Sendo assim, a eficiência de transporte foi calculada através da divisão da Qs LMf pela Qs LMi e o resultado está exposto na Tabela 10. Como pode-se observar nas Tabelas 9 e 10, a Qs LMf foi sempre menor do que a Qs LMi, indicando que globalmente o processo foi sempre deposicional. Para a maior inclinação, essa relação atingiu o valor máximo de 52%. Para a inclinação intermediária o valor máximo foi de 42% e para a menor inclinação, 44%.

Tabela 10: Ensaio realizados e as respectivas eficiências de transporte.

Eficiência - Leito móvel		
Ensaio	Inclinação	eficiência
EO 2		0,36
EO 3		0,50
EO 4		0,30
EO 10		0,24
EO 11		0,48
EO 12	0,06	0,52
EO 13		0,49
EO 14		0,35
EO 15		0,36
EO 16		0,49
EO 17		0,33
EO 19		0,36
EO 20		0,40
EO 21		0,40
EO 22		0,23
EO 23	0,003	0,30
EO 24		0,34
EO 25		0,34
EO 26		0,36
EO 27		0,42
EO 28		0,30
EO 29		0,38
EO 30		0,28
EO 31		0,38
EO 32		0,42
EO 33	0,00015	0,41
EO 34		0,44
EO 35		0,41
EO 36		0,39
EO 37		0,37

4.3.3 Taxa de geração de depósito no trecho do leito móvel

A taxa de geração de depósito foi estimada a partir da divisão do volume de depósito gerado pela corrente de turbidez pela duração do ensaio. Os resultados encontram-se na Tabela 11.

Tabela 11: Ensaio realizados e as respectivas taxas de geração de depósito no trecho do leito móvel.

Ensaio	Taxa de geração de depósito (cm³/min)
EO 2	45
EO 3	4
EO 4	3
EO 10	21
EO 11	152
EO 12	256
EO 13	452
EO 14	134
EO 15	43
EO 16	385
EO 17	21
EO 19	48
EO 20	207
EO 21	467
EO 22	99
EO 23	15
EO 24	5
EO 25	36
EO 26	69
EO 27	668
EO 28	18
EO 29	9
EO 30	26
EO 31	81
EO 32	183
EO 33	686
EO 34	492
EO 35	312
EO 36	134
EO 37	65

4.4 Propriedades das correntes de turbidez a 30 cm antes do fim do leito móvel

As propriedades das correntes de turbidez, altura e velocidade de avanço, foram analisadas em uma seção situada a aproximadamente 30 centímetros antes do final do leito móvel, como descrito a seguir.

4.4.1 Alturas das correntes a 30 cm antes do fim do leito móvel

A altura da corrente de turbidez foi obtida conforme descrito na subseção “3.4.2 Alturas das correntes de turbidez e série temporal de imagens”. A quantidade de imagens analisadas variou em cada ensaio e foi definida pelo tempo que a corrente de turbidez levou para chegar até a sonda do ecógrafo médico a partir do início do ensaio. Para cada segundo duas imagens foram analisadas, com exceção do ensaio EO11, no qual apenas uma imagem por segundo foi analisada. O resultado da altura média e o seu desvio padrão estão expostos na Tabela 12. Nota-se que a altura média da corrente decresceu com a diminuição da inclinação. As montagens das imagens da corrente de turbidez estão expostas no ANEXO II. Nessa montagem foi utilizada uma imagem a cada 10 segundos desde a passagem da corrente pela sonda até aproximadamente 60 segundos após o término do ensaio.

Tabela 12: Ensaios realizados e as respectivas alturas das correntes simuladas (média e desvio padrão) e os períodos analisados.

Altura da corrente - a ~30 cm antes do fim do leito móvel			
Ensaio	Tempo de análise (min)	H média (cm)	H desvio padrão (cm)
EO 2	0,82	11,4	1,5
EO 3	0,96	11,9	1,4
EO 4	1,01	7,7	1,4
EO 10	0,85	8,2	3,0
EO 11	0,70	10,3	1,2
EO 12	0,64	10,4	1,3
EO 13	0,56	9,9	1,1
EO 14	0,86	9,2	1,2
EO 15	1,19	11,2	1,2
EO 16	0,59	9,2	1,0
EO 17	1,15	11,6	0,8
EO 19	1,01	9,2	1,6
EO 20	0,98	11,6	1,7
EO 21	0,69	9,1	1,6
EO 22	1,47	11,6	1,1
EO 23	1,48	-	-
EO 24	1,28	8,9	1,8
EO 25	1,20	10,3	1,8
EO 26	1,10	10,9	1,7
EO 27	0,68	8,5	1,4
EO 28	1,34	12,5	0,8
EO 29	1,23	8,6	1,6
EO 30	1,24	9,9	1,7
EO 31	1,03	9,9	1,5
EO 32	0,92	10,8	1,7
EO 33	0,62	8,6	1,4
EO 34	0,64	9,5	1,8
EO 35	0,75	8,7	1,2
EO 36	0,93	9,5	1,8
EO 37	1,09	8,8	1,7

4.4.2 Velocidade média de avanço das correntes de turbidez

A velocidade média de avanço da corrente foi estimada de duas formas diferentes: a velocidade de avanço da corrente no trecho do leito móvel e a velocidade de avanço da corrente passando pela sonda do ecógrafo. O resultado encontra-se na Tabela 13. A

velocidade média de avanço estimada através da passagem da cabeça da corrente pela sonda do ecógrafo não pode ser estimada de forma adequada em alguns casos referentes aos ensaios de maior concentração (EO12, EO13, EO27, EO32 a EO35), já que a passagem da corrente pela sonda ocorria de uma imagem para a outra, reduzindo o tempo de análise para apenas 0,5 segundos. Sendo assim, para o cálculo das propriedades do fluxo apresentadas posteriormente, adotou-se a velocidade média de avanço da corrente no trecho do leito.

Tabela 13: Ensaios realizados e as respectivas velocidades médias de avanço determinadas no trecho do leito móvel e no trecho da sonda do ecógrafo.

Velocidade média de avanço - no trecho do leito e a ~ 30 cm antes do fim do leito			
Ensaio	Trecho do leito Vl (m/s)	Trecho do ecógrafo Ve (m/s)	Diferença Vl - Ve (m/s)
EO 2	0,028	0,033	-0,005
EO 3	0,026	0,026	0,000
EO 4	0,028	0,028	0,000
EO 10	0,032	0,035	-0,003
EO 11	0,042	-	-
EO 12	0,055	0,082	-0,028
EO 13	0,069	0,080	-0,011
EO 14	0,042	0,039	0,003
EO 15	0,027	0,029	-0,002
EO 16	0,062	0,054	0,008
EO 17	0,021	0,020	0,001
EO 19	0,031	0,030	0,001
EO 20	0,036	0,037	-0,001
EO 21	0,049	0,042	0,006
EO 22	0,022	0,024	-0,002
EO 23	0,021	-	-
EO 24	0,028	0,030	-0,003
EO 25	0,026	0,025	0,001
EO 26	0,027	0,028	-0,001
EO 27	0,053	0,084	-0,030
EO 28	0,021	0,020	0,001
EO 29	0,025	0,029	-0,003
EO 30	0,024	0,024	0,000
EO 31	0,028	0,032	-0,004
EO 32	0,034	0,036	-0,001
EO 33	0,056	0,039	0,017
EO 34	0,055	0,048	0,007
EO 35	0,045	0,047	-0,002
EO 36	0,033	0,030	0,003
EO 37	0,027	0,025	0,002

4.4.3 Estimativa de parâmetros adimensionais do fluxo a 30 cm antes do fim do leito móvel

Para o cálculo dos parâmetros adimensionais do fluxo (número de Froude densimétrico e número de Reynolds) primeiramente foi necessária a estimativa da concentração volumétrica da corrente de turbidez na seção em análise, ou seja, a aproximadamente 30 cm antes do fim do leito móvel, no ponto médio da sonda do ecógrafo.

O procedimento adotado para a sua obtenção seguiu as seguintes etapas, segundo Michon (1955):

- Cálculo da vazão da corrente de turbidez por continuidade:

$$Q_c = V \cdot A \quad \text{Equação 23}$$

$$A = H \cdot b \quad \text{Equação 24}$$

- Cálculo da concentração em massa:

$$CM = \frac{Q_s}{Q_c} \quad \text{Equação 25}$$

- Cálculo da concentração volumétrica:

$$CV = \frac{CM}{\rho_s} \quad \text{Equação 26}$$

Onde:

Q_c = vazão da corrente de turbidez (m^3/s);

V = velocidade da corrente de turbidez (m/s);

A = área da seção transversal da corrente de turbidez (m);

H = altura da corrente de turbidez (m);

b = largura do canal (m);

CM = concentração em massa da corrente de turbidez (kg/m^3);

Q_s = descarga sólida da corrente de turbidez (kg/s);

CV = concentração volumétrica da corrente de turbidez (-);

ρ_s = massa específica do sedimento (kg/m^3).

O ponto adotado para a realização dessas análises foi a aproximadamente 30 cm antes do fim do leito móvel, no ponto médio da sonda do ecógrafo. A descarga sólida foi calculada nessa seção transversal com base na mesma metodologia adotada para a seção inicial e final do leito (subseção “3.4.4 Balanço de massa e descargas sólidas”).

O cálculo da massa específica e da viscosidade da corrente de turbidez foi realizado considerando a média das temperaturas da mistura e do canal, utilizando o procedimento de cálculo descrito nas Equações 20, 22, 27 e 28. A partir dos valores apresentados foi possível analisar dois números adimensionais das correntes de turbidez, o número de Froude densimétrico e o número de Reynolds (Tabela 14). Camila (2016) comparou os coeficientes obtidos através da Equação 27 (Einstein) com aqueles obtidos experimentalmente para misturas compostas pelo mesmo sedimento utilizado nesta pesquisa (carvão mineral) e constatou que para concentrações baixas (regime Newtoniano) a equação de Einstein é adequada.

$$\mu_{ct} = \mu (1 + 2,5 * CV) \quad \text{Equação 27}$$

$$v_{ct} = \frac{\mu_{ct}}{\rho_{ct}} \quad \text{Equação 28}$$

Onde:

u_{ct} = coeficiente de viscosidade dinâmico da corrente de turbidez ($\text{kg/s}^2\text{m}^2$);

μ = coeficiente de viscosidade dinâmico do fluido (água) ($\text{kg/s}^2\text{m}^2$);

CV = concentração volumétrica da corrente de turbidez (-);

v_{ct} = viscosidade cinemática da corrente de turbidez (m^2/s);

Tabela 14: Ensaios realizados e os respectivos parâmetros estimados a aproximadamente 30 centímetros antes do fim do leito móvel.

Estimativa de parâmetros do fluxo - a ~30 cm antes do fim do leito móvel											
Ensaio	Qc (l/min)	Qs (g/min)	CM (g/l)	CV		vct (m ² /s)	pct (kg/m ³)	$\Delta\rho$ (kg/m ³)	g' (m/s ²)	Fr d (-)	Re (-)
				(-)	(%)						
EO 2	23,9	24,8	1,0	0,00074	0,074	9,8E-07	998,3	0,41	0,0040	1,3	3272
EO 3	23,3	2,8	0,1	0,000085	0,008	9,0E-07	997,2	0,30	0,0029	1,4	3455
EO 4	16,4	1,3	0,1	0,000058	0,006	8,8E-07	997,0	0,36	0,0036	1,7	2470
EO 10	20,0	6,8	0,3	0,00024	0,024	1,1E-06	998,8	0,10	0,0010	3,6	2507
EO 11	32,3	112,1	3,5	0,0025	0,25	1,0E-06	999,4	0,98	0,0096	1,3	4198
EO 12	42,4	232,8	5,5	0,0039	0,39	1,1E-06	1000,4	1,59	0,0156	1,4	5227
EO 13	51,5	341,5	6,6	0,0047	0,47	1,1E-06	1000,6	1,92	0,019	1,6	6406
EO 14	28,6	65,5	2,3	0,0016	0,16	1,1E-06	999,4	0,66	0,0065	1,7	3542
EO 15	22,4	23,4	1,0	0,00074	0,074	1,1E-06	999,4	0,27	0,0026	1,6	2627
EO 16	43,2	311,1	7,2	0,0051	0,51	1,1E-06	1000,8	2,08	0,020	1,4	5308
EO 17	18,1	10,9	0,6	0,00043	0,043	1,2E-06	999,4	0,28	0,0028	1,2	2095
EO 19	21,2	26,7	1,3	0,00090	0,090	1,1E-06	999,4	0,31	0,0030	1,8	2501
EO 20	31,3	116,9	3,7	0,0027	0,27	1,2E-06	1000,3	1,08	0,011	1,0	3610
EO 21	33,1	266,0	8,0	0,0057	0,57	1,1E-06	1001,4	2,23	0,022	1,1	3848
EO 22	19,0	30,9	1,6	0,0012	0,12	1,0E-06	998,8	0,65	0,006	0,8	2474
EO 23	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
EO 24	18,5	2,3	0,1	0,000088	0,0088	1,0E-06	998,2	0,17	0,0017	2,3	2477
EO 25	20,0	18,0	0,9	0,00064	0,064	9,7E-07	998,2	0,35	0,0034	1,4	2737
EO 26	22,1	36,8	1,7	0,0012	0,12	9,8E-07	998,5	0,59	0,0058	1,1	3021
EO 27	33,8	395,1	11,7	0,0083	0,83	1,0E-06	1001,7	3,46	0,034	1,0	4399
EO 28	19,8	8,3	0,4	0,00030	0,030	1,0E-06	998,5	0,02	0,00023	3,9	2580
EO 29	16,4	4,7	0,3	0,00020	0,020	1,0E-06	998,5	0,16	0,0015	2,2	2126
EO 30	18,0	11,7	0,6	0,00046	0,046	1,0E-06	998,4	0,29	0,0029	1,4	2405
EO 31	20,7	47,8	2,3	0,0016	0,16	9,8E-07	998,6	0,78	0,0077	1,0	2819
EO 32	27,7	113,9	4,1	0,0029	0,29	1,1E-06	999,8	1,19	0,012	1,0	3499
EO 33	36,1	593,8	16,4	0,0117	1,17	1,0E-06	1002,9	4,79	0,047	0,9	4753
EO 34	39,1	324,1	8,3	0,0059	0,59	1,1E-06	1001,1	2,40	0,024	1,2	4856
EO 35	29,4	193,7	6,6	0,0047	0,47	1,0E-06	1000,3	2,01	0,020	1,1	3792
EO 36	23,3	78,9	3,4	0,0024	0,24	9,9E-07	999,1	0,98	0,0096	1,1	3132
EO 37	17,5	38,4	2,2	0,0016	0,16	9,8E-07	998,6	0,75	0,0074	1,0	2385

Os parâmetros relacionados com a competência do escoamento e a capacidade de transporte, apresentados na subseção “2.3 Mobilidade dos sedimentos: competência e capacidade de transporte” também foram analisados. São eles: o diâmetro adimensionalizado (D_*), o parâmetro de Shields ($\frac{1}{\psi}$), o número de Reynolds do grão (R_*), o adimensional da potência (π_1), o adimensional da descarga sólida volumétrica (π_2), o adimensional do diâmetro (π_3), o conjunto de variáveis de Bagnold (Qs^*) e o de intensidade do escoamento (π_4). No cálculo desses parâmetros usou-se a gravidade reduzida no lugar da gravidade e a tensão de cisalhamento foi corrigida através do parâmetro α (Equação 29) que é função do número de Froude densimétrico da corrente

segundo a Equação 30, extraída de Chien e Wan (1999) a partir da Figura 27. Os resultados estão expostos na Tabela 15.

$$\tau_{0 \text{ cor}} = \frac{\gamma_{\text{ct}} H I}{1 + \alpha} \quad \text{Equação 29}$$

$$\alpha = 0,6983 \ln (F_{\text{rd}}) + 0,3207 \quad \text{Equação 30}$$

Onde:

$\tau_{0 \text{ cor}}$ = tensão de cisalhamento junto ao fundo corrigida (N/m²);

γ_{ct} = peso específico da corrente de turbidez (N/m³);

H = altura da corrente de turbidez (m);

I = inclinação do canal (-);

α = parâmetro que expressa a razão entre a resistência na interface e a resistência no fundo (-);

F_{rd} = número de Froude densimétrico (-).

Figura 27: Relação entre o parâmetro α e o número de Froude densimétrico. Fonte: Chien e Wan (1999).

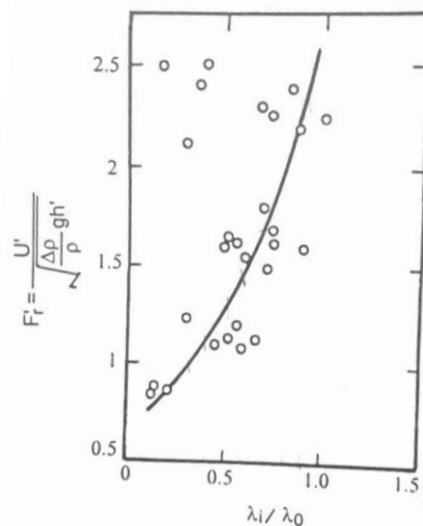


Fig. 14.23 λ_i / λ_0 vs. Fr'
(after Middleton, G.V.)

Tabela 15: Ensaios realizados e os respectivos parâmetros adimensionais estimados, além do conjunto de variáveis de Bagnold.

Ensaio	τ_0	α	τ_0 cor	$1/\psi$ (Shields)	D^*	R^*	π_1	π_2	π_3	$\pi_2\pi_3$	Q_s^* (Bagnold)	π_4
	N/m ²	-	N/m ²	-	-	-	-	-	-	-	g/min	-
EO 2	2,8E-02	0,5	1,8E-02	5,2E+01	2,1	3,9E-01	139	2,4	1,4	3,4	86	4,8
EO 3	2,1E-02	0,6	1,3E-02	3,5E+01	2,2	3,5E-01	147	0,3	1,3	0,4	55	5,1
EO 4	1,7E-02	0,7	9,8E-03	2,2E+01	2,3	3,1E-01	105	0,1	1,4	0,2	47	8,2
EO 10	4,8E-03	1,2	2,2E-03	1,9E+01	1,9	1,1E-01	107	0,6	0,8	0,5	14	42,0
EO 11	6,0E-02	0,5	3,9E-02	3,3E+01	1,8	4,6E-01	179	10,4	1,6	16,5	410	7,3
EO 12	9,7E-02	0,5	6,3E-02	3,8E+01	1,7	5,6E-01	223	20,4	1,8	37,1	1128	10,0
EO 13	1,1E-01	0,6	6,8E-02	3,5E+01	1,7	5,9E-01	274	30,3	1,9	58,7	1953	17,6
EO 14	3,6E-02	0,7	2,1E-02	3,2E+01	1,6	2,9E-01	151	5,8	1,2	7,1	219	12,0
EO 15	1,8E-02	0,6	1,1E-02	3,7E+01	1,6	2,1E-01	112	2,0	0,9	1,8	46	6,5
EO 16	1,1E-01	0,6	7,2E-02	2,3E+01	1,8	6,4E-01	227	27,2	2,1	57,3	1683	12,9
EO 17	1,9E-02	0,4	1,4E-02	3,0E+01	1,8	2,7E-01	89	0,9	1,1	1,0	36	2,8
EO 19	8,3E-04	0,7	4,8E-04	1,0E+00	1,7	4,7E-02	5,34	2,2	1,0	2,3	2,7	10,4
EO 20	3,7E-03	0,3	2,7E-03	1,5E+00	1,7	1,1E-01	7,71	9,6	1,6	15,0	21,4	3,9
EO 21	6,0E-03	0,4	4,3E-03	1,2E+00	1,7	1,4E-01	8,23	22,0	2,0	43,7	61,4	5,8
EO 22	2,2E-03	0,2	1,9E-03	1,9E+00	1,7	9,7E-02	5,28	2,9	1,3	3,8	5,4	1,4
EO 23	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
EO 24	4,4E-04	0,9	2,3E-04	8,6E-01	1,9	3,8E-02	5,28	0,2	0,9	0,2	1,1	14,3
EO 25	1,0E-03	0,5	6,8E-04	1,2E+00	1,9	6,7E-02	5,83	1,8	1,2	2,1	2,7	5,0
EO 26	1,9E-03	0,4	1,4E-03	1,5E+00	1,9	9,4E-02	6,44	3,6	1,4	5,1	6,1	3,1
EO 27	8,7E-03	0,3	6,6E-03	1,2E+00	1,9	2,0E-01	9,41	36,6	2,5	91,9	111,8	5,2
EO 28	8,8E-05	1,3	3,9E-05	1,0E+00	1,8	1,5E-02	5,50	0,8	0,5	0,4	0,1	32,3
EO 29	2,0E-05	0,9	1,1E-05	4,4E-02	1,8	7,8E-03	0,227	0,4	0,9	0,4	0,04	12,1
EO 30	4,3E-05	0,6	2,7E-05	5,8E-02	1,8	1,2E-02	0,256	1,1	1,1	1,2	0,10	4,9
EO 31	1,1E-04	0,3	8,6E-05	6,8E-02	1,9	2,3E-02	0,301	4,6	1,5	7,2	0,40	2,8
EO 32	1,9E-04	0,3	1,5E-04	7,6E-02	1,8	2,8E-02	0,373	10,3	1,7	17,5	1,03	3,2
EO 33	6,1E-04	0,2	4,9E-04	6,4E-02	1,9	5,4E-02	0,509	55,6	2,8	155,1	9,30	4,4
EO 34	3,3E-04	0,4	2,3E-04	6,0E-02	1,8	3,5E-02	0,519	28,6	2,1	60,9	4,27	7,6
EO 35	2,6E-04	0,4	1,9E-04	5,8E-02	1,8	3,3E-02	0,405	17,8	2,1	37,0	2,27	5,3
EO 36	1,4E-04	0,4	1,0E-04	6,5E-02	1,9	2,5E-02	0,334	7,6	1,7	12,8	0,64	3,8
EO 37	9,7E-05	0,3	7,2E-05	5,8E-02	1,9	2,2E-02	0,254	3,7	1,6	5,8	0,30	2,9

5 DISCUSSÃO

Inicialmente a discussão foi baseada na aplicabilidade de parâmetros comumente utilizados para explicar a competência e a capacidade de transporte de escoamentos fluviais. Posteriormente a discussão foi baseada principalmente na relação das propriedades sedimentológicas e das correntes de turbidez com a eficiência de transporte.

5.1 Avaliação da aplicabilidade dos conceitos de competência do escoamento e de capacidade de transporte nas correntes de turbidez

A avaliação da aplicabilidade dos conceitos de capacidade de transporte foi realizada a partir da transferência de alguns parâmetros clássicos oriundos da Hidráulica Fluvial aplicados para o caso das correntes de turbidez.

5.1.1 Competência do escoamento

A velocidade média de avanço das correntes (Tabela 13) foi relacionada com o diâmetro característico D50 do sedimento transportado pela corrente (Tabela 3) e com o parâmetro adimensional desse sedimento (Tabela 15). O resultado está exposto na Figura 28 e Figura 29. Como pode-se notar em ambas relações, a velocidade média de avanço não foi um parâmetro do fluxo que determinou o tamanho dos grãos do sedimento transportado para jusante do leito móvel, pois para velocidades diferentes houve a ocorrência de tamanhos de grãos similares.

Figura 28: Relação entre o diâmetro característico D50 do material transportado pela corrente de turbidez para depois do leito móvel (M3) e a velocidade média de avanço da corrente.

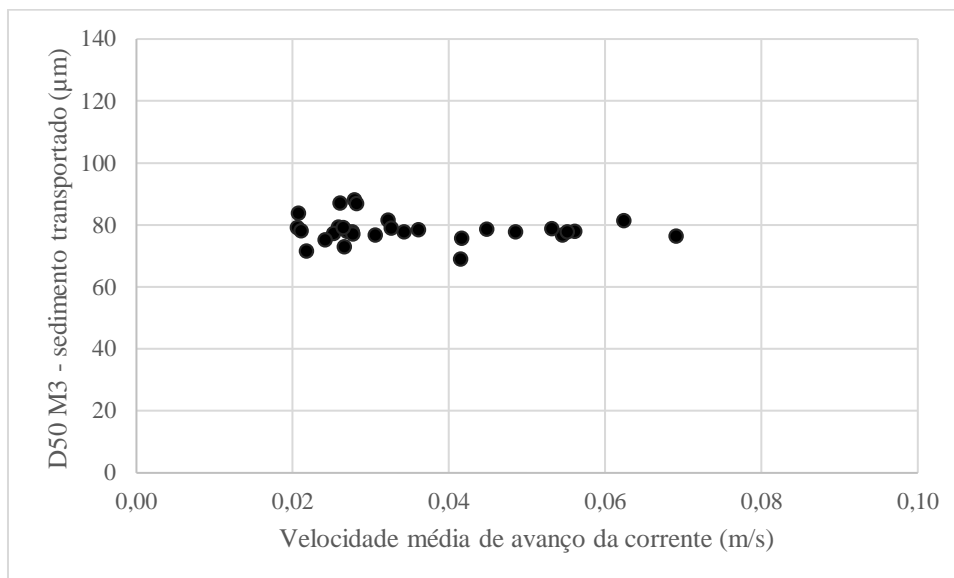
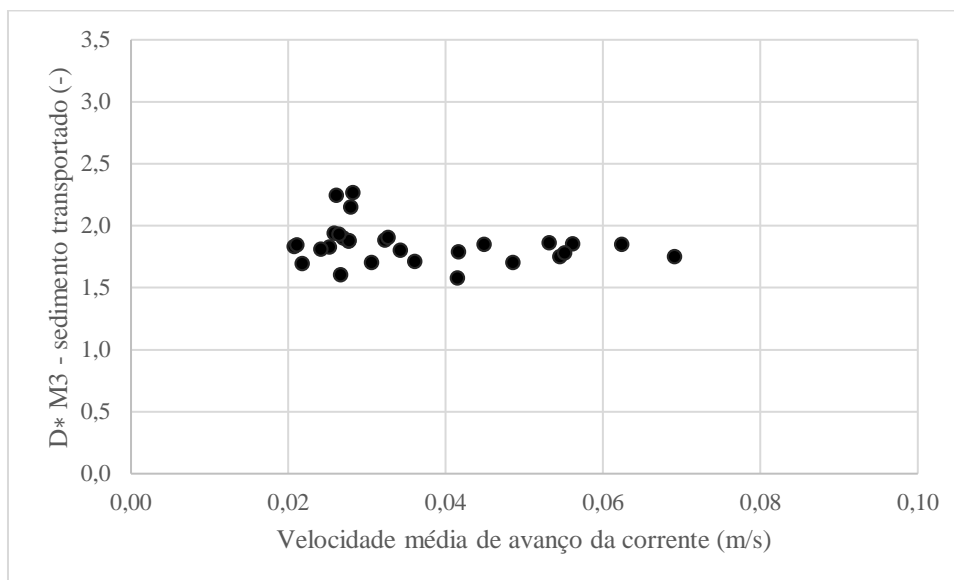


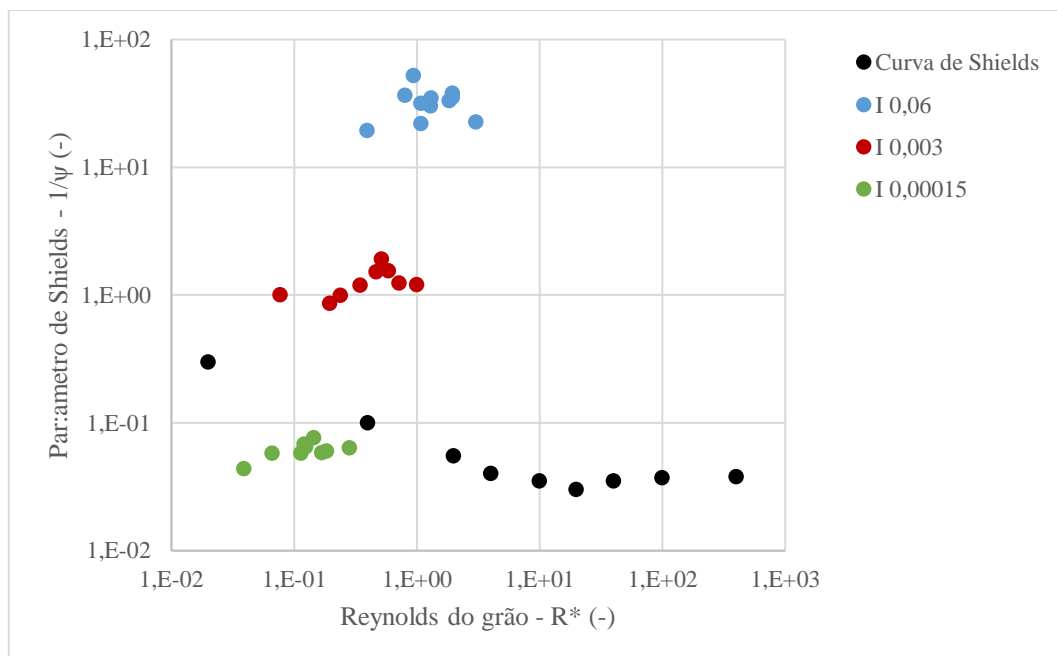
Figura 29: Relação entre o número adimensional D_* do material transportado pela corrente de turbidez para depois do leito móvel (M3) e a velocidade média de avanço da corrente.



Na Figura 30 é possível observar a curva de início do movimento de grãos obtidas para escoamentos fluviais (curva de Shields) e o resultado para os dados experimentais obtidos nesse trabalho (Tabela 15), de acordo com a inclinação. Nota-se que os pontos oriundos dos dados experimentais estão acima da curva de início de movimento, o que

indicaria o transporte dos grãos do fundo. No entanto, tal movimentação não foi constatada (com exceção de dois ensaios (EO3 e EO4) como será discutido posteriormente).

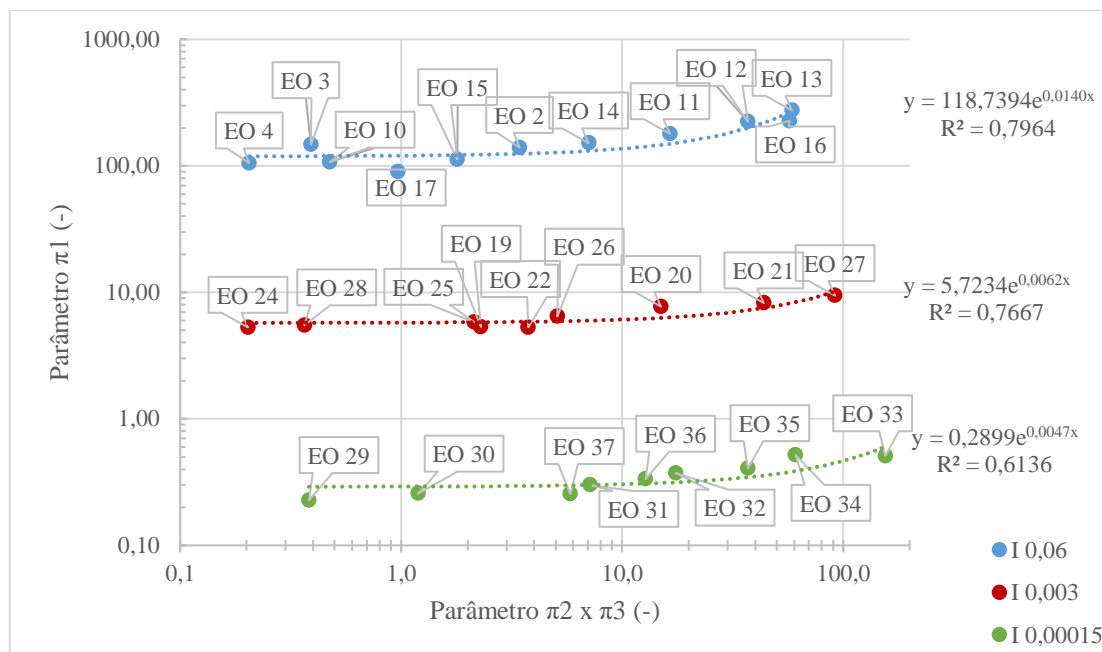
Figura 30: Relação entre o parâmetro de Shields e o número adimensional de Reynolds do grão para os dados experimentais desse trabalho e para a curva de início do movimento dos grãos formulada por Shields.



5.2.2 Capacidade de transporte do escoamento

Na análise da capacidade de transporte foi utilizada a relação entre os parâmetros adimensionais π_1 e $\pi_2 \times \pi_3$ (Tabela 15), inspirando-se no trabalho de Bordas, Borges e Medeiros (1988), desenvolvido no IPH conforme descrito na subseção “2.3.1 Competência e capacidade de transporte de escoamentos fluviais”. O parâmetro π_1 leva em consideração a potência do escoamento, o parâmetro π_2 leva em consideração a descarga sólida em volume e, por fim, o parâmetro π_3 leva em consideração o diâmetro dos grãos. O resultado está exposto na Figura 31.

Figura 31: Relação entre os parâmetros adimensionais π_1 e $\pi_2 \times \pi_3$ para os dados experimentais desse trabalho.

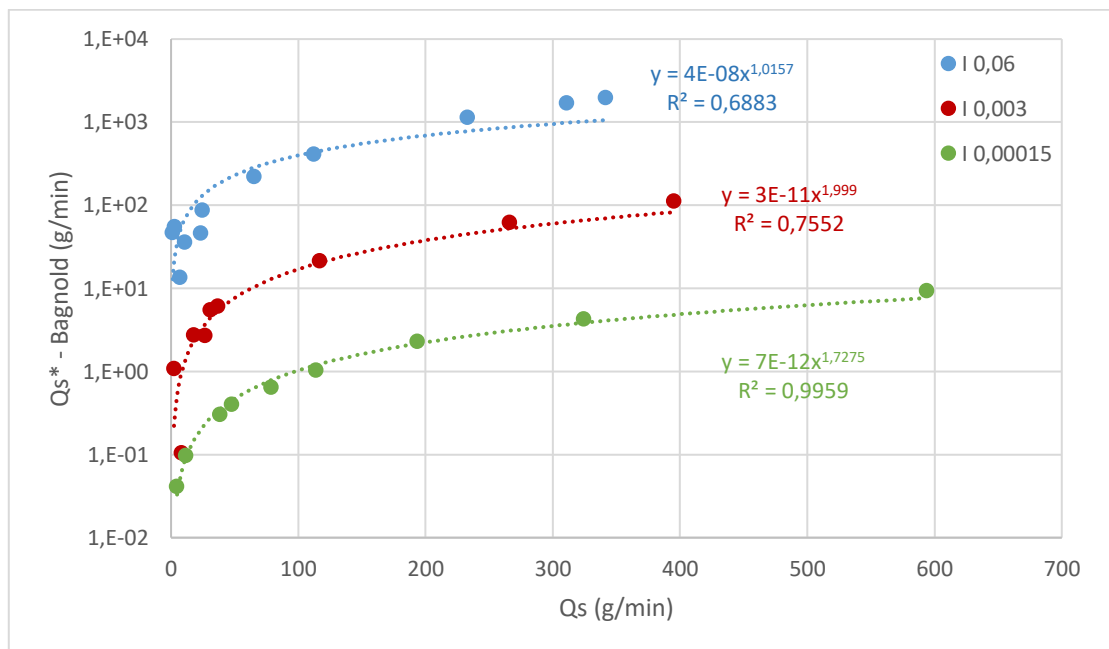


Como pode-se notar, para cada inclinação houve a ocorrência de uma tendência entre os grupos adimensionais. Os valores do parâmetro $\pi_2 \times \pi_3$ cresceram à medida que aumentou a descarga sólida das correntes de turbidez. Na região com os menores valores do parâmetro $\pi_2 \times \pi_3$ (até o valor de aproximadamente 1 para a maior inclinação e 10 para as menores inclinações) a curva foi praticamente linear. Um comportamento similar foi observado por Bordas, Borges e Medeiros (1988) - Figura 10, indicando que a partir desses valores a relação apresentada possui um comportamento de transição e sugerindo que para fluxos com maior descarga sólida as tendências entrariam em uma zona de saturação.

Outra relação avaliada foi a do conjunto de variáveis de Bagnold (Tabela 15) com a descarga sólida, conforme a Figura 32. O conjunto de variáveis de Bagnold engloba a tensão de cisalhamento e a velocidade do fluxo, bem como a relação dessa velocidade com a velocidade de queda dos sedimentos, como forma de estimar a descarga sólida (Q_s^*) de correntes de turbidez. Aqui é possível notar algo semelhante ao exposto na Figura 31, no sentido de que foi possível observar uma linha de tendência diferente para cada inclinação utilizada nas simulações. Também nota-se o acréscimo do parâmetro de Bagnold com o aumento da descarga sólida, que começa a atingir uma assíntota a partir

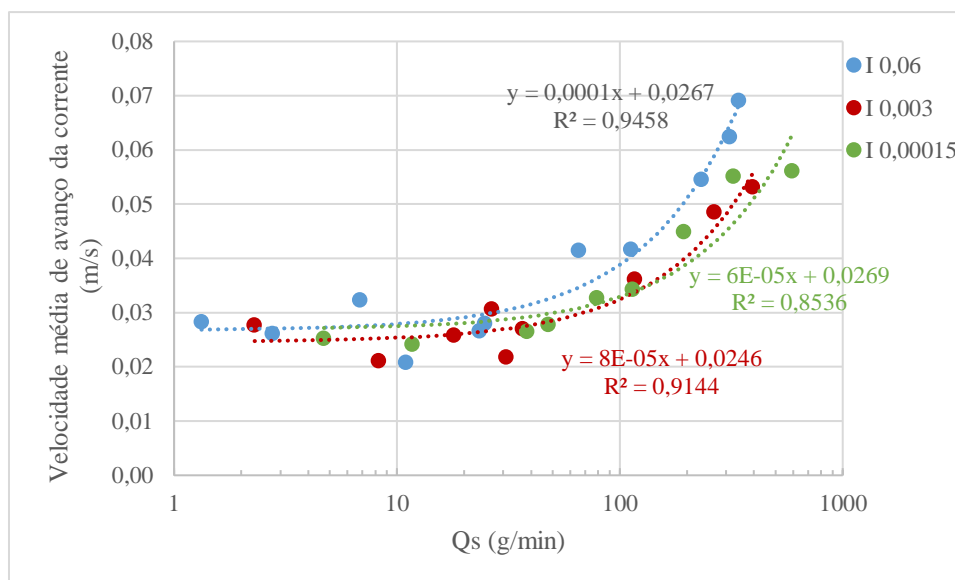
de um valor de descarga s3lida (Q_s) de aproximadamente 100 g/min. Esperar-se-ia que o valor de descarga s3lida estimada (Q_s^*) fosse similar 3 a descarga s3lida estimada atrav3s dos dados experimentais; no entanto, essa rela33o foi marcada uma linha de tend3ncia na forma de pot3ncia.

Figura 32: Rela33o entre o conjunto de vari3veis de Bagnold e a descarga s3lida.



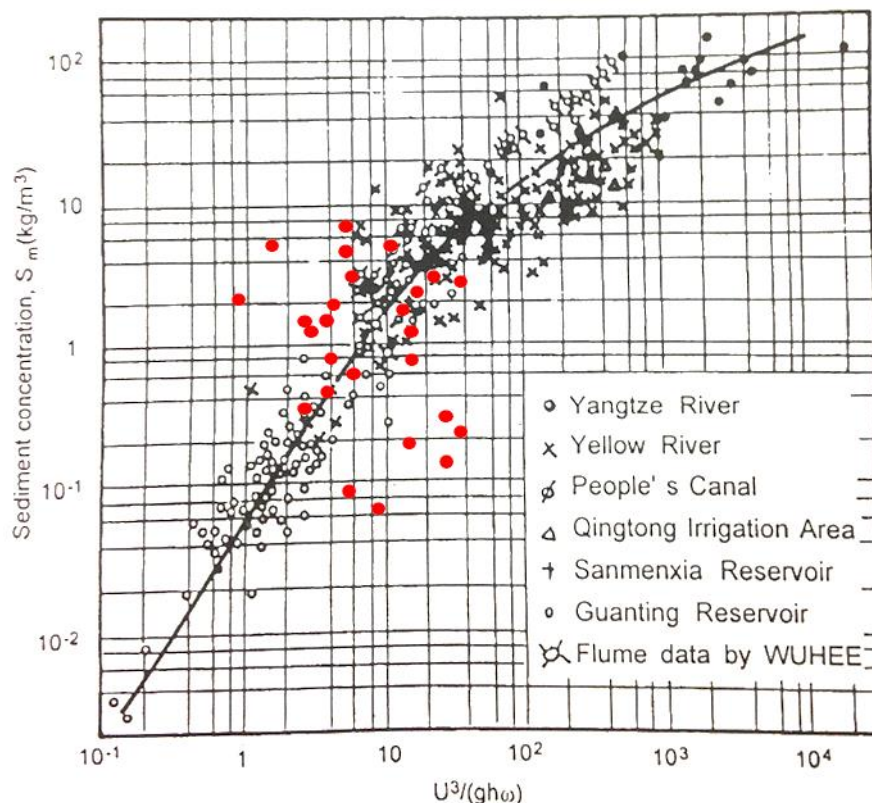
3 É interessante notar que o conceito de capacidade de transporte est3 atrelado a um estado onde independentemente da condi33o do escoamento a descarga s3lida mantem-se constante, perdendo o restante de material, o qual n3o 3 capaz de transportar. No entanto, aqui observa-se que o par3metro do fluxo se mant3m constante, enquanto que a descarga s3lida transportada varia consideravelmente. Nesse ponto 3 poss3vel verificar outra diferen3a b3sica entre os escoamentos fluviais e as correntes de turbidez, isto 3, em canais a velocidade n3o depende da descarga s3lida transportada e em correntes de turbidez, a descarga s3lida possui papel determinante no desenvolvimento dos seus perfis de velocidade. Para os experimentos realizados, a velocidade foi relacionada com a descarga s3lida, conforme exposto na Figura 33. Como resultado 3 poss3vel verificar que a velocidade m3dia de avan3o da corrente varia linearmente com a descarga s3lida, com coeficiente angular maior para a inclina33o de 6% do que para as inclina333es de 0,03% e 0,0015%, as quais apresentaram coeficientes angulares similares.

Figura 33: Relação entre a velocidade média de avanço da corrente e a descarga sólida.



Os dados coletados por este trabalho, plotados sobre a Figura 11, comportam-se de maneira similar aos dados apresentados na Figura 34, mostrando que, mesmo tendo sido obtidos através de diferente metodologia, validam as simulações realizadas e sugerem que devem ser realizados ensaios com escoamentos mais intensos, para que seja verificada a existência de um limite máximo de concentração possível de ser transportada em suspensão. Ressalta-se que os coeficientes de determinação encontrados são considerados valores típicos nos estudos de transportes de sedimentos.

Figura 34: Relação entre a concentração de sedimentos (g/l) - Tabela 14 e o parâmetro de intensidade do escoamento (π_4) - Tabela 15 para os dados experimentais desse trabalho em comparação com aqueles apresentados por Chien e Wan (1999).



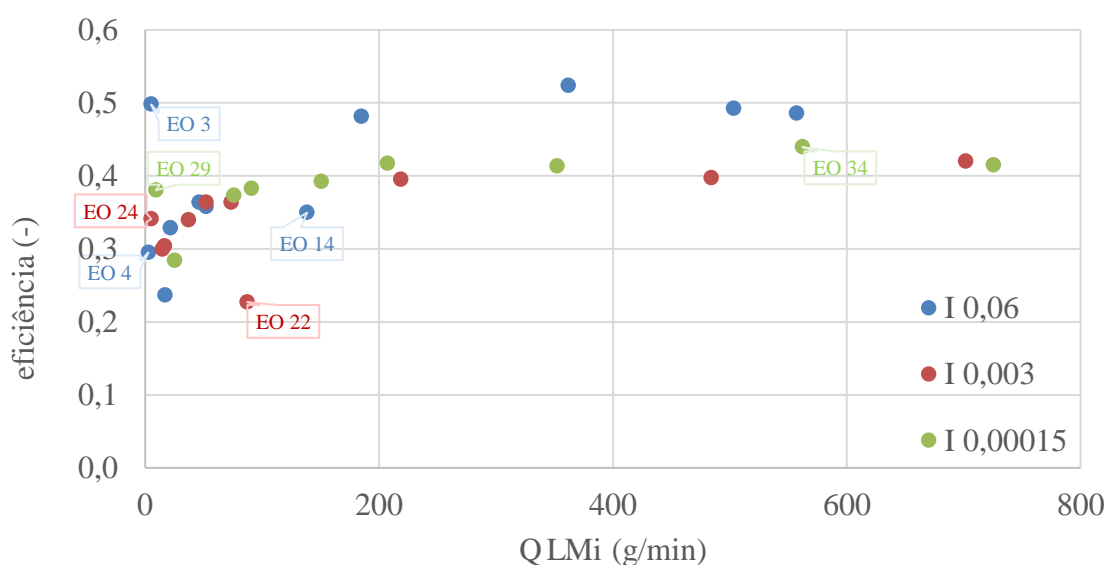
5.2 Avaliação da eficiência de transporte das correntes de turbidez

Dado o exposto nas análises apresentadas anteriormente referentes à aplicação de alguns parâmetros típicos do transporte sólido em escoamentos fluviais, verificou-se que tais conceitos não conseguem refletir a ideia de uma quantidade máxima de sedimentos que o fluxo é capaz de transportar, nem mesmo de uma faixa específica de tamanhos de grão transportado pelas correntes de turbidez. Sendo assim, as discussões apresentadas nas próximas subseções referem-se à aplicação sistemática do conceito de eficiência de transporte, aqui definida como sendo a razão entre a descarga sólida na seção transversal da saída do leito móvel ($Q_s \text{ LMf}$) e a descarga sólida na seção de entrada do leito móvel ($Q_s \text{ LMi}$).

5.2.1 Eficiência X Descarga sólida

A eficiência de transporte foi relacionada com a descarga sólida da seção inicial do leito e o resultado encontra-se na Figura 35, abaixo. Os ensaios que possuem legenda foram excluídos das análises posteriores permanentemente (por indícios de falha metodológica no ajuste da vazão) ou provisoriamente (por não se enquadrarem nos principais grupos de dados), como é comentado a seguir.

Figura 35: Relação da eficiência de transporte com a descarga sólida no início do leito móvel.

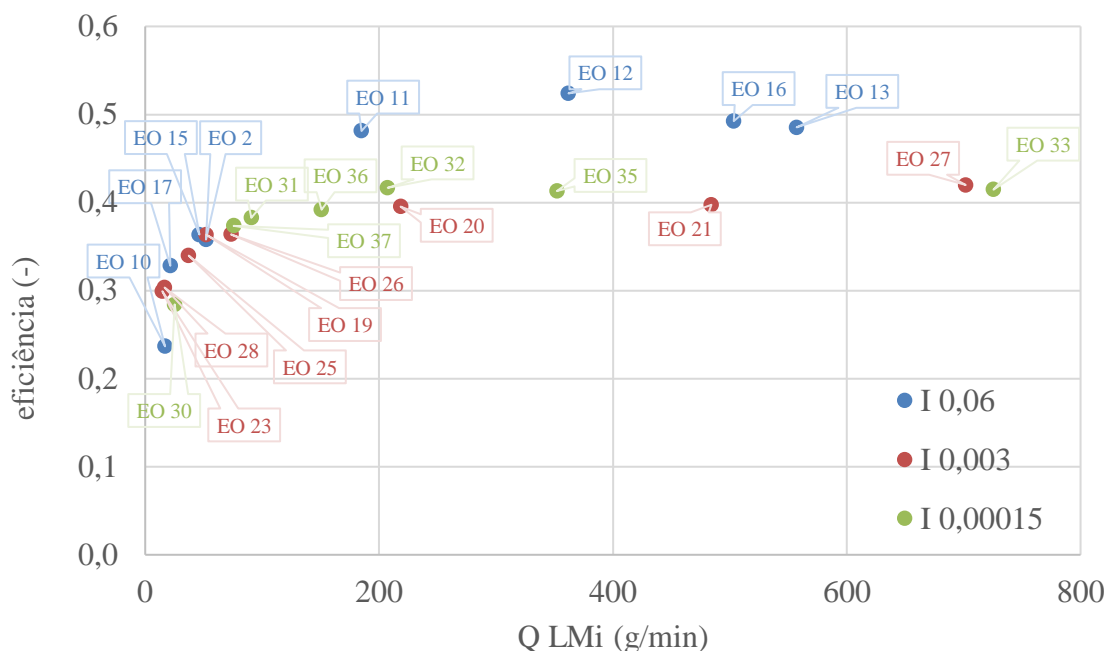


Cabe lembrar que os ensaios EO14 e EO22 apresentaram vazão de injeção abaixo do valor aconselhável para a instalação experimental utilizada. O ensaio EO34, por sua vez, foi o ensaio com a maior vazão média de injeção, a qual estava acima do valor recomendado. Os dois primeiros ensaios (EO14 e EO22) apresentaram pontos com uma relação entre a eficiência de transporte e a descarga sólida abaixo da tendência apresentada pelos demais ensaios de mesma inclinação. Já o ponto do ensaio EO34, apresentou relação acima da esperada pela tendência dos ensaios com inclinação igual a sua. Esses ensaios foram excluídos permanentemente das análises por apresentarem falhas metodológicas experimentais.

Os ensaios EO3, EO4, EO24 e EO29 possuem em comum as baixas descargas sólidas na seção transversal do início do leito (< 10 g/min). Os pontos referentes a esses

ensaios também se deslocaram da tendência dos demais; portanto, em um primeiro momento, não foram incluídos, em um primeiro momento, nas análises aqui apresentadas. Sendo assim, a Figura 35 foi resumida à Figura 36, abaixo:

Figura 36: Relação da eficiência de transporte com a descarga sólida no início do leito móvel.



Os pontos dos ensaios com descarga sólida menor do que aproximadamente 50 g/min seguiram tendência similar para as três inclinações simuladas, na qual a eficiência cresce rapidamente com o acréscimo da descarga sólida. Nota-se que a partir desse valor de descarga sólida, os pontos com inclinação de 0,06 começaram a se destacar dos demais e a taxa de crescimento da eficiência diminuiu. Nota-se, igualmente, que a partir de um valor de descarga sólida de aproximadamente 200 g/min para a maior inclinação, 150 g/min para a inclinação intermediária e de aproximadamente 100 g/min para a menor inclinação, a taxa de crescimento é praticamente nula (assíntotas horizontais). Ainda, ressalta-se que não foi possível verificar diferenças significativas dessa relação entre os ensaios com inclinação 0,003 e 0,00015.

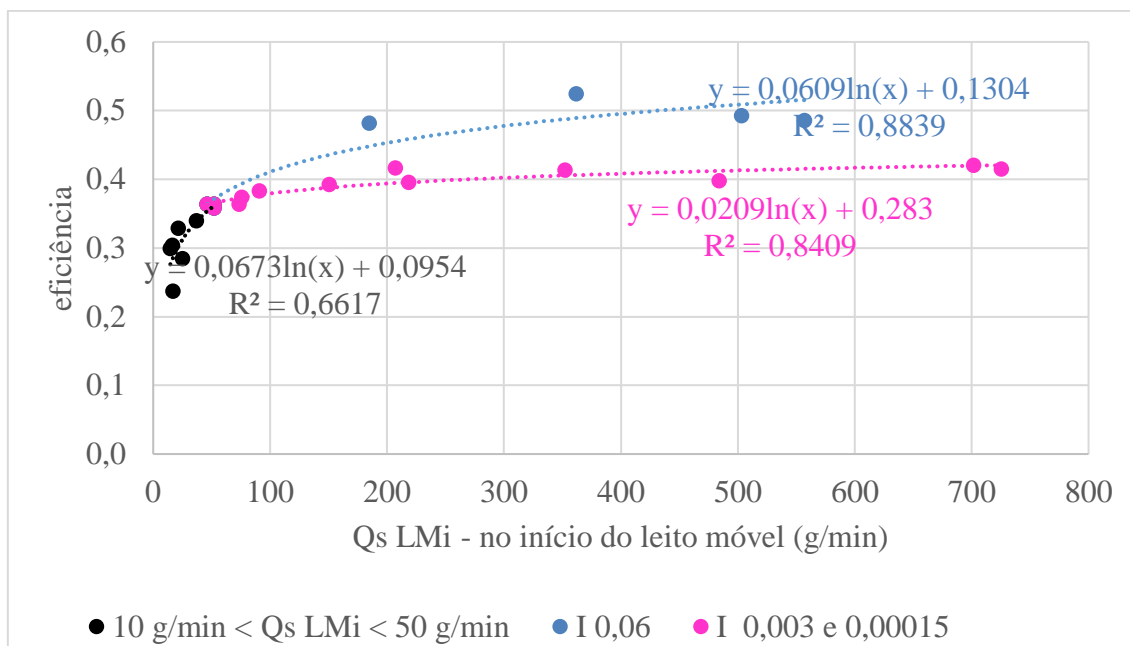
Sendo assim, uma linha de tendência única foi ajustada até os pontos cujos ensaios apresentaram valores de descarga sólida menor do que aproximadamente 50 g/min. Para os demais valores de descarga sólida, foram ajustadas linhas de tendência em função da

inclinação: uma linha de tendência para a maior inclinação e outra para as menores inclinações, pois apresentaram tendências bastante similares, não sendo possível distingui-las. Os pontos EO2, EO15 e EO19, cuja a descarga sólida média e seu desvio padrão resultaram, respectivamente, em 50,1 g/min e 3,3 g/min e cuja a eficiência foi igual a 0,36 foram utilizados em todas as curvas como pontos em comum. Os ensaios pertencentes às assíntotas horizontais foram aqueles compreendidos entre os valores de eficiência de 0,48 e 0,52 para os ensaios com a maior inclinação e entre 0,38 e 0,42 para os ensaios com as menores inclinações, conforme exposto na Tabela 16. A linha de tendência que melhor se ajustou ao fenômeno físico foi um ajuste do tipo logarítmico, segundo o apresentado na Figura 37.

Tabela 16: Análise da eficiência de transporte nas assíntotas horizontais.

Pontos pertencentes às assíntotas horizontais					
I (-)	Ensaio	Qs LMi (g/min)	Eficiência (-)	Média (-)	Desvio padrão (-)
0,06	EO 11	185,0	0,48	0,50	0,02
	EO 12	362,0	0,52		
	EO 13	557,2	0,49		
	EO 16	503,4	0,49		
0,003	EO 20	218,4	0,40	0,40	0,01
	EO 21	484,3	0,40		
	EO 27	701,8	0,42		
0,00015	EO 31	90,7	0,38	0,40	0,02
	EO 32	207,4	0,42		
	EO 33	725,5	0,41		
	EO 35	352,1	0,41		
	EO 36	150,8	0,39		

Figura 37: Relação da eficiência de transporte com a descarga sólida no início do leito móvel e as linhas de tendência ajustadas.



Nota-se que na transição entre a linha de tendência única (baixas descargas sólidas) e as assíntotas horizontais existem poucos pontos. Na curva referente à maior inclinação não houve nenhum ponto nessa região, na inclinação intermediária há o ensaio EO26 e na menor inclinação, o ensaio EO37. O ponto referente ao ensaio EO11 (inclinação 0,06), conforme a análise apresentada anteriormente (Tabela 16), já estaria localizado na região constante da curva; no entanto, a ausência de pontos na zona de transição impede uma conclusão mais precisa.

A observação do comportamento entre a descarga sólida na entrada do trecho de leito móvel e a eficiência do escoamento em transferir o material sedimentar para jusante permitiu estabelecer zonas com diferentes tendências, em função de faixas de valores destas descargas sólidas:

- Zona ascendente: é a faixa que depende apenas da descarga sólida. Nessa zona o aumento da descarga sólida ocasiona um rápido crescimento na eficiência de transporte que independe da inclinação do fundo;

- Zona de transição: é a faixa que depende tanto da inclinação como da descarga sólida. Nessa zona o aumento da inclinação e da descarga sólida ocasionam um crescimento moderado na eficiência de transporte;

- Zona assintótica: é a faixa que depende apenas da inclinação. Nessa zona o aumento da descarga sólida ocasiona um crescimento reduzido ou nulo na eficiência de transporte. No entanto, é nessa região que a eficiência atinge o seu valor máximo, o qual depende da inclinação.

Através dos quatro ensaios deste trabalho que apresentaram descargas sólidas abaixo de 10 g/min (EO3, EO4, EO24 e EO29) não foi possível reconhecer alguma tendência clara da eficiência de transporte com a descarga sólida ou com a inclinação. Ressalta-se que os únicos dois ensaios para os quais foi identificado modificações na forma do leito móvel. No entanto, é importante ressaltar que essa zona carece de uma investigação mais detalhada para a obtenção de tendências e conclusões mais sólidas.

Os comportamentos dessas curvas podem estar relacionados com o conceito de saturação do fluxo relacionado a estados assintóticos, apresentado por Gyr e Hoyer (2006). Os autores escreveram: “Além das tentativas de descrever o transporte de sedimentos por meio de processos mecanicistas, outra abordagem pode ser adotada, a qual interpreta o transporte de sedimentos como uma resposta dinâmica a um princípio de extremos. Nesse caso, os mecanismos locais não são importantes; o sistema reage e não se faz necessário entender os detalhes. Uma propriedade importante dessa teoria é a saturação da carga em transporte, uma grandeza (descarga sólida ou concentração) que está faltando nas teorias clássicas.”⁶. Os resultados apresentados nessa seção são um forte indicativo desse fenômeno no caso das correntes de turbidez.

Chamoun, de Cesare e Schleiss (2017) trabalharam com o conceito de eficiência avaliando a concentração volumétrica de correntes de turbidez através uma descarga de fundo de um modelo físico de barragem. Assim como nesse trabalho, os autores encontraram eficiências maiores quando há aumento da inclinação do fundo. Ainda, Boffo *et al* (2017) concluíram que para concentrações volumétricas de até aproximadamente 20%, a eficiência de transporte é constante.

É interessante notar que os ensaios pertencentes à zona ascendente na Figura 37 são os mesmos ensaios pertencentes à zona linear da Figura 31 (π_1 e $\pi_2 \times \pi_3$), assim

⁶ “Besides the attempts to describe the sediment transport by mechanistic processes, another approach was pursued by interpreting the sediment transport as a dynamical response to an extremum principle. In this case, the local mechanisms are not important; the system reacts and we need not know how it responds in detail. An important property of such a system theory is the saturation of the transport load, which is a quantity that was missing in the classical theories”.

como os ensaios pertencentes à zona assintótica são os mesmos da região crescente no caso da relação π_1 e $\pi_2 \times \pi_3$. A mesma semelhança ocorre com a relação entre o conjunto de variáveis de Bagnold e a descarga sólida (Figura 32), sendo que nas baixas descargas sólidas ambas as curvas são ascendentes e depois estabilizam-se assintoticamente com o aumento da descarga sólida. Essa semelhança sugere que essas variáveis (a potência do escoamento, as variáveis consideradas por Bagnold) e a eficiência de transporte estejam relacionadas de alguma forma.

5.2.3 Eficiência X Parâmetros adimensionais do fluxo

A eficiência de transporte foi relacionada com dois parâmetros do fluxo, o número de Froude densimétrico e o número de Reynolds.

5.3.1 Número de Froude densimétrico

A Figura 38 mostra a relação entre o número de Froude densimétrico e a eficiência dos ensaios realizados. Como pode-se observar, não foi possível prever uma tendência clara entre o número de Froude densimétrico e a eficiência dos fluxos quando todos os ensaios são analisados em conjunto. Os ensaios EO10 e EO28, em destaque, apresentaram os maiores valores de número de Froude densimétrico, destacando-se dos demais. Em geral, os valores ficaram compreendidos entre 0,8 e 2,4.

Analisando somente os ensaios na zona assintótica, nota-se uma tendência de aumento linear da eficiência máxima de transporte em relação ao aumento do número de Froude (Figura 39). Já quando analisados somente os ensaios na zona ascendente, notou-se um decaimento linear da eficiência de transporte em relação ao número de Froude. No entanto, no caso da zona ascendente, os dados não possuíram baixa correlação.

Figura 38: Relação da eficiência de transporte com o número de Froude densimétrico.

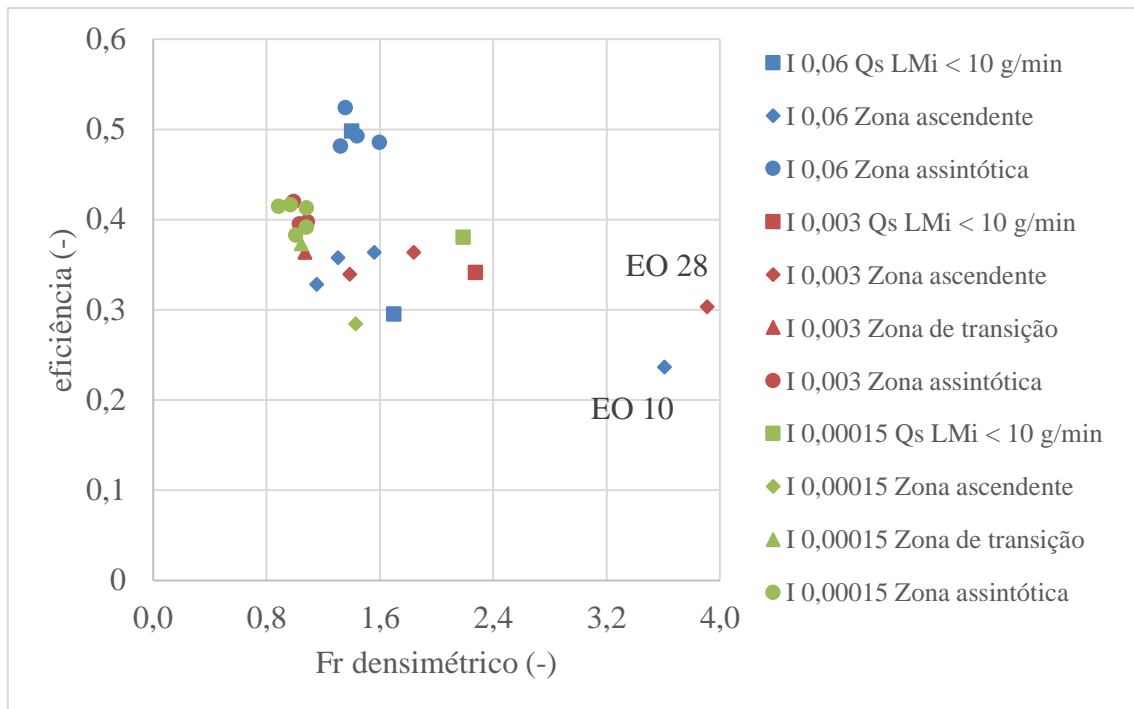
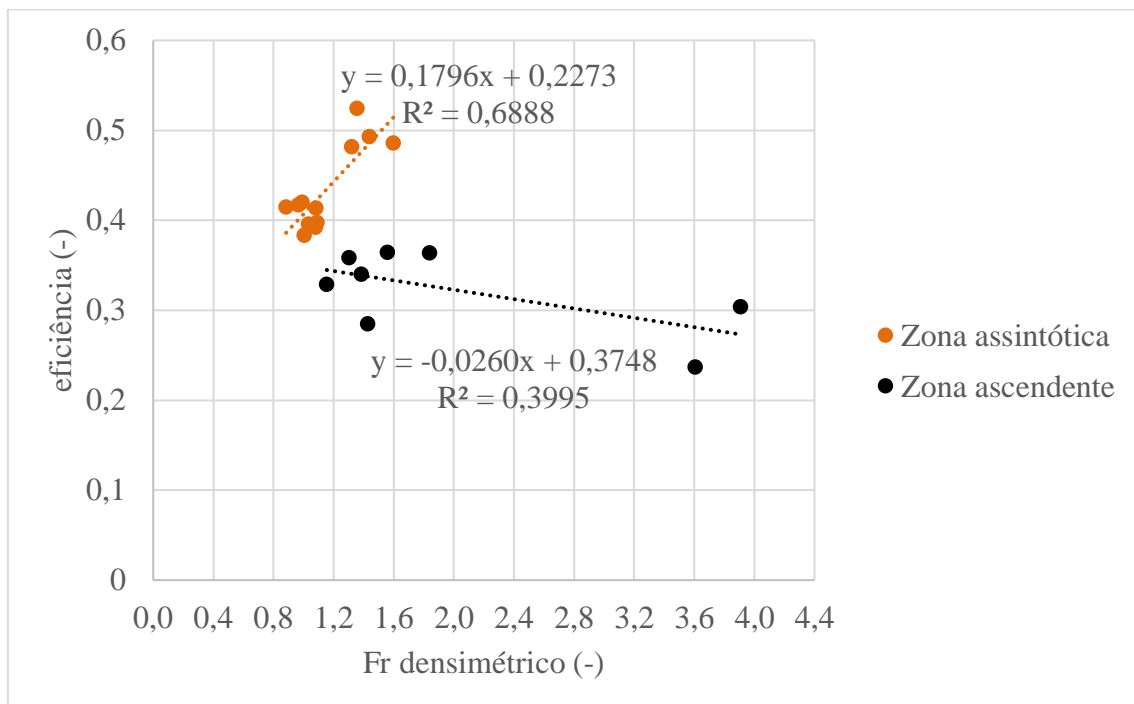


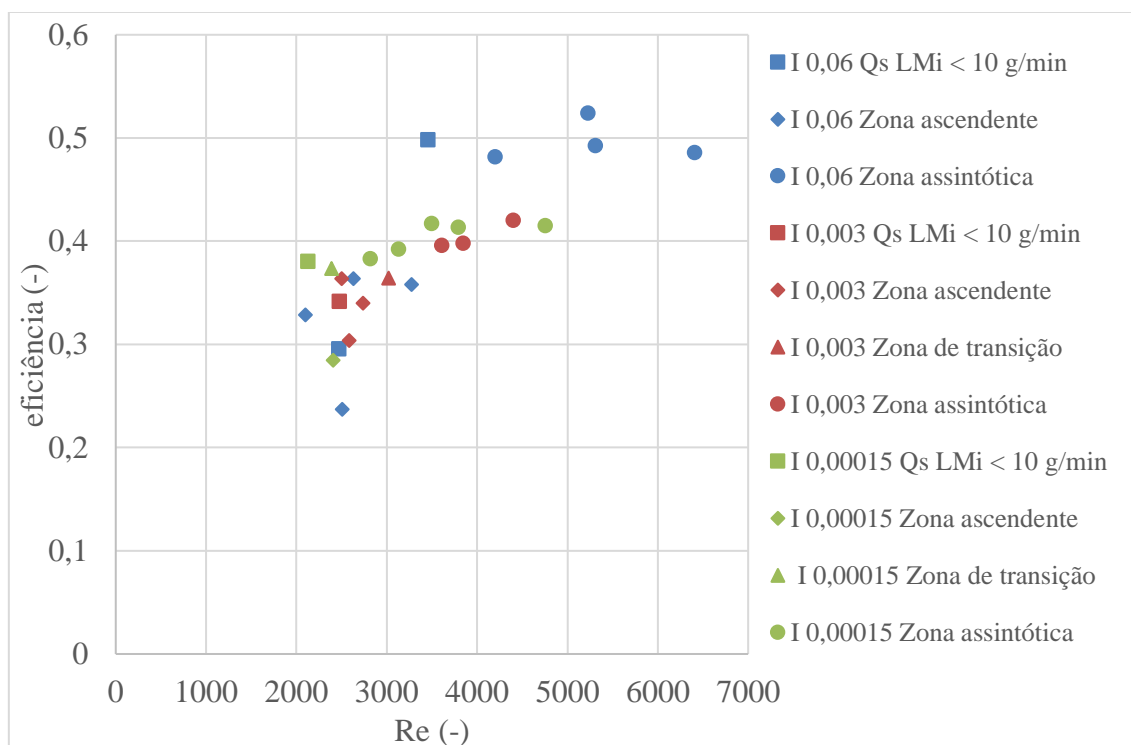
Figura 39: Relação da eficiência de transporte com o número de Froude densimétrico para os ensaios localizados na Zona assintótica.



5.3.2 Número de Reynolds

A Figura 40 mostra a relação da eficiência de transporte com o número de Reynolds. A forma da tendência encontrada é bastante similar àquela resultante da relação da eficiência de transporte com a descarga sólida (Figura 36). Pode-se observar uma região com valores de número de Reynolds entre aproximadamente 2000 e 3300 onde não é possível verificar a influência na inclinação na distribuição dos pontos. Após um certo valor de número de Reynolds, observou-se a invariância da eficiência com o número de Reynolds. Para a maior inclinação, esse valor do número de Reynolds está visualmente próximo a 3500, para a inclinação intermediária, a 3000 e para a menor inclinação, a 2500.

Figura 40: Relação da eficiência de transporte com o número de Reynolds.



A modelagem física a partir da semelhança do número de Froude deve apresentar invariância com o número de Reynolds (HELLER, 2017). Parsons e García (1998) analisaram o espectro de energia da região da cabeça de correntes de turbidez e verificaram que ocorrem consideráveis desvios desse espectro abaixo de um valor do número de Reynolds igual 1000, pois a produção de energia turbulenta passa a ser afetada

pela viscosidade. Os autores também ressaltam que para as outras regiões da corrente de turbidez esse limite pode ser maior.

Considerando o exposto por Heller (2017) e Parsons e García (1998) e que a eficiência de transporte dos pontos fora da zona assintótica possuem dependência da eficiência com o número de Reynolds, é possível que nesses ensaios existiram efeitos de escala. No entanto, para se ter certeza que se trata realmente de um efeito de escala é necessária a reprodução desses experimentos em uma escala maior. Se confirmada essa hipótese, essa seria a primeira verificação experimental da invariância do número de Reynolds relacionada com a capacidade de transporte de correntes de turbidez.

5.2.4 Eficiência X Taxa de geração de depósito

A Figura 41 mostra a relação da eficiência de transporte com a taxa de geração de depósito, cujo comportamento é similar ao da eficiência com a descarga sólida. Assim, apesar de a eficiência chegar em um estado assintótico para descargas sólidas superiores a 100-200 g/min (dependendo da declividade do fundo), o depósito gerado cresce indefinidamente (Figura 42). As duas informações foram sintetizadas na Figura 43, sendo que o ajuste das retas foi realizado através das mesmas premissas utilizadas no ajuste das curvas logarítmicas (subseção “5.2.1 Eficiência X Descarga sólida”).

Nota-se que a curva ajustada para os ensaios com menor inclinação possui coeficiente angular superior àquela ajustada para os ensaios com inclinação igual a 0,06. Isso é lógico, pois o maior coeficiente angular está relacionado com a menor eficiência de transporte máxima (inclinações 0,003 e 0,00015).

Figura 41: Relação da eficiência de transporte com a taxa de geração de depósito.

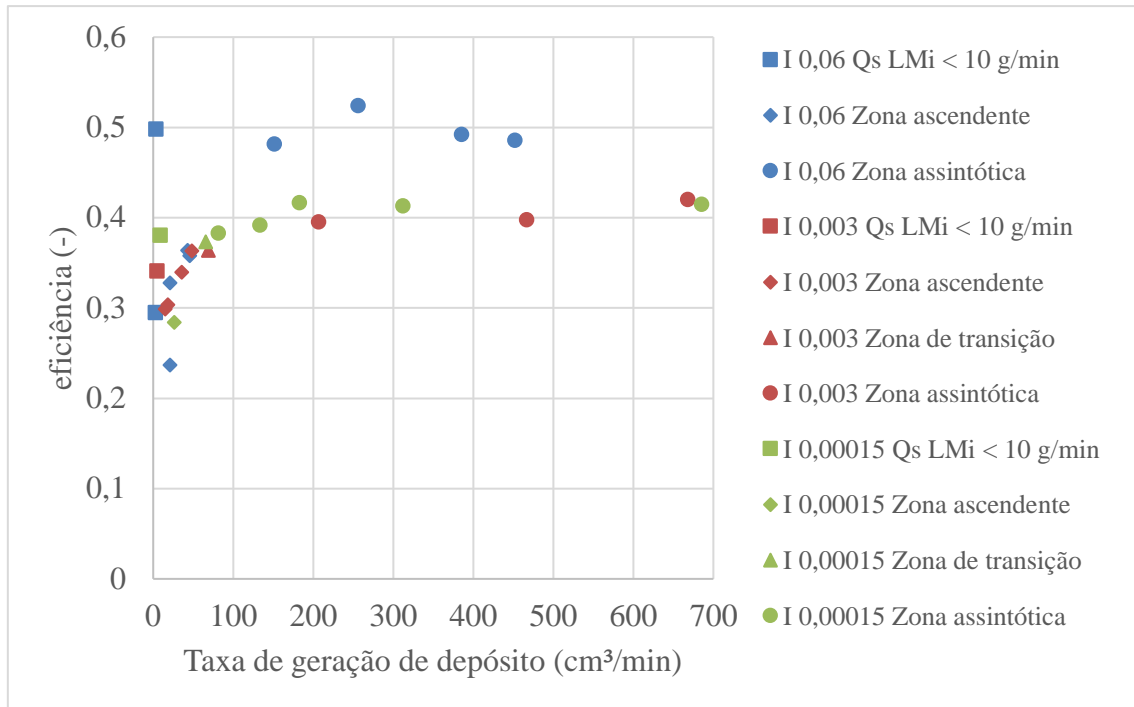


Figura 42: Relação da descarga sólida com a taxa de geração do depósito.

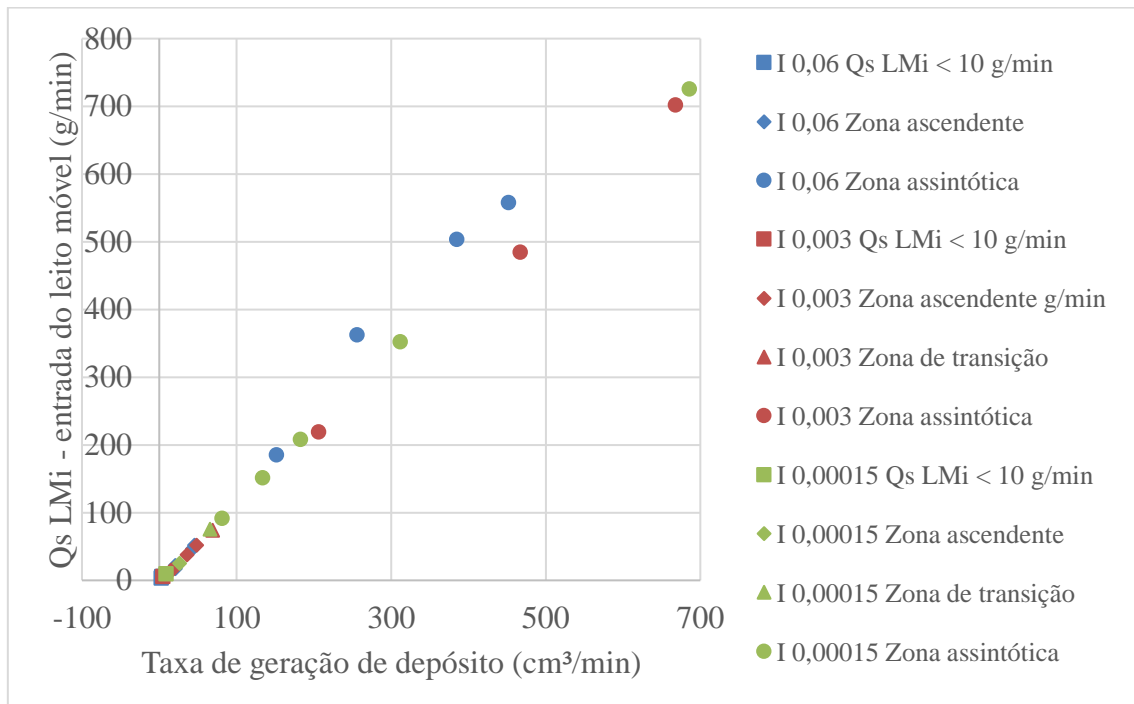
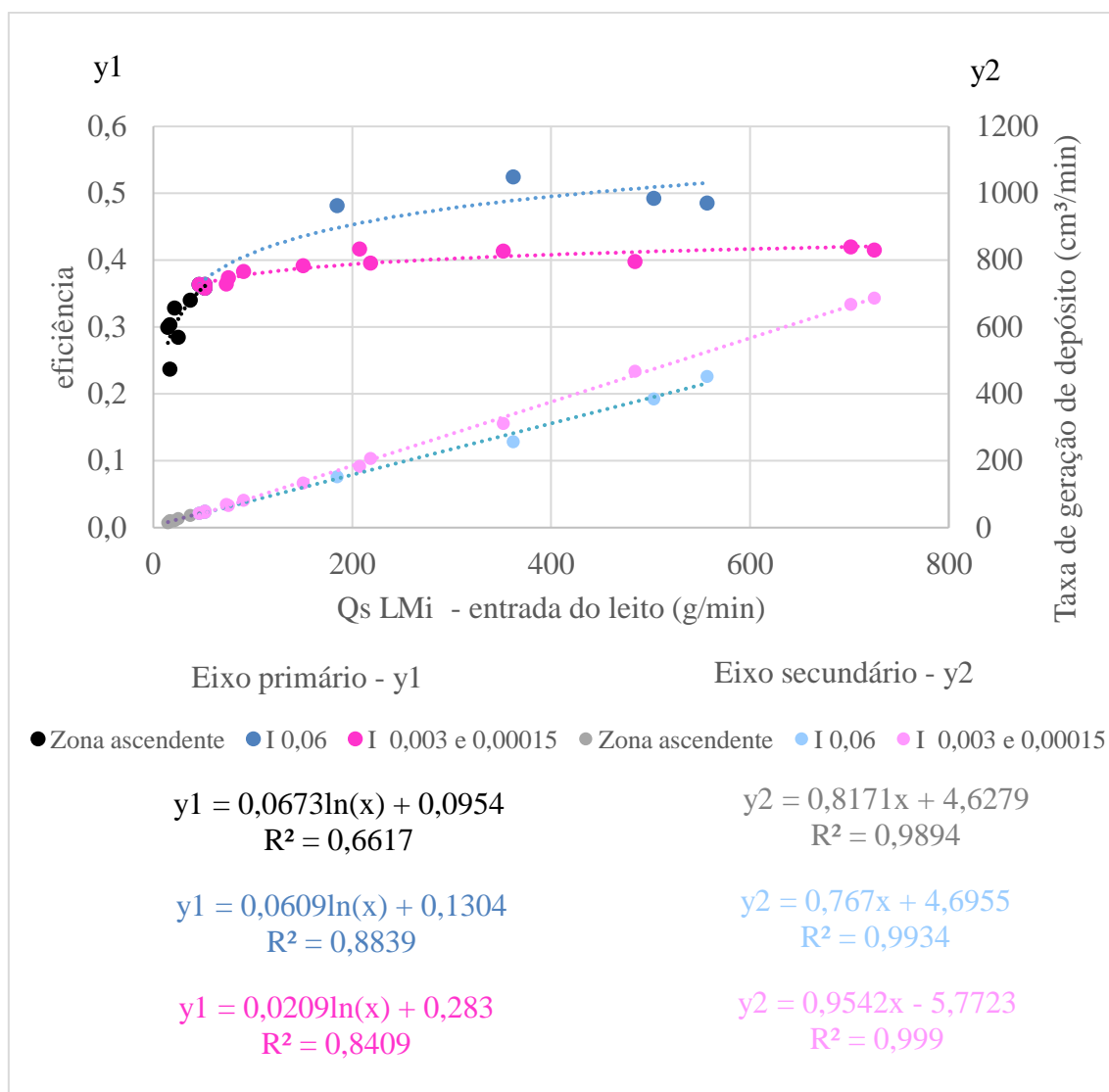


Figura 43: Relação da eficiência de transporte e da taxa de geração de depósito com a descarga sólida no início do leito móvel.



5.2.5 Eficiência X Diâmetros dos grãos

A relação da eficiência de transporte com os diâmetros característicos foi analisada através das análises granulométricas realizadas no material transportado para jusante do leito móvel (M3). Mais especificamente a análise foi realizada a partir da relação entre os diâmetros característicos desse sedimento e o injetado (Tabela 17), afim de evitar interpretações errôneas devido às diferenças granulométricas do material utilizado no preparo da mistura (Tabela 5). Os resultados foram plotados (Figuras 44, 45 e 46) considerando as zonas pré-definidas na subseção “5.2.1 Eficiência X Descarga sólida”.

Tabela 17: Ensaio realizados e as respectivas relações entre os diâmetros característicos D10, D50 e D90 do sedimento transportado para depois do leito móvel e do sedimento injetado no canal.

Relação entre os diâmetros característicos - sedimento transportado (M3) / sedimento injetado (CV)			
Ensaio	D10	D50	D90
	-	-	-
EO 2	0,8328	0,8162	0,7967
EO 3	1,1244	0,8462	0,8186
EO 4	1,2467	0,8532	0,8190
EO 10	0,5758	0,7867	0,7886
EO 11	0,8775	0,8529	0,8285
EO 12	0,8949	0,9001	0,8866
EO 13	0,9108	0,8953	0,8920
EO 15	0,8464	0,8567	0,8207
EO 16	1,4109	0,9794	0,9598
EO 17	0,9220	0,8948	0,8785
EO 19	0,8569	0,8365	0,8145
EO 20	0,8647	0,8444	0,8267
EO 21	0,8903	0,8609	0,8399
EO 23	0,8978	0,8467	0,8310
EO 24	0,8589	0,8279	0,8053
EO 25	0,8749	0,8375	0,8247
EO 26	0,8577	0,8303	0,8096
EO 27	0,8964	0,8600	0,8496
EO 28	0,8881	0,8538	0,8397
EO 29	0,8579	0,8329	0,8132
EO 30	0,8197	0,8248	0,8120
EO 31	0,8699	0,8438	0,8226
EO 32	0,8626	0,8447	0,8303
EO 33	0,8806	0,8585	0,8506
EO 35	0,8960	0,8591	0,8503
EO 36	0,8530	0,8393	0,8288
EO 37	0,8745	0,8509	0,8457

Figura 44: Relação da eficiência de transporte com a relação entre o diâmetro característico D90 do sedimento transportado para depois do leito móvel e do sedimento injetado no canal.

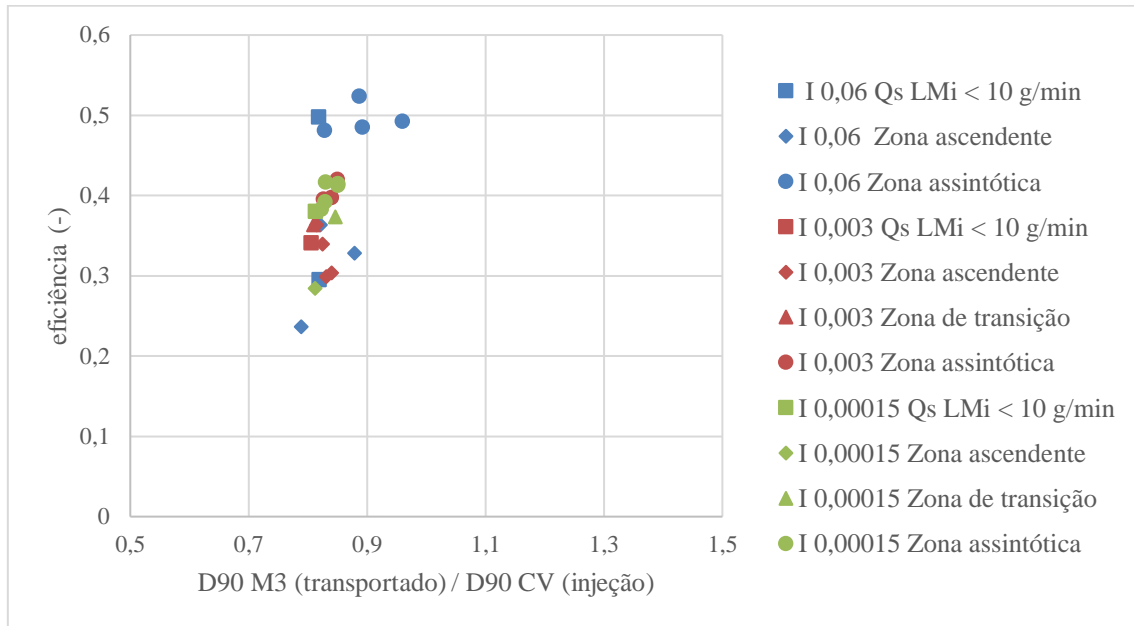


Figura 45: Relação da eficiência de transporte com a relação entre o diâmetro característico D50 do sedimento transportado para depois do leito móvel e do sedimento injetado no canal.

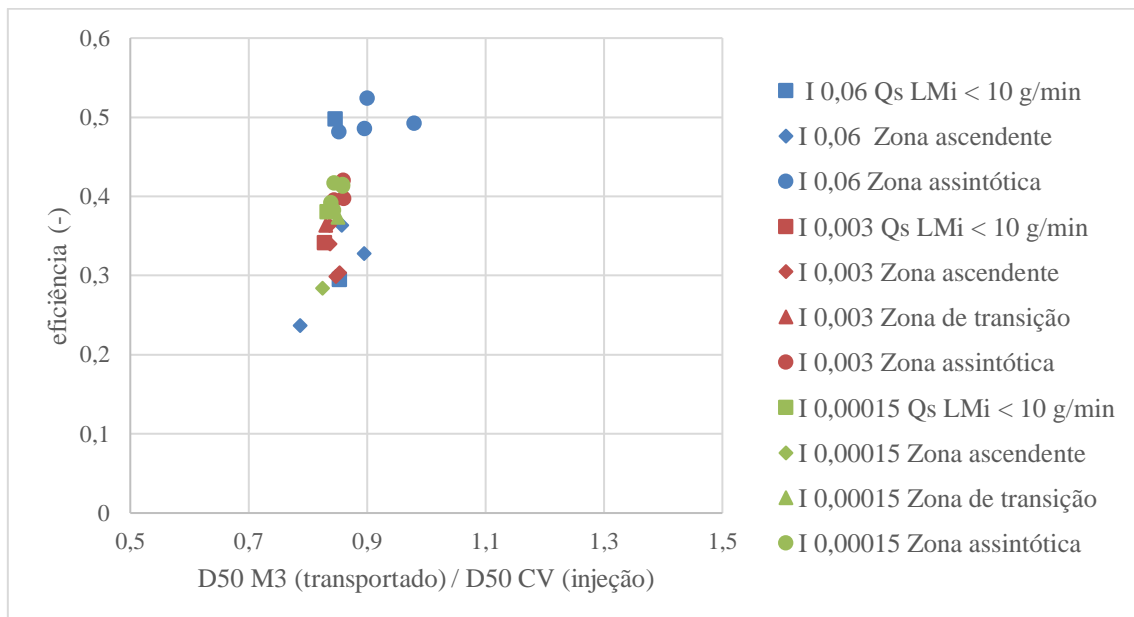
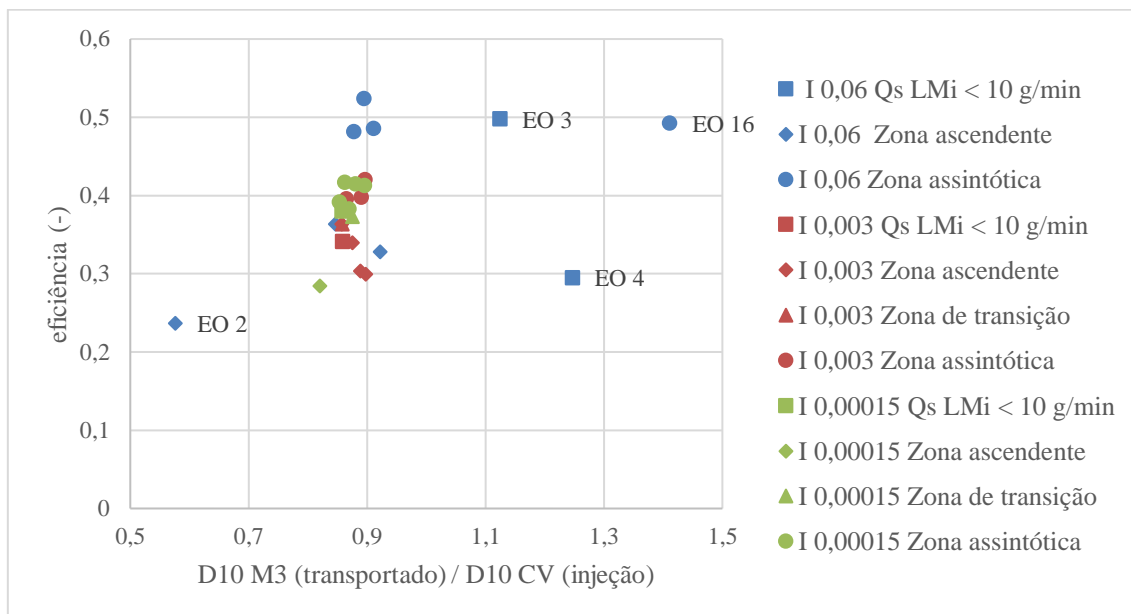
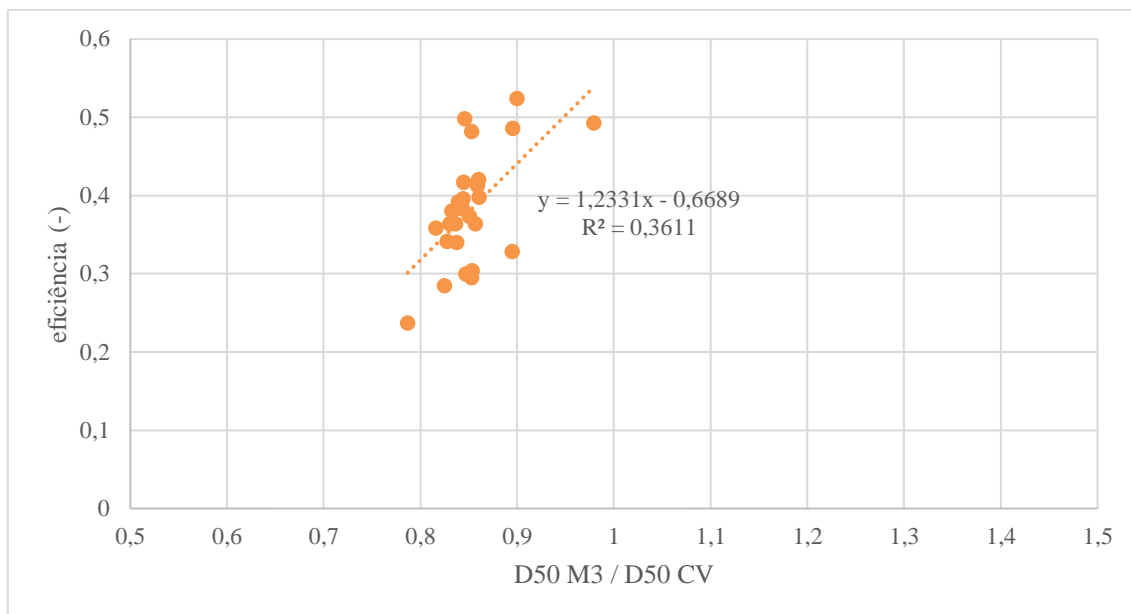


Figura 46: Relação da eficiência de transporte com a relação entre o diâmetro característico D10 do sedimento transportado para depois do leito móvel e do sedimento injetado no canal.



Os dados apresentados na Tabela 17 e nas figuras acima (Figuras 44, 45 e 46) indicam que os ensaios realizados com maior declividade de fundo apresentaram maior variabilidade nos resultados referentes à relação entre a eficiência de transporte e a diminuição ou acréscimo dos diâmetros característicos dos grãos transportados pela corrente, especialmente nos valores referentes ao diâmetro característico D10. Embora os dados também sugiram o aumento da razão com o aumento da eficiência, não houve uma boa correlação entre essas variáveis (principalmente em relação a D10), mesmo quando considerados apenas os pontos localizados na zona assintótica. Para a relação do diâmetro característico D50 foi ajustada uma tendência linear, conforme apresentado na Figura 47.

Figura 47: Relação da eficiência de transporte com a relação entre o diâmetro característico D90 do sedimento transportado para depois do leito móvel e do sedimento injetado no canal – ajuste linear.



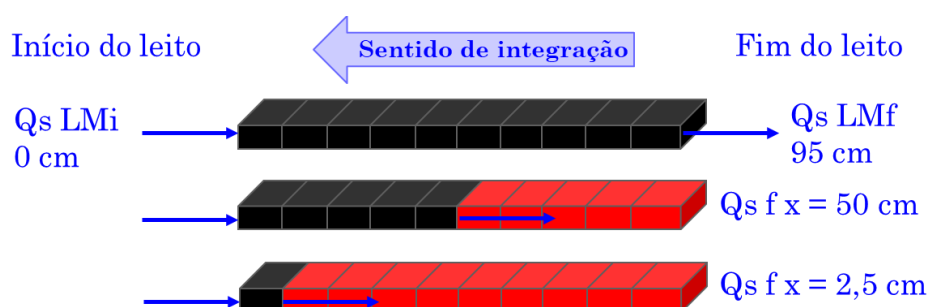
Em média o diâmetro característico do sedimento transportado para jusante do leito móvel foi cerca de 15% menor do que aquele injetado. Nota-se que o diâmetro característico D90 decresceu mais do que o diâmetro característico D10, o que significa que grãos maiores depositaram-se com maior frequência. Destacam-se os ensaios EO3, EO4 (localizados na zona com descarga sólida menor do que 10 g/min no início do leito) e EO16 (localizado na zona assintótica), realizados com declividade de 0,06, pois apresentaram um aumento do diâmetro característico D10. Ao mesmo tempo, esses ensaios apresentaram diminuição do valor de D90, indicando que a curva granulométrica ficou mais uniforme, ou seja, os grãos ficaram mais selecionados. Também se destaca o ensaio EO10, cujo menor valor de eficiência foi relacionado com a maior diminuição do tamanho dos grãos.

5.2.6 Eficiência X Distância entre a seção transversal inicial e final

O conceito de eficiência de transporte foi analisado até o momento considerando sempre a mesma distância entre as seções transversais no início e no fim do leito, cerca de 95cm. No entanto, através do perfil longitudinal adquirido, cujos pontos foram coletados a cada 2,5 centímetros de distância, ao longo dos 95cm, a eficiência de transporte pode ser analisada em diferentes posições da seção transversal final, através da

integração das massas de jusante para montante, como exposto na Figura 48. Os resultados para cada zona definida na subseção “5.2.1 Eficiência X Descarga sólida” estão expostos nas Figuras 49, 50, 51 e 52. Nota-se que quando a distância entre as seções é de 2,5 centímetros (menor distância analisada), todos os ensaios apresentaram eficiência de transporte próxima da unidade, mas nunca a superando. Com o acréscimo da distância a partir da mudança da posição da seção transversal de jusante, a eficiência decresceu.

Figura 48: Desenho esquemático da integração das massas de jusante para montante.
Créditos da ilustração: Carolina H. Boffo.



$$Q_s f x = 2,5 \text{ cm} > Q_s f x = 50 \text{ cm} > Q_s f x = 95 \text{ cm}$$

Na zona com descarga sólida $< 10 \text{ g/min}$ destacaram-se os ensaios EO3 e EO4 (maior inclinação) pela forma mais dispersa das relações apresentadas. Em alguns pontos ocorreu o aumento da eficiência, corroborando para a sugestão de que essas correntes podem ter incorporado material do leito, ainda que, no balanço geral, estivessem depositando sedimento. No ensaio EO24 (inclinação intermediária), isso ocorreu de forma muito sutil em apenas dois pontos. No ensaio EO29 (menor inclinação), a sequência de pontos comportou-se da mesma forma que os ensaios das zonas com maior descarga sólida (decaimento exponencial), discutidas na sequência.

Na zona ascendente, a variação da eficiência de transporte com a distância entre as seções transversais se aproximou de um ajuste exponencial. Na Tabela 18 estão expostos as constantes ajustadas e o coeficiente de determinação para os ensaios que pertencem à essa zona. Já que nessa região verificou-se que a eficiência de transporte depende apenas da descarga sólida (Subseção 5.2.1 Eficiência X Descarga sólida), os expoentes de decaimento das curvas ajustadas foram relacionados com a descarga sólida na seção transversal localizada no início do leito móvel (Figura 53).

Figura 49: Relação entre a eficiência de transporte e a distância para os ensaios localizados na zona com descarga sólida no início do leito menor de que 10 g/min.

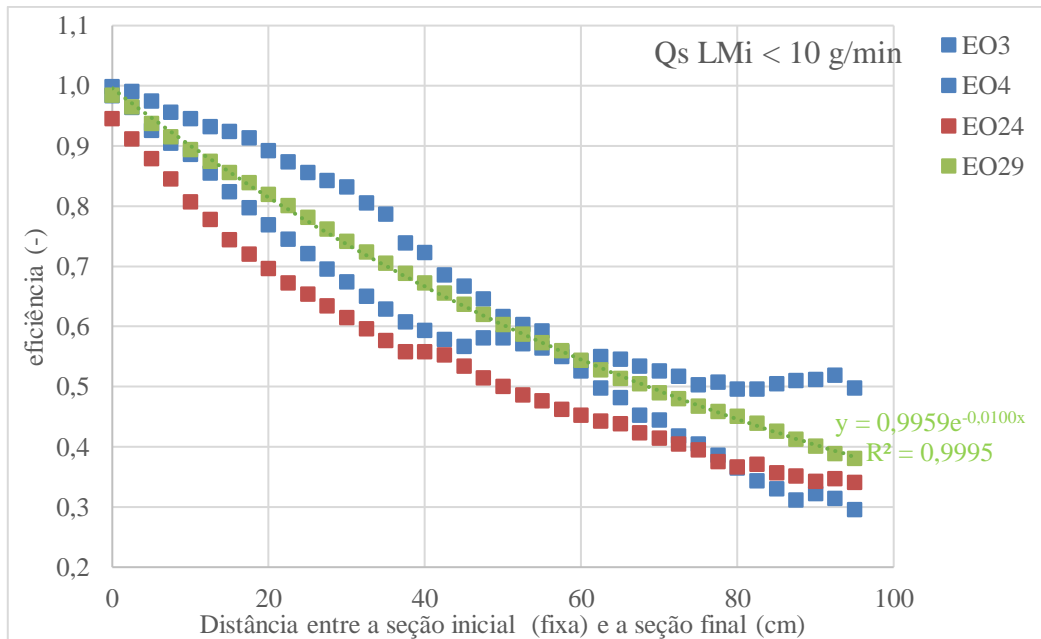


Figura 50: Relação entre a eficiência de transporte e a distância para os ensaios localizados na zona com descarga sólida no início do leito entre 10 g/min e 50 g/min.

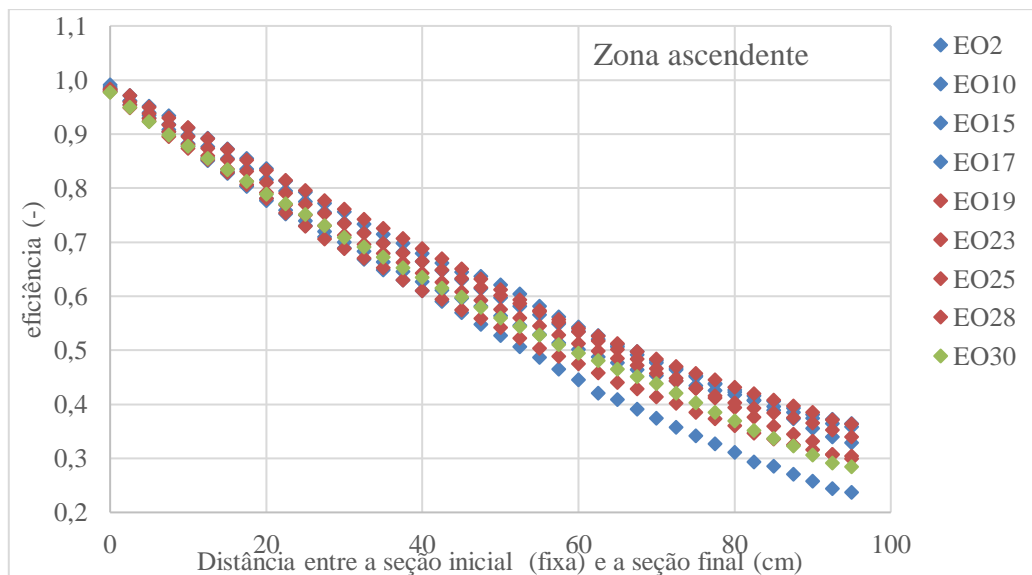


Figura 51: Relação entre a eficiência de transporte e a distância para os ensaios localizados na zona de transição.

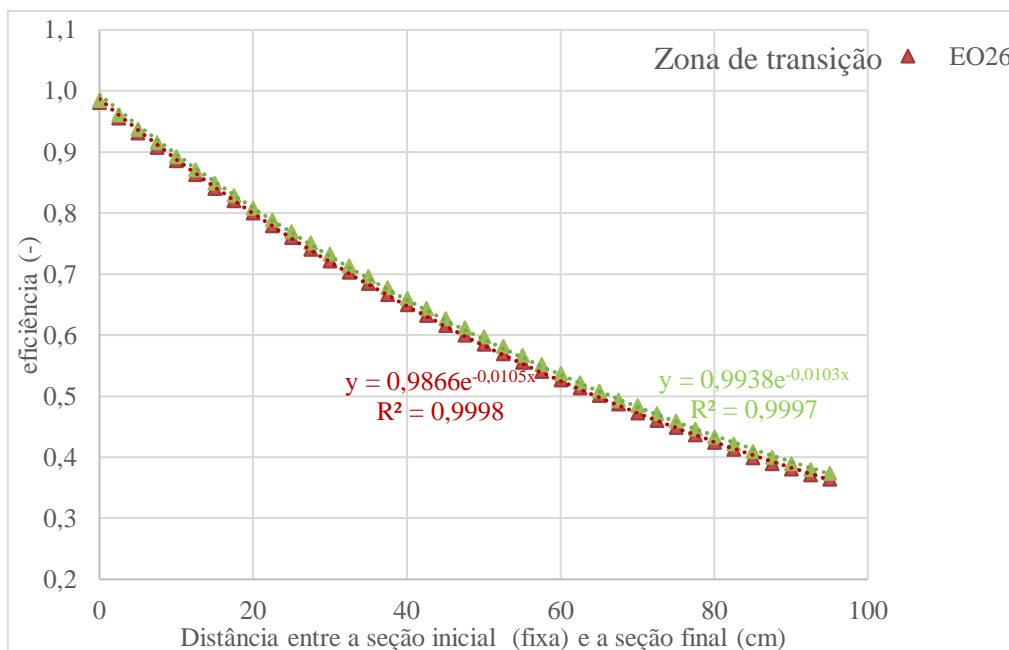


Figura 52: Relação entre a eficiência de transporte e a distância para os ensaios localizados na zona assintótica.

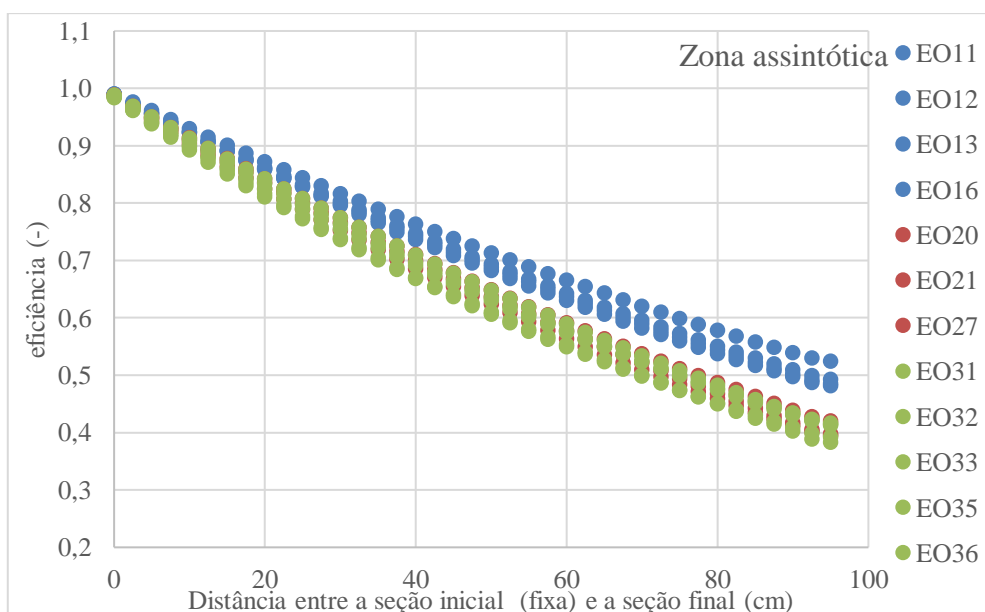
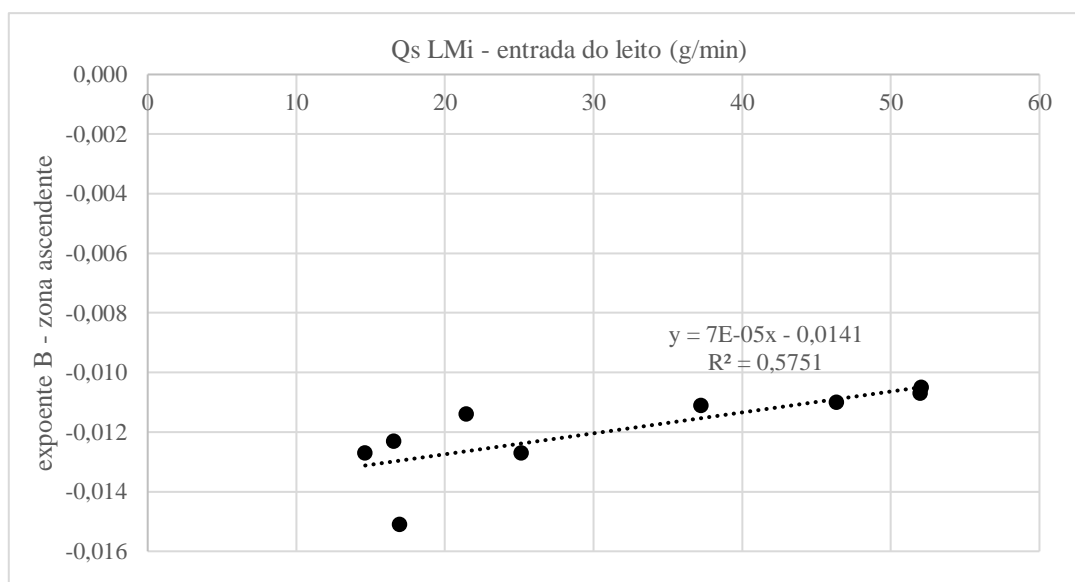


Tabela 18: Ensaio da zona ascendente e as respectivas constantes ajustadas para os ajustes exponenciais da relação entre a eficiência de transporte e a distância.

Ensaio	Qs LMi (g/min)	Ajuste $y=Ae^{Bx}$ - eficiência x distância		
		Zona ascendente		
		coeficiente A	expoente B	R ²
EO2	52,00	0,967	-0,0107	0,999
EO10	16,97	1,061	-0,0151	0,991
EO15	46,35	1,005	-0,0110	0,999
EO17	21,47	1,048	-0,0114	0,990
EO19	52,07	1,000	-0,0105	0,999
EO23	14,64	1,001	-0,0127	0,999
EO25	37,23	0,991	-0,0111	0,999
EO28	16,57	1,073	-0,0123	0,982
EO30	25,16	1,025	-0,0127	0,991

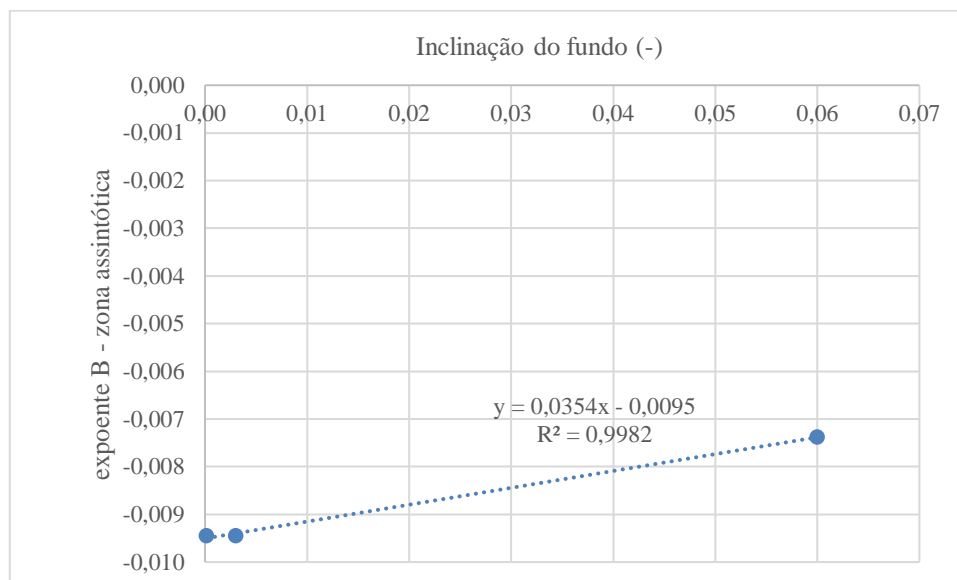
Figura 53: Relação entre o expoente B das curvas exponenciais ajustadas para a relação entre a eficiência de transporte e a distância a eficiência de transporte, para os ensaios localizados na zona ascendente.



Com relação aos ensaios pertencentes à zona de transição, esperar-se-ia que os expoentes das tendências ajustadas tivessem uma relação com a descarga sólida e a inclinação, seguindo a mesma lógica do exposto na subseção “5.2.1 Eficiência X Descarga sólida” e nos parágrafos anteriores. No entanto, apenas dois ensaios localizaram-se nessa região, não sendo possível verificar tais relações.

A Tabela 19 mostra as constantes dos ajustes exponenciais realizados para os pontos dos ensaios pertencentes a zona assintótica. Seguindo a mesma lógica do exposto na subseção “5.2.1 Eficiência X Descarga sólida”, esses expoentes dependem apenas da inclinação, pois tratam da zona assintótica. Sendo assim um ajuste linear foi definido para a relação entre o expoente B e a declividade (Figura 54).

Figura 54: Relação entre o expoente B das curvas exponenciais ajustadas para a relação entre a eficiência de transporte e a distância a eficiência de transporte, para os ensaios localizados na zona assintótica.



A constante A igual a 1 e a média do expoente B foram utilizados para a construção de uma curva até o valor de eficiência igual a zero. A equação resultante para a inclinação 0,06 e para ambas as inclinações 0,003 e 0,00015 estão expostas nas Equações 31 e 32, respectivamente. Na Figura 55 estão representadas as curvas e a diferença entre elas.

Tabela 19: Ensaios da zona assintótica e as respectivas constantes ajustadas para os ajustes exponenciais da relação entre a eficiência de transporte e a distância.

Ensaio	Ajuste $y=Ae^{Bx}$ - eficiência x distância - Zona assintótica		
	coeficiente A	expoente B	R ²
EO11	0,999	-0,0077	1,000
EO12	0,998	-0,0068	1,000
EO13	0,999	-0,0076	1,000
EO16	0,999	-0,0074	1,000
EO20	1,003	-0,0097	0,999
EO21	1,013	-0,0096	0,997
EO27	1,009	-0,0091	0,998
EO31	0,995	-0,0099	0,999
EO32	0,989	-0,0091	1,000
EO33	1,012	-0,0092	0,998
EO35	1,003	-0,0093	0,999
EO36	0,985	-0,0097	1,000

$$\text{eficiência} = e^{-0,00738\text{distância}} \quad \text{Equação 31}$$

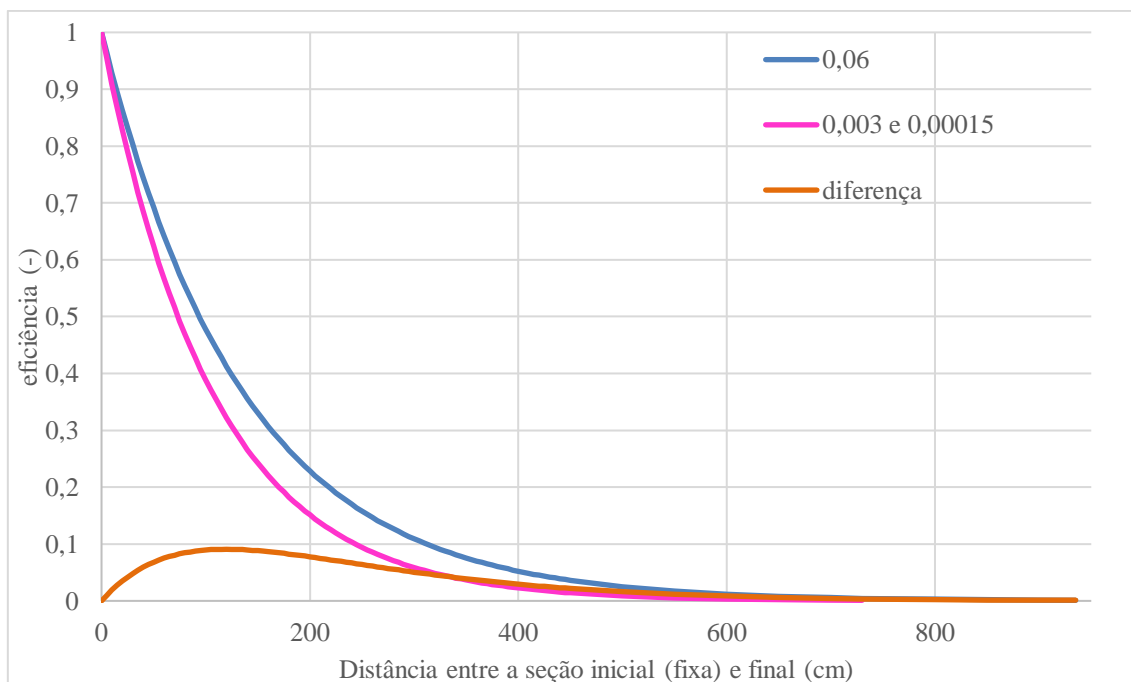
$$\text{eficiência} = e^{-0,00945\text{distância}} \quad \text{Equação 32}$$

Onde:

eficiência = eficiência de transporte das correntes de turbidez (-);

distância = distância da seção transversal final considerada à seção transversal inicial do leito (cm).

Figura 55: Relação entre a eficiência de transporte e a distância para a relação obtida através das Equações 31 e 32 e a diferença entre ambas.



Nota-se que a diferença entre as curvas atinge um valor aproximadamente constante na distância de 85 centímetros, estendendo-se até aproximadamente 165 centímetros. Essa compreende a região de análise onde seria possível verificar as mesmas diferenças entre as inclinações, ainda que, na posição a 165 centímetros do início do leito, a eficiência seja próxima aos valores de 0,3 e 0,2, para a inclinação de 0,06 e ambas 0,003 e 0,00015, respectivamente. Para distâncias menores ou maiores do que essas, não é possível verificar o efeito da inclinação na eficiência de transporte. Sendo assim, entre a distância de 0,85 e 165 centímetros é possível aplicar a teoria exposta na subseção “5.2.1 Eficiência X Descarga sólida” desenvolvida levando em consideração a eficiência de transporte estimada para uma distância de 95 centímetros.

Sendo assim, para cada distância entre uma seção inicial e final compreendida entre 85 centímetros e 165 centímetros espera-se uma curva similar àquela encontrada para a distância de 95 centímetros, porém com valores de eficiência que seriam diferentes, conforme a distância entre os dois pontos analisados. É razoável e esperado que a eficiência de transporte diminua com a distância, já que não seria impossível uma corrente de turbidez existir até uma distância infinita, mesmo se a alimentação fosse mantida. Exemplo disto é o cone deposicional de uma corrente de turbidez proposto por Bouma

em 1962. No entanto, para avaliar com precisão a relação da eficiência com a distância seria necessária a simulação dos fluxos em um canal muito longo, de forma que toda corrente se depositasse no interior do mesmo.

Por fim, foi definida uma equação de estimativa da eficiência de transporte dos fluxos para a zona ascendente e outra para a zona assintótica (Equações 33 e 34, respectivamente), utilizando as equações ajustadas para os expoentes B (Figuras 53 e 54).

$$\text{eficiência} = e^{(7E-5*QsLMi - 0,0142) \text{ distância}} \quad \text{Equação 33}$$

$$\text{eficiência} = e^{(0,0354*I - 0,0095) \text{ distância}} \quad \text{Equação 34}$$

Onde:

eficiência = eficiência de transporte das correntes de turbidez (-);

distância = distância da seção transversal final considerada à seção transversal inicial do leito (cm);

Qs LMi = descarga sólida na seção do início do leito móvel (g/min);

I = inclinação do fundo (-).

6 CONCLUSÕES

Esse trabalho se propôs a investigar a aplicabilidade dos conceitos de competência de escoamentos fluviais e de capacidade de transporte nos fluxos de correntes de turbidez. Através da simulação física de 30 experimentos com condições variadas de declividade e de descarga sólida, foi possível quantificar características sedimentológicas e das correntes de turbidez, através das quais parâmetros clássicos da hidráulica fluvial foram avaliados.

Através das análises realizadas foi possível verificar que o conceito de competência do escoamento e de capacidade de transporte não são refletidos nos fluxos de correntes de turbidez da mesma forma que nos escoamentos fluviais, devido às diferenças básicas entre esses escoamentos: campo gravitacional reduzido e relação direta da velocidade com a descarga sólida. Apesar desses parâmetros não serem adequados à realidade dos fluxos simulados em termos de competência e de capacidade, eles sugerem uma série de tendências que fazem pensar acerca de padrões das correntes de turbidez, especialmente com relação à potência e intensidade dos fluxos.

Através dos dados de descarga sólida coletados foi possível a aplicação do conceito de eficiência de transporte de forma sistemática. A aplicação desse conceito foi capaz de refletir a dinâmica desses fluxos, bem como da formação dos seus depósitos, em termos de descarga sólida das correntes. Dessa análise conclui-se que as correntes de turbidez possuem uma eficiência de transporte máxima e não uma capacidade de transporte máxima propriamente dita. Tal eficiência de transporte é função de fatores diferentes dependendo da descarga sólida dos fluxos, a saber:

- Zona ascendente - $10 \text{ g/min} < Q_s \text{ LMi} < 50 \text{ g/min}$: é a faixa que depende apenas da descarga sólida. Nessa zona o aumento da descarga sólida ocasiona um rápido crescimento na eficiência de transporte que independe da inclinação do fundo;

- Zona de transição – $50 \text{ g/min} < Q_s \text{ LMi} < 200 \text{ g/min}$ para $I = 0,06$ - $50 \text{ g/min} < Q_s \text{ LMi} < 150 \text{ g/min}$ para $I = 0,003$ - $50 \text{ g/min} < Q_s \text{ LMi} < 100 \text{ g/min}$ para $I = 0,0015$: é a faixa que depende tanto da inclinação como da descarga sólida. Nessa zona o aumento da inclinação e da descarga sólida ocasionam um crescimento moderado na eficiência de transporte;

- Zona assintótica – $Q_s L M_i >$ limite superior definido na zona de transição: é a faixa que depende apenas da inclinação. Nessa zona o aumento da descarga sólida ocasiona um crescimento reduzido ou nulo na eficiência de transporte. No entanto, é nessa região que a eficiência atinge o seu valor máximo, o qual depende da inclinação.

Adicionalmente, uma região com descarga sólida menor do que 10 g/min foi identificada. Nessa região não foi possível estabelecer uma relação clara com a declividade ou com a descarga sólida. No entanto, nessa região foram observados indícios da movimentação dos grãos que compunham o leito móvel.

Para a inclinação de 0,06 a eficiência máxima de transporte (zona assintótica) apresentou valor médio de 0,5 e para as inclinações de 0,003 e 0,00015 o valor resultou em 0,4. Dado que as inclinações possuem uma diferença de 20 vezes entre elas, esse resultado também mostra que a relação da eficiência máxima de transporte com a inclinação não é linear.

Complementarmente à eficiência de transporte foi analisada a relação das taxas de geração de depósito com as descargas sólidas. Concluiu-se que o volume médio de geração do depósito cresce linearmente com a descarga sólida e três ajustes foram realizados considerando as zonas previamente definidas.

Observou-se uma relação linear da eficiência de transporte na zona assintótica com o número de Froude densimétrico. No entanto, para as outras zonas não foi observada uma relação muito clara. Observou-se a relação da eficiência de transporte com o número de Reynolds, marcada pelas mesmas características da relação da eficiência de transporte com a descarga sólida. Essa relação sugere uma possível relação da zona assintótica com o estabelecimento da similaridade e da invariância do fenômeno observado na simulação em escala reduzida.

A relação da eficiência de transporte com os diâmetros característicos dos sedimentos transportados sugere que os fluxos mais eficientes têm maior competência para transportar grãos maiores, dada que a diminuição do diâmetro característico D_{90} foi sutilmente menor para os ensaios da zona assintótica na inclinação 0,06.

Também ressalta-se a dependência da eficiência de transporte com a distância entre as seções analisadas. As análises realizadas permitiram a obtenção de uma equação que estima a eficiência de transporte de acordo com a zona localizada e o comprimento

da seção em análise. No entanto, as mesmas características comportamentais das zonas só seriam observadas para comprimentos entre as seções de análise de 85 a 165 centímetros.

Por fim, conclui-se que a metodologia aplicada mostrou-se adequada e eficiente para as análises realizadas e para o cumprimento do propósito deste trabalho.

7 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Quanto às inclinações simuladas:

Recomenda-se a continuação dos experimentos para uma inclinação intermediária entre 6% e 0,3% afim de melhorar as tendências obtidas para a zona assintótica utilizando esse parâmetro. Ainda, pode-se usar uma inclinação negativa do canal, afim de melhor compreender o efeito da topografia na dinâmica dos fluxos de correntes de turbidez, dessa forma contribuindo também para estudos de preenchimento de minibacias por correntes de turbidez.

- Quanto aos diâmetros de grão utilizados:

Se recomenda a continuação dos experimentos com o uso outras faixas de diâmetros de grãos na composição do leito móvel. Dessa forma seria possível investigar o efeito do diâmetro do grão no fundo nos parâmetros sedimentológicos e das correntes de turbidez aqui apresentados.

Também recomenda-se a continuação dos experimentos com o uso de outras faixas de tamanho de grão na composição da mistura sedimentar. Dessa forma seria possível investigar mais profundamente o efeito do diâmetro do grão presente na mistura sedimentar nos parâmetros sedimentológicos e das correntes de turbidez aqui apresentados.

- Quanto à concentração volumétrica da mistura injetada:

Recomenda-se a continuação dos experimentos utilizando maiores concentrações afim de prever o comportamento das tendências aqui apresentas para maiores descargas sólidas, já que é de conhecimento que com o acréscimo da concentração ocorre a mudança do mecanismo de suporte de grãos e de regime reológico.

- Quanto ao tipo de sedimento utilizado na mistura sedimentar:

Recomenda-se a continuação dos experimentos utilizando composições de sedimentos não coesivos e coesivos na mistura sedimentar, já que a coesividade pode alterar o comportamento das correntes de turbidez.

- Quanto à escala experimental e à extrapolação dos resultados:

Recomenda-se a repetição dos experimentos em uma escala maior, afim de avaliar a existência ou não dos efeitos de escala e como os resultados aqui apresentados poderiam ser extrapolados para o ambiente natural.

- Quanto ao aparato experimental utilizado:

Recomenda-se a utilização de medidores de concentração e de velocidade em duas seções transversais do fluxo, de forma a permitir o levantamento de dados ao longo do tempo, de forma automatizada e com maior precisão. Recomenda-se também uma instalação experimental com uma cuba de dissipação maior na saída, prolongando o tempo de saturação da cuba e/ou possibilitando a simulação de maiores concentrações.

8 BIBLIOGRAFIA

- Akiyama, J., & Stefan, H. G. (April de 1984). Plunging Flow into a Reservoir: Theory. *Journal of Hydraulic Engineering*, 4, 484-499.
- 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.
- Bagnold, R. A. (1966). An approach to the sediment transport problem from general physics. *U. S. Geol. Survey*, Prof. Paper 422-p.37.
- Boffo, C. H. *et al.* (2014). Ultrasound video interpretation of transport and deposition of sediment gravity flows. *Abstract Book of International Sedimentological Congress*, 18-22 Aug. 2014: Geneva Switzerland.
- Boffo, C. H. *et al.* (2017). Complementary results on experiment-derived classification of submarine sediment gravity flows. *Annual Convention and Exhibition (2017 AAPG: 2017 abr. 2-5: Houston, Texas)*.
- Bordas, M. P.; Borges, A. L. de O.; Medeiros, P. (1988). Puissance hydraulique et dépôt de sédiments em eaux courantes. *Sediment Budgets (Proceedings of the Porto alegre Symposium)*. IAHS Publ. no. 174.
- Bouma, A. H. (1962). *Sedimentology of some flysch deposits: a graphic approach to facies interpretation*. Amsterdam: Elsevier.
- Buffon, P. (2014). Trabalho de conclusão de curso de graduação: *Modelagem física de uma região do fundo oceânico para o entendimento dos padrões de preenchimento de minibacias por correntes de densidade*. Porto Alegre: IPH/UFRGS.
- Camila, C. (2016). Dissertação de Mestrado: *Propriedades reológicas de misturas utilizadas em simulação física de correntes de turbidez*. Porto Alegre: IPH/UFRGS.

Cauduro, F. A.; Dorfman, R. (s. d.). *Manual de ensaios de laboratório e de campo para irrigação e drenagem*. Porto Alegre, IPH/UFRGS.

Chamoun, S.; de Cesare, G.; Schleiss, A. Management of Turbidity Current Venting in Reservoirs under Different Bed Slopes. *Journal of Environmental Management*, v.204, p.519-530, 2017.

Chien, N.; Wan, Z. (1999). *Mechanics of sediment transport*. American Society of Civil Engineers (ASCE Press).

Gyr, A.; Hoyer, K. (2006). *Sediment Transport – A Geophysical Phenomenon*. The Netherlands: Springer.

Heller, V. (2017). Self-similarity and Reynolds number invariance in Froude modelling, *Journal of Hydraulic Research*, 55:3, 293-309.

Hiscott, R. N. (1994). Loss of capacity, not competence, as the fundamental process governing deposition from turbidity currents. *Journal of Sedimentary Research*, Vol. A64, No.2, 209-214.

Hsü, K. J. (2004). *Physics of Sedimentology*. Berlin; New York: Springer.

Komar, P. D. (1985). The hydraulic interpretation of turbidites from their grain sizes and sedimentary structures. *Sedimentology* (32), 395-407.

Kneller, B.; Buckee, C. (2000). The structure and fluid mechanics of turbidity currents: a review of some recent studies and their geological implications. *Sedimentology*, 47 (Suppl.1), 62-94.

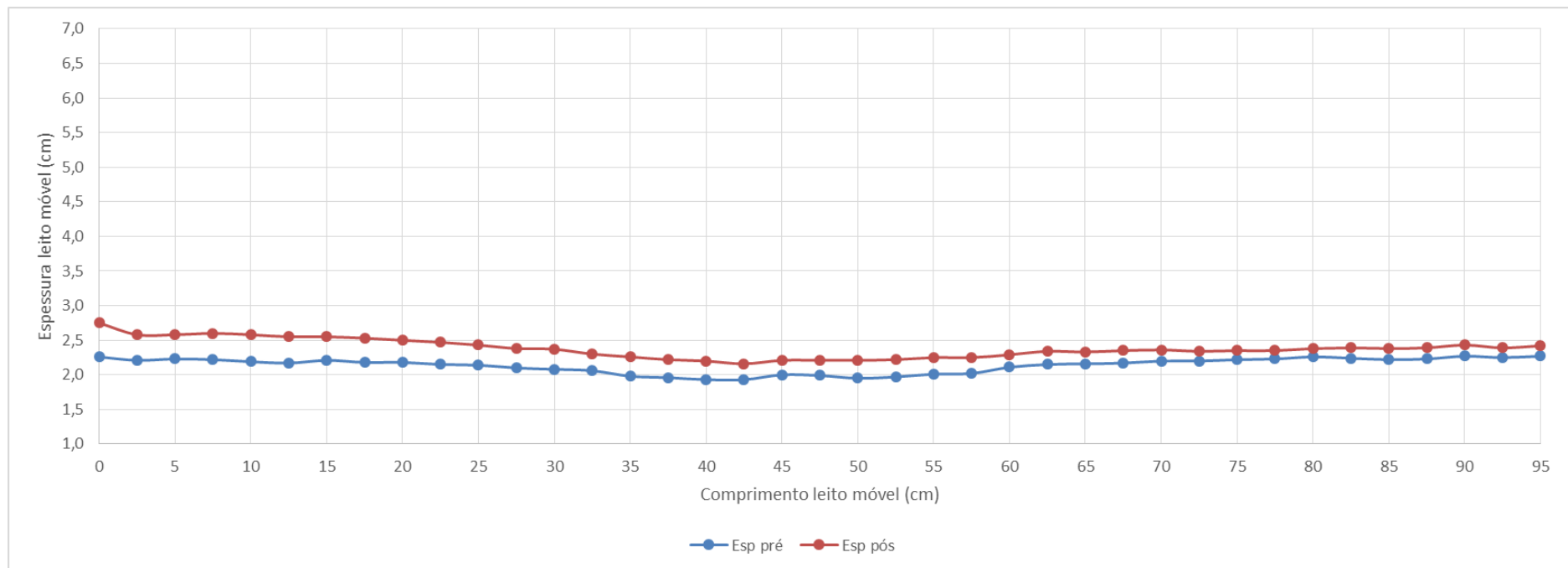
Kuenen, H.; Sengupta, S. (1970). Experimental marine suspension currents, competency and capacity. *Geologie en Mijnbouw*, Volume 49(2), 89-118.

- Leeder, M. R. (1999). *Sedimentology and Sedimentary Basins: From turbulence to Tectonics*.
- Manica, R. (2009). Tese de Doutorado: *Geração de correntes de turbidez de alta densidade: condicionantes hidráulicos e deposicionais*. Porto Alegre: IPH/UFRGS.
- Michon, X.; Goddet, J.; Bonnefille, R. (1955). *Etude theorique et experimentale des courants de densite* – TOME I. Chatou, Laboratoire National d'Hydraulique.
- Middleton, G. V. (1966). Small-Scale Models of turbidity currents and the criterion for auto-suspension. *Journal of Sedimentary Petrology*, Vol. 36, No. 1, 202-208.
- Middleton, G. V., & Hampton, M. A. (1973). Subaqueous Sediment Transport and Deposition by Sediment Gravity Flows. Em *G. V. Middleton, M. A. Hampton, & A. H. Bouma, Turbidites and Deep Water Sedimentation* (pp. 1-38). Anaheim: Soc. Econ. Paleontol. Mineral, Pac. Sect, Short Course.
- Morris, G. L., & Fan, J. (1992). Reservoir Sedimentation. II: Reservoir Desiltation and Long-term Storage Capacity. *Journal of Hydraulic Engineering*, pp. 118(3): 370-384.
- Mulder, T. e Alexander, J. (2001). *The physical character of subaqueous sedimentary density flows and their deposits*. *Sedimentology*, v. 48, 269-299.
- NASA's Earth Observatory. (2009). Acesso em 2 de novembro de 2015, disponível em <http://earthobservatory.nasa.gov>.
- Parsons, J.; García, M. H. (1998). Similarity of gravity current fronts. *Physics of Fluids*: volume 10, number 12.
- Parker, G., Fukushima, Y., & Yu, W. (1987). Experiments on turbidity currents over an erodible bed. *Journal of Hydraulic Research*, Vol 25, No. 1, 123-147.

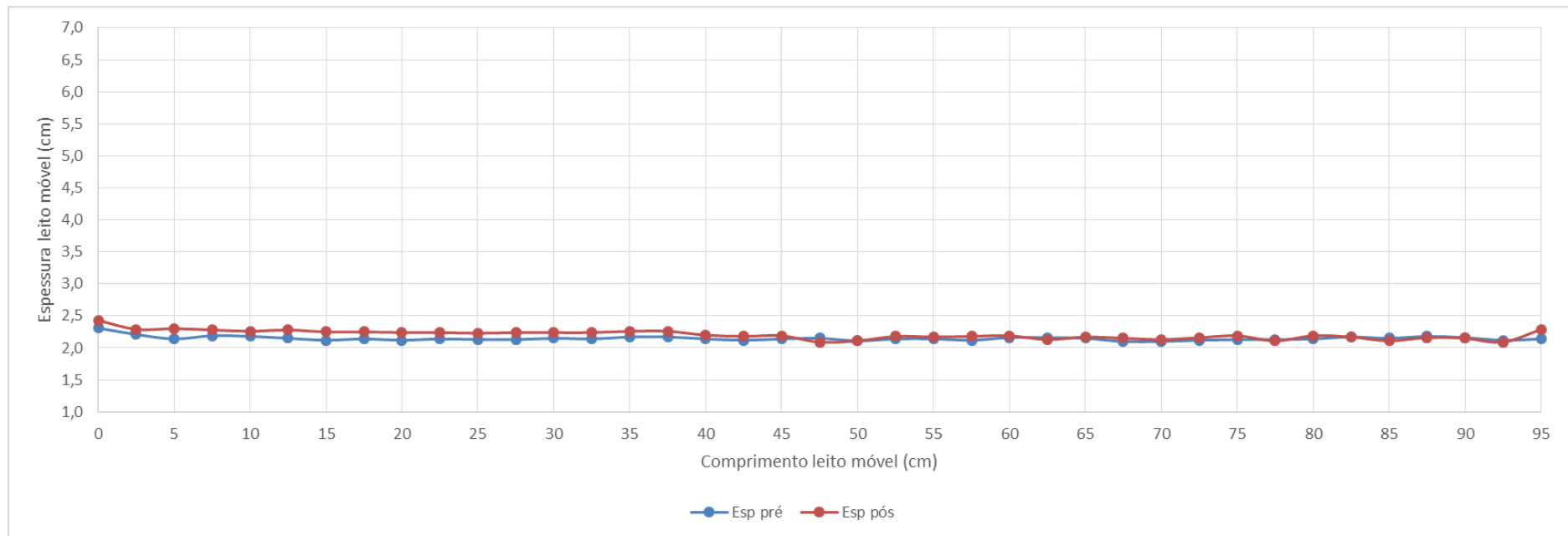
- Piper, D. J., & Nomark, W. R. (2009). *Process that initiate turbidity currents and their influence on turbidites: a Marine Geology perspective*. *Journal of Sedimentary Research*, pp. v. 79, 347-362.
- Rouse, H. (1937). Modern conceptions of the mechanics of fluid turbulence. *Transactions ASCE* Vol. 102.
- Sequeiros, O. (2012). Estimating turbidity current conditions from channel morphology: A Froude number approach. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 117, C04003.
- Sentürk, F. (1994). *Hydraulics of dams and reservoirs*. Colorado: Water Resources Publications.
- Sha, Y. (1965). *Introduction of sediment Movement*. China Industrial Press, pp.302 (in Chinese).
- Shields, A. (1936). Application of similarity principles and turbulence research to bed-load movement. *Hydrodynamics Laboratory, Publication 167*.
- Simpson, J. E. (1997). *Gravity Currents in the environment and the laboratory* - 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press.
- Streeter, V. L. (1961) *Handbook of fluid dynamics*. First edition. New York: McGraw-Hill Book Company, INC.
- Talling, P. J. *et al.* (2015). Key future directions for research on turbidity currents and their deposits. *Journal of Sedimentary Research*, v. 58, 153-169.
- van Rijn, L. C. (1984). Sediment Transport, Part II: Suspended Load Transport. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 110, 1613-1641.

ANEXO I – Perfis longitudinais no trecho do leito móvel

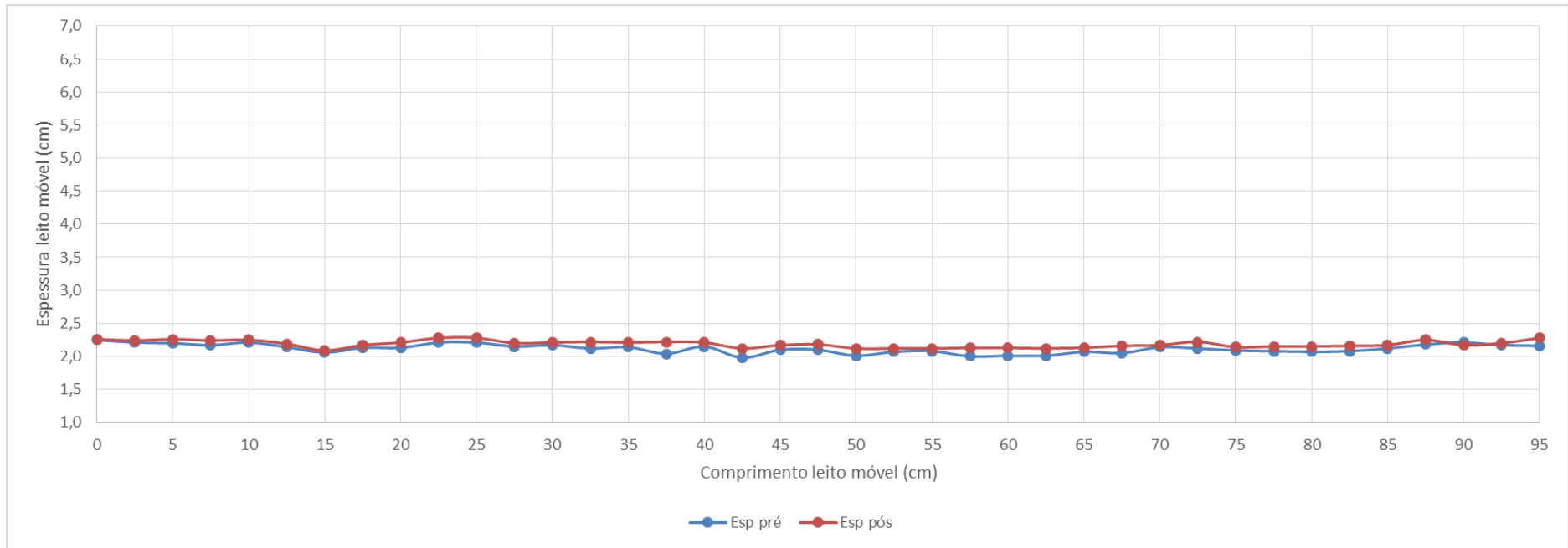
EO2



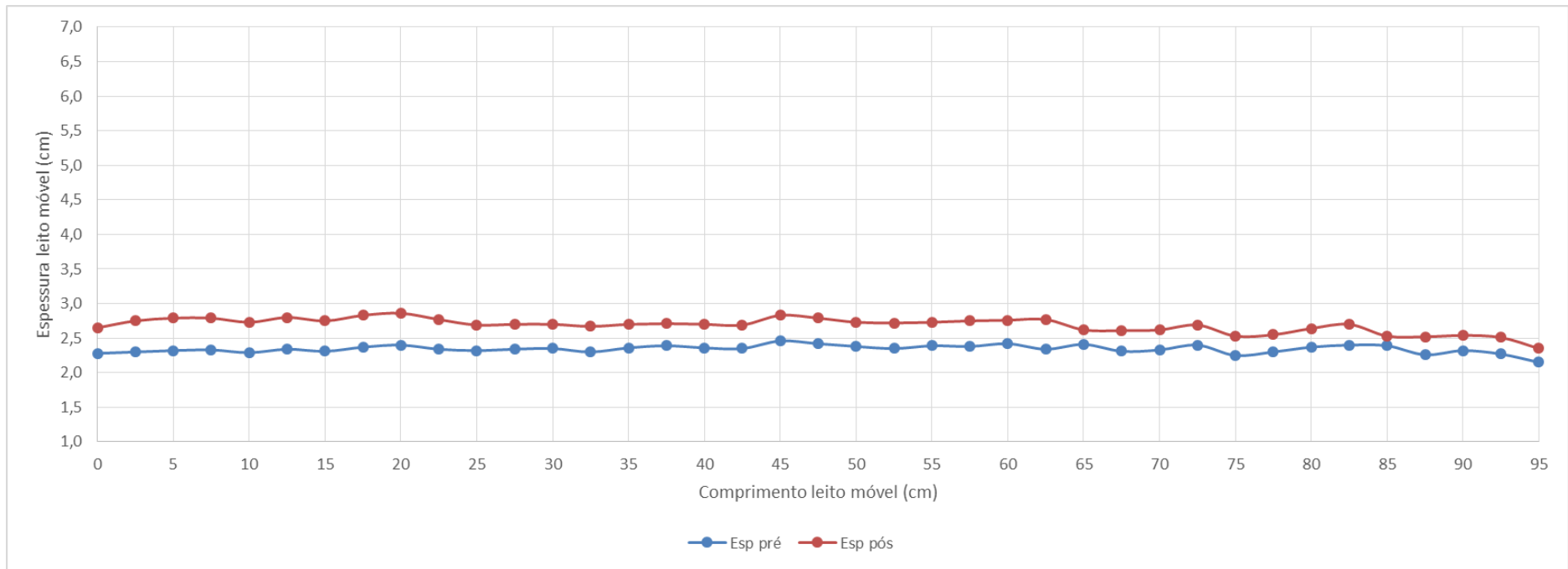
EO3



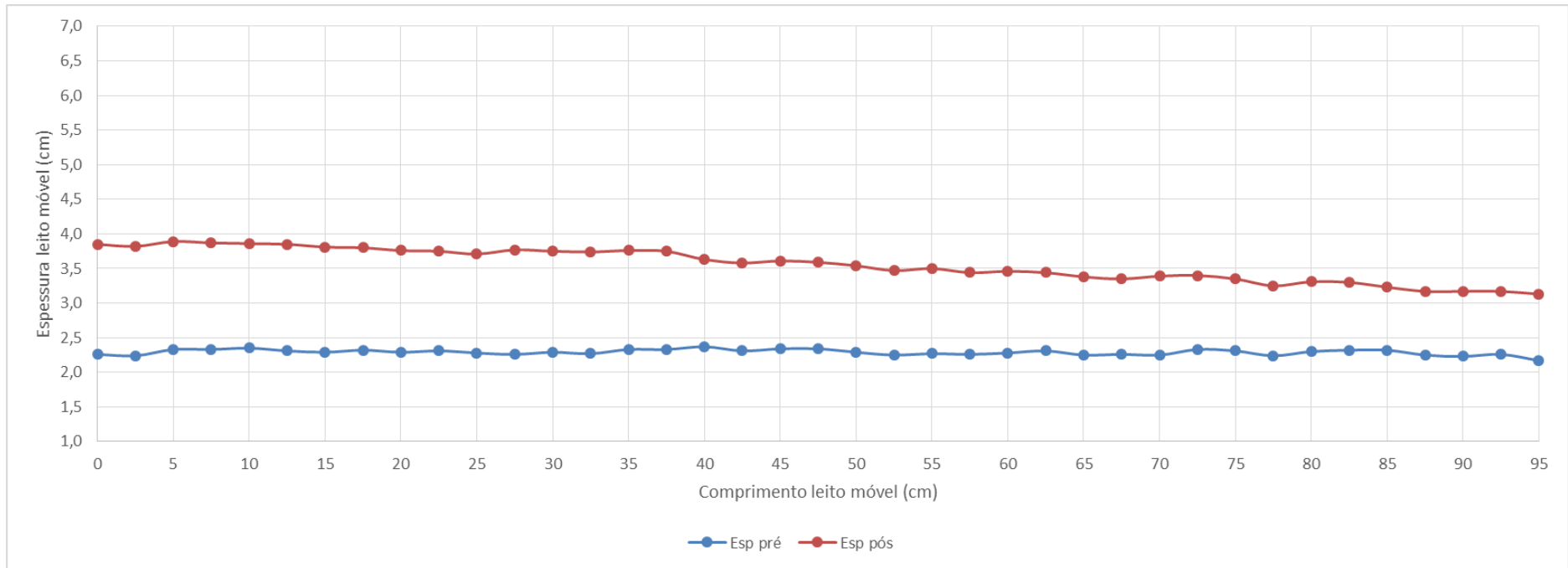
EO4



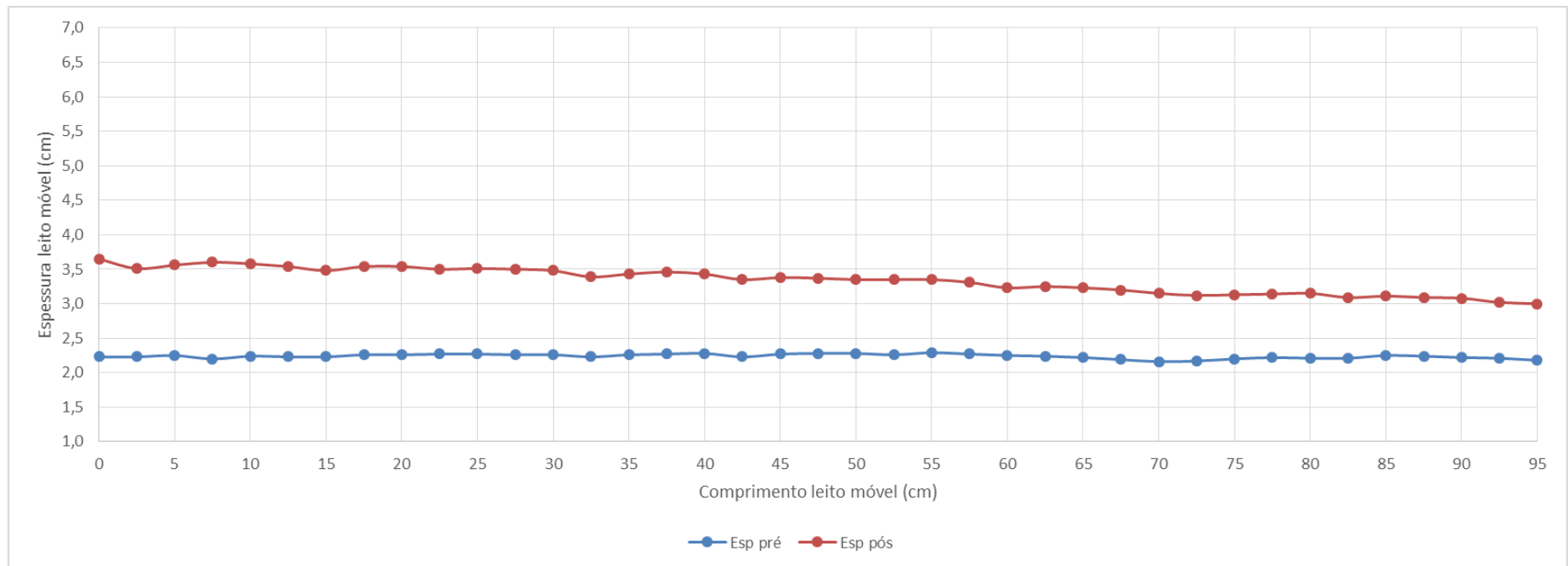
EO10



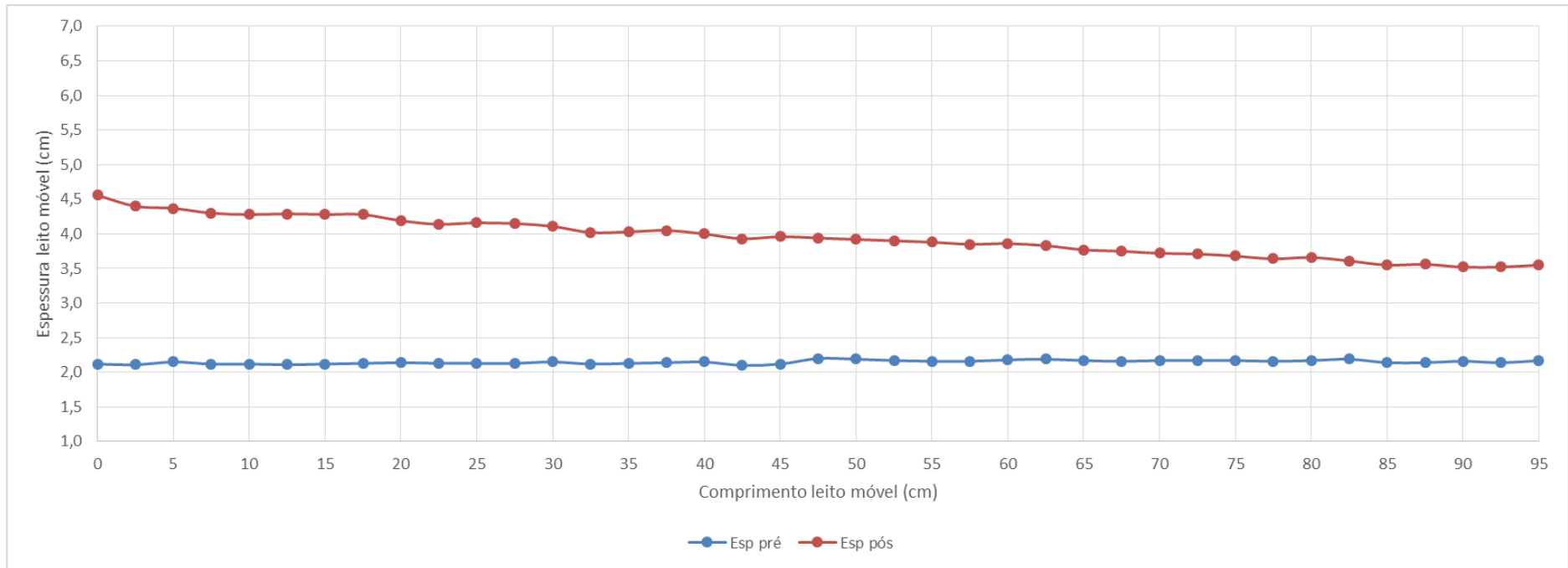
EO11



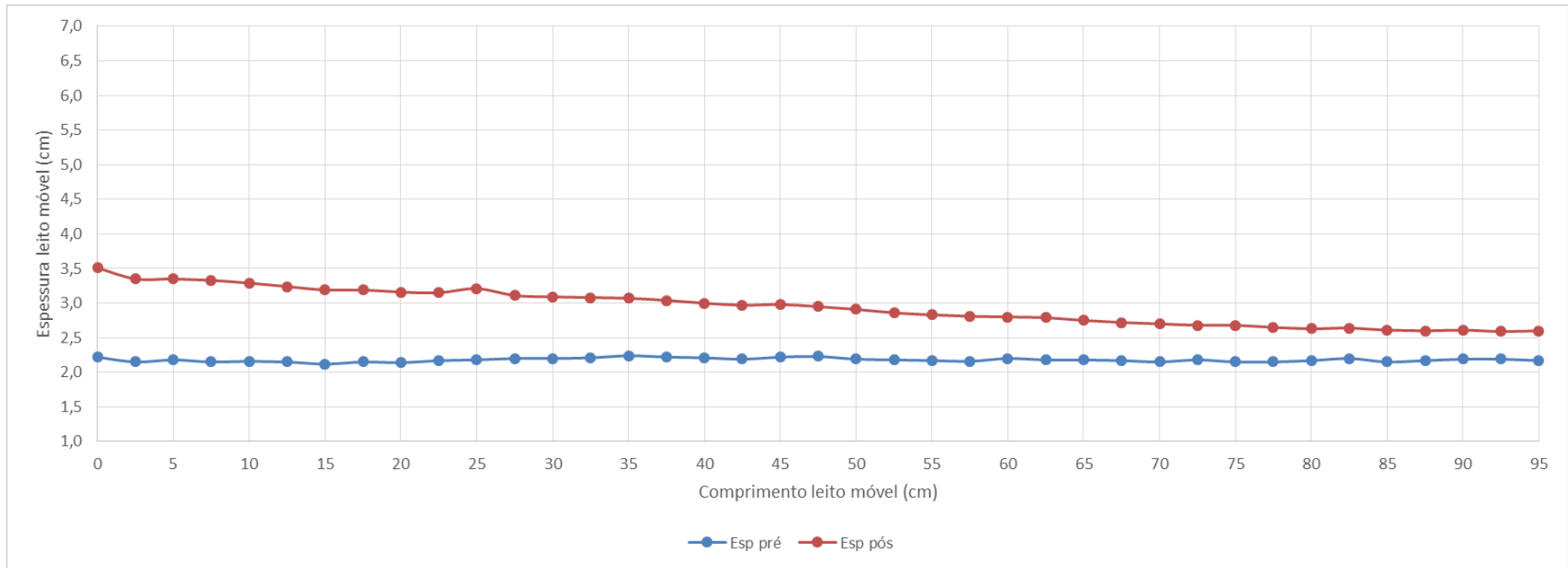
EO12



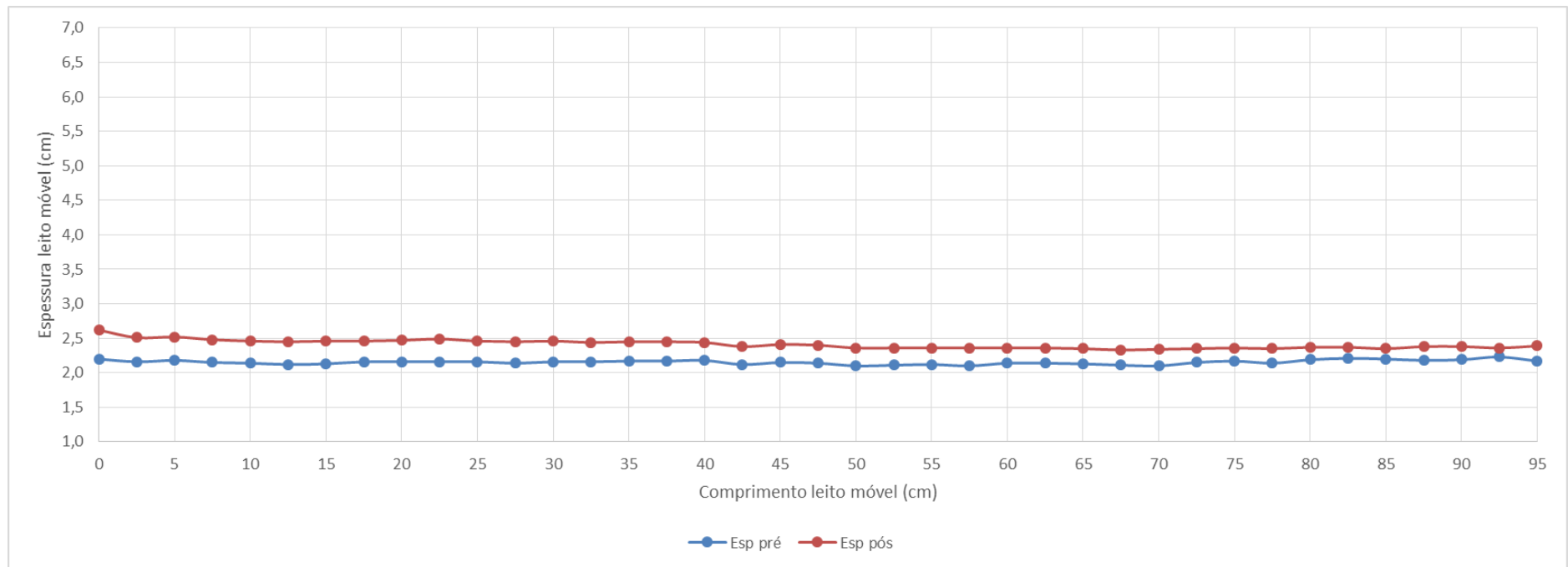
EO13



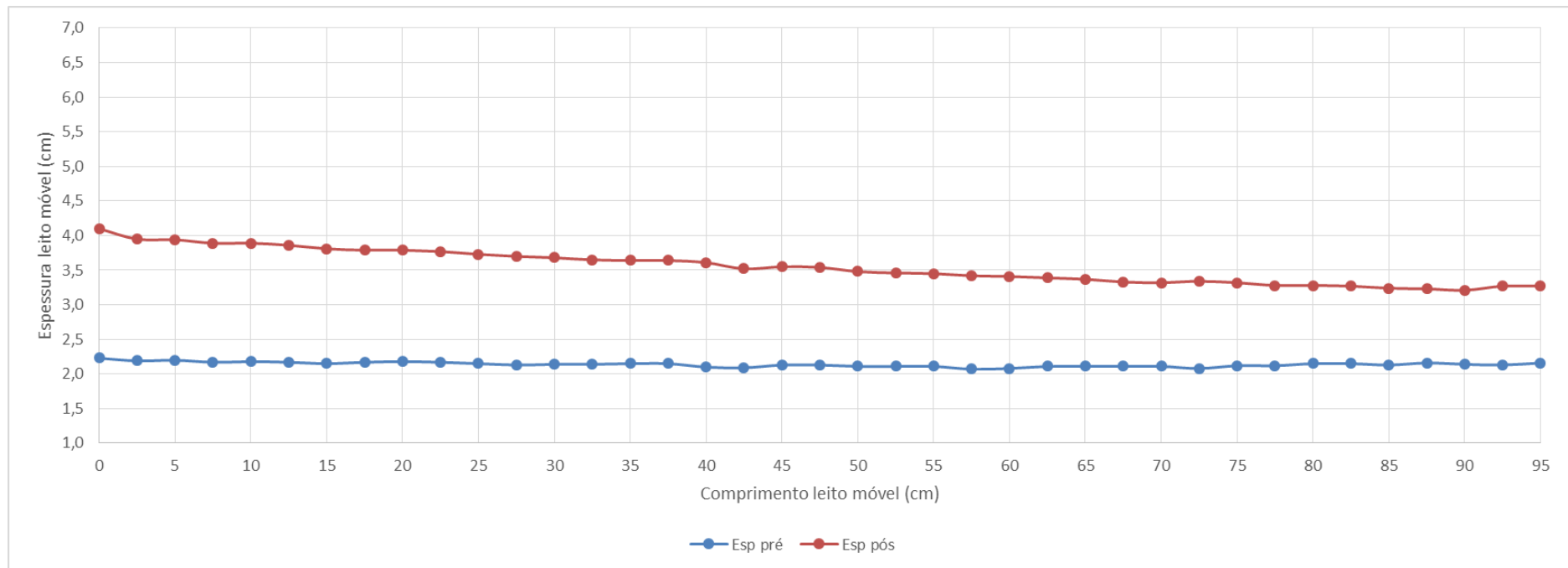
EO14



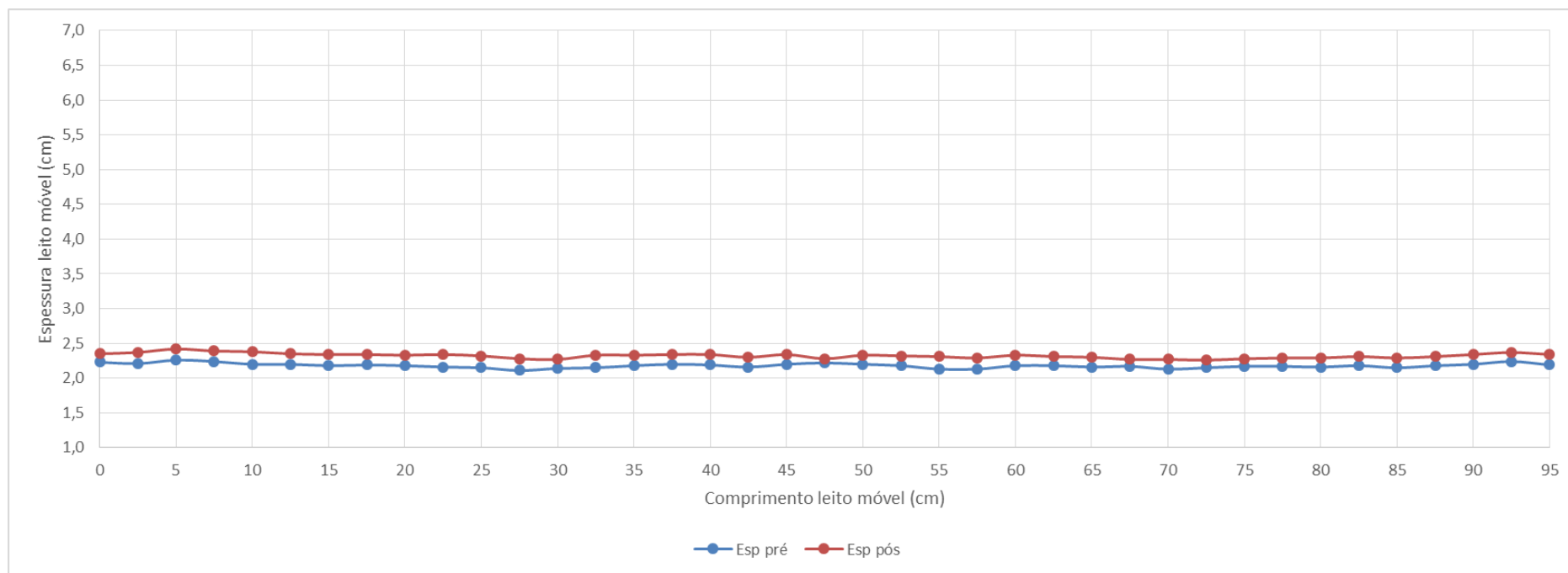
EO15



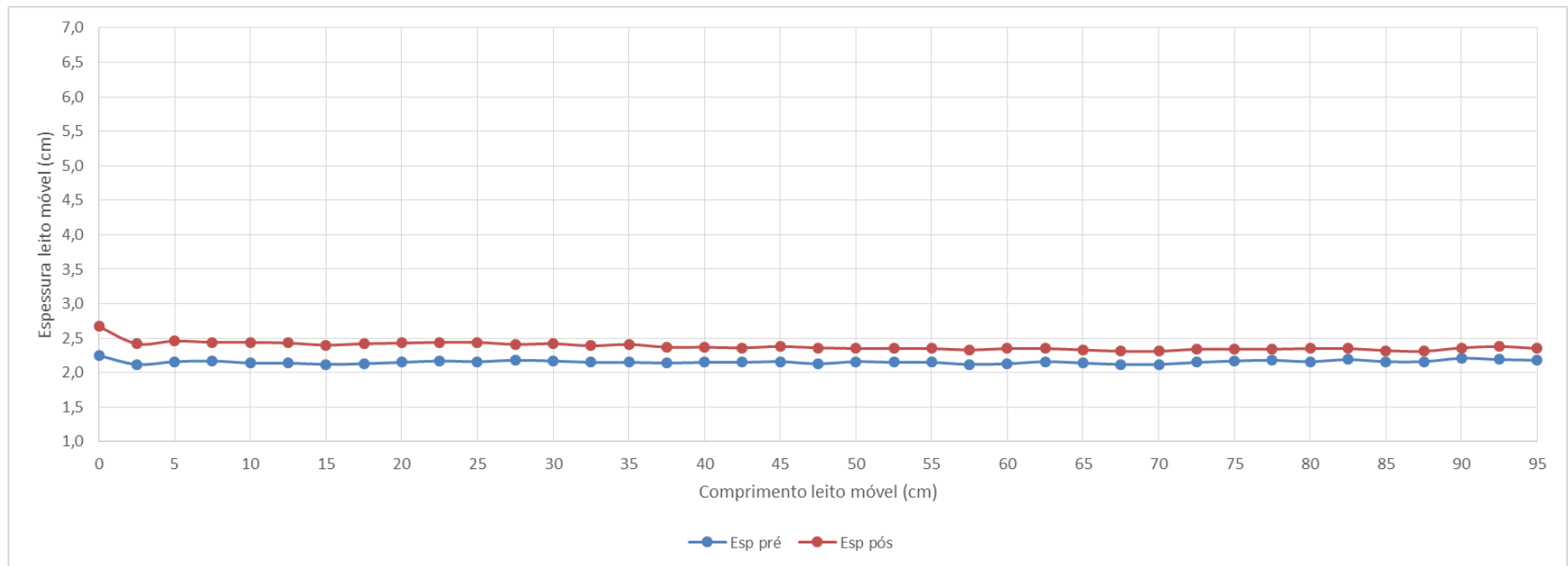
EO16



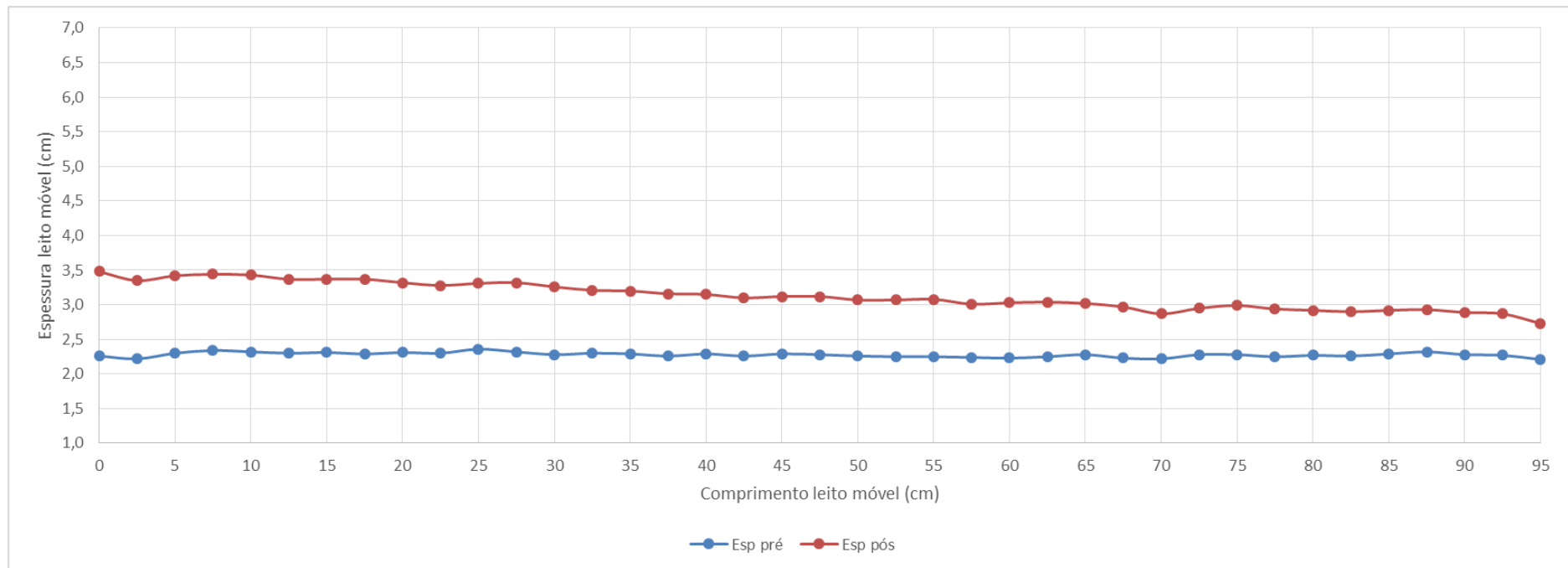
EO17



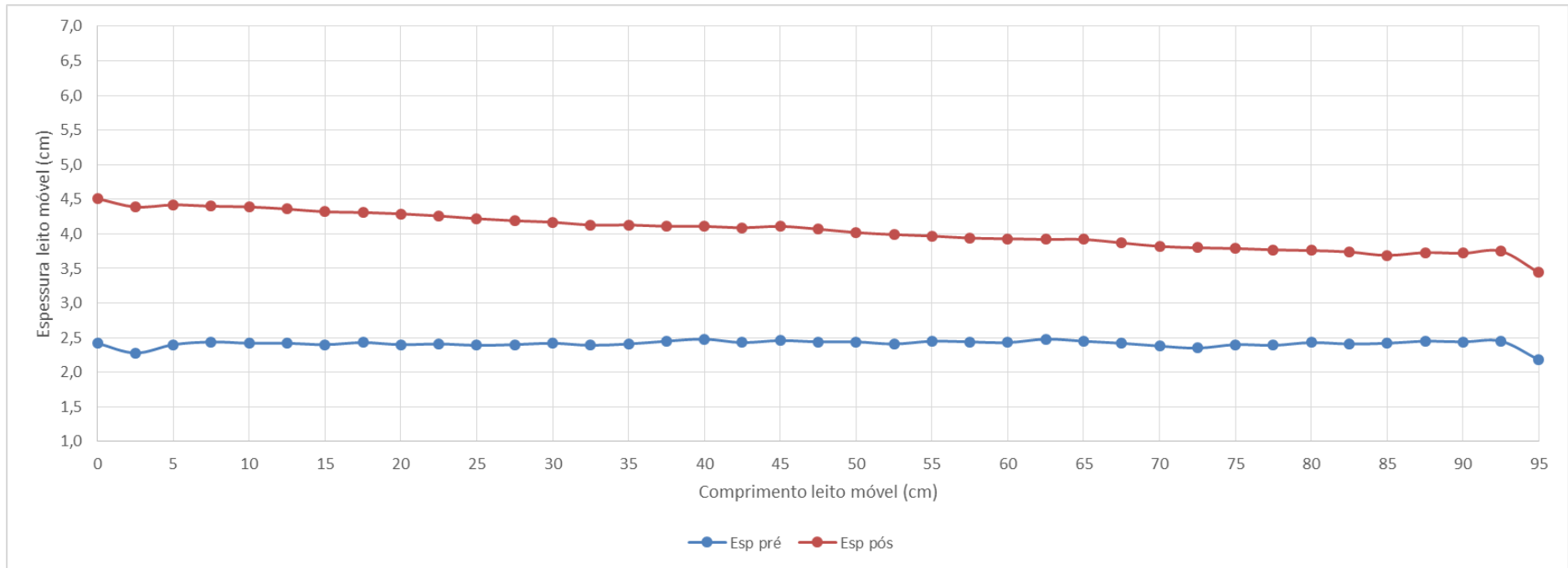
EO19



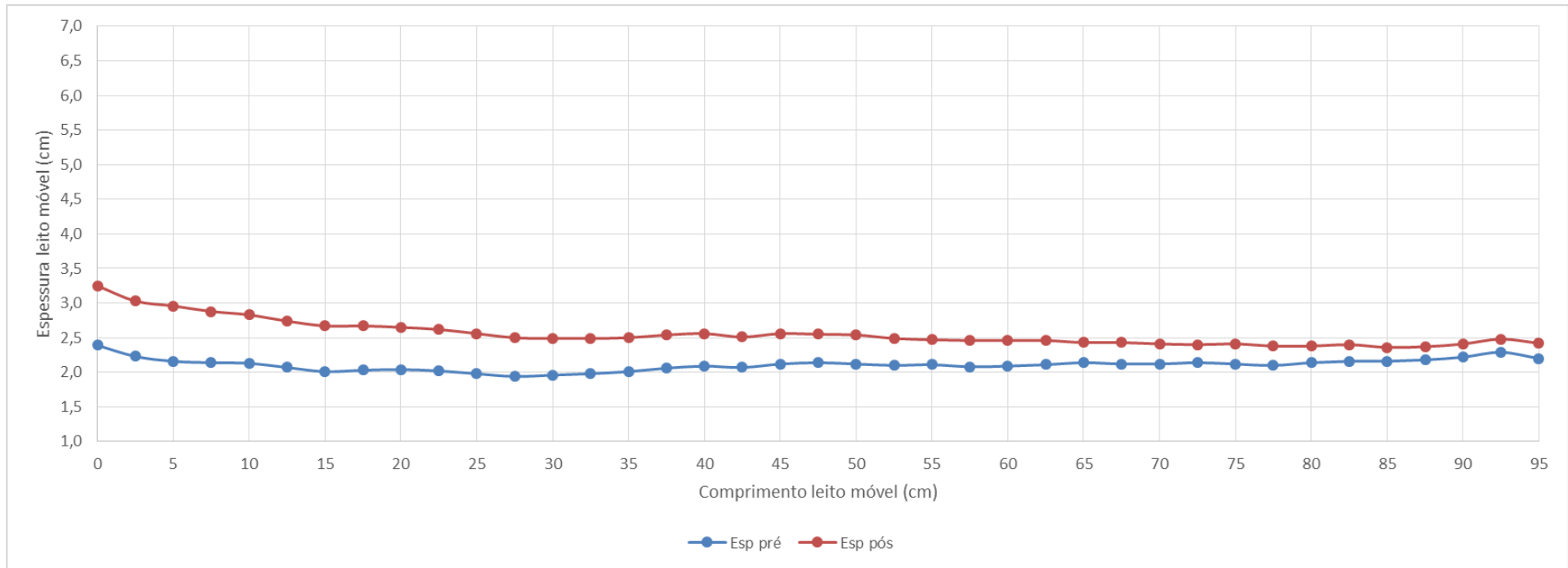
EO20



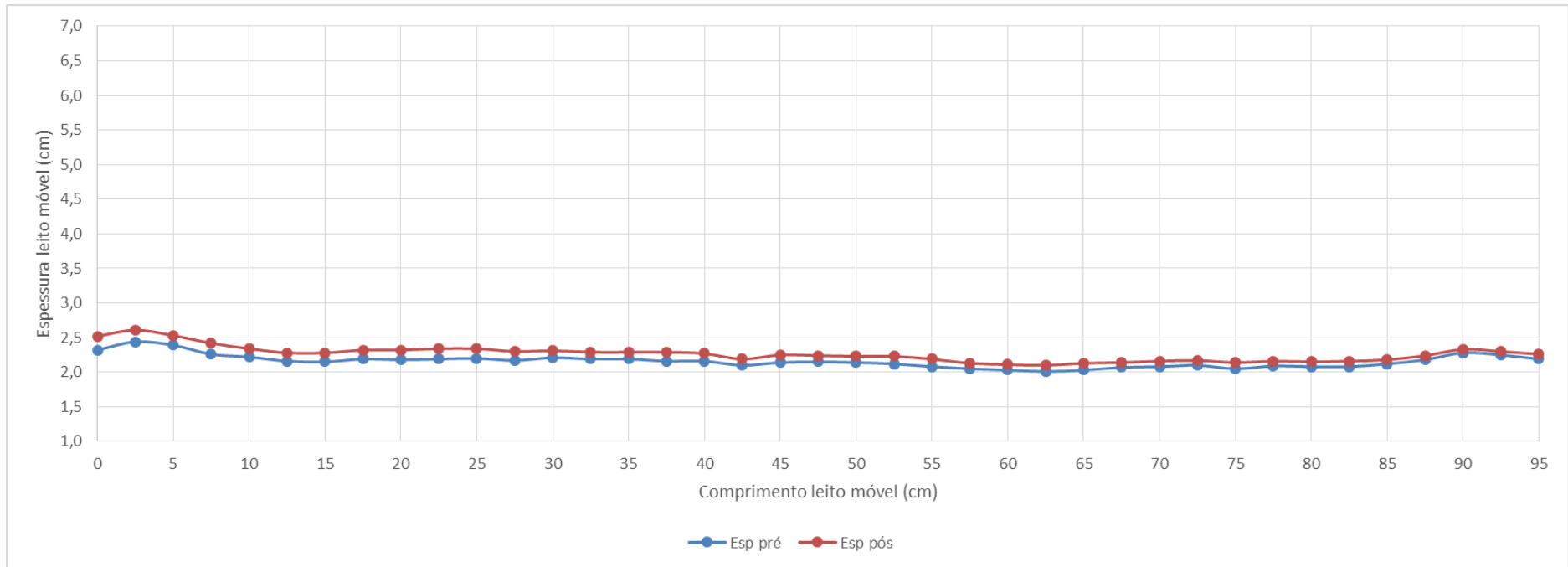
EO21



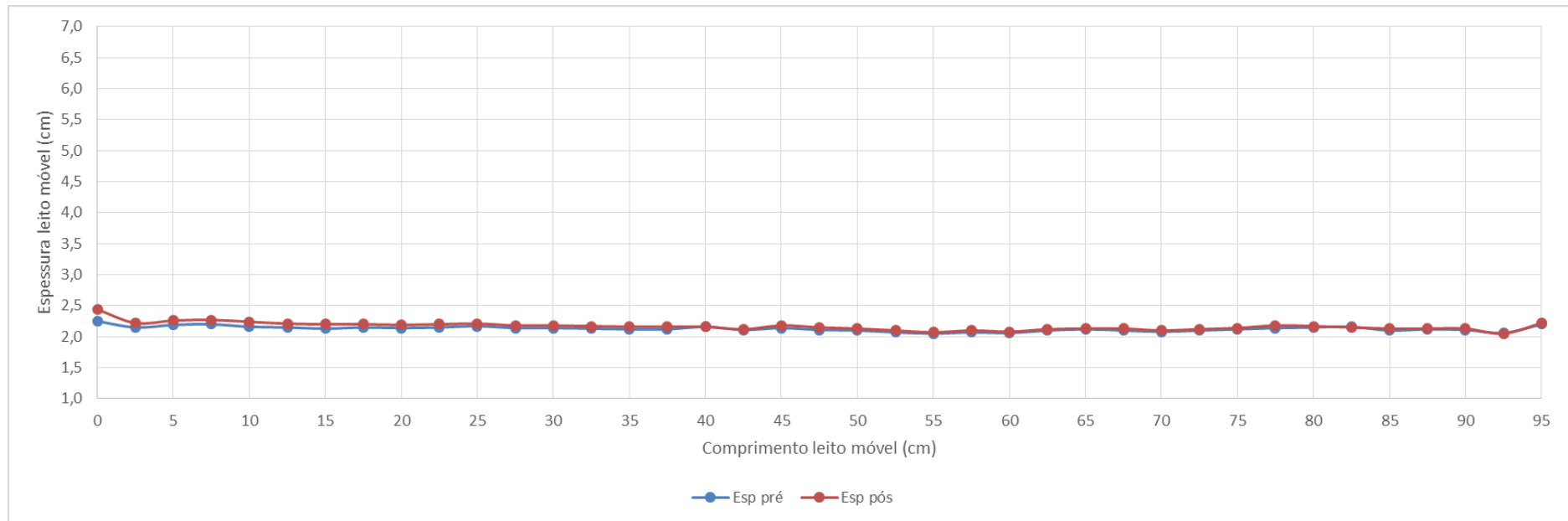
EO22



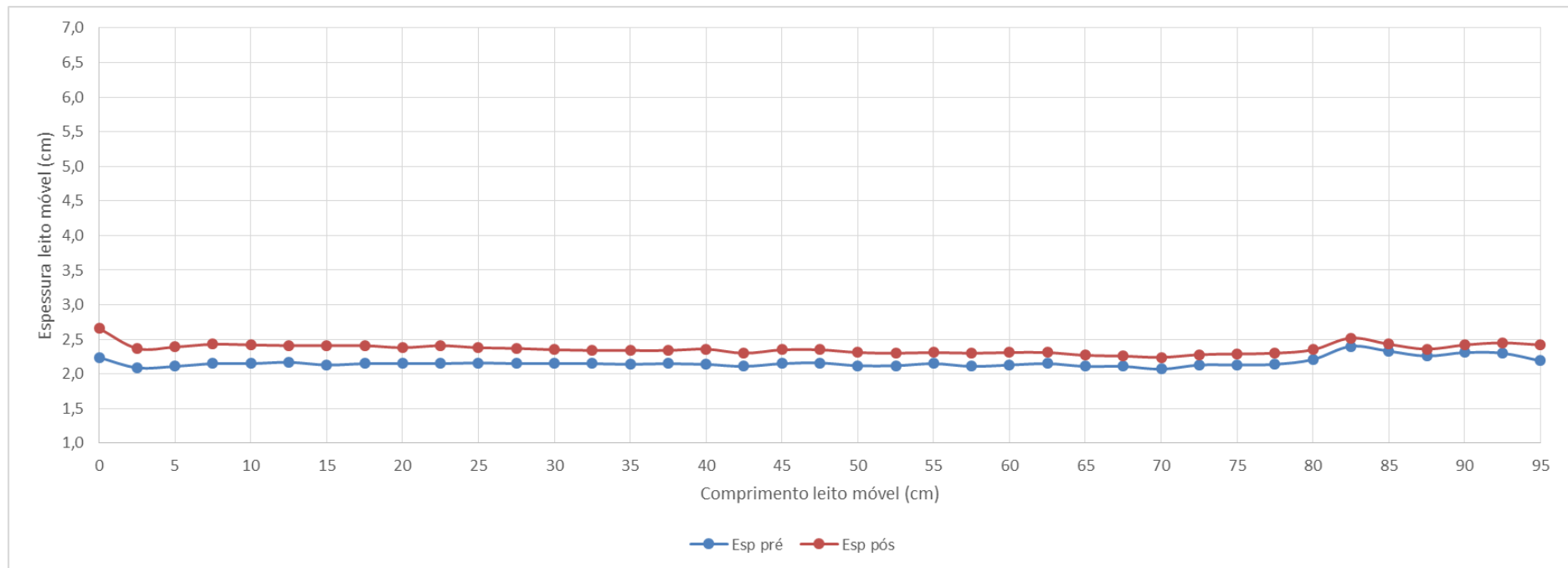
EO23



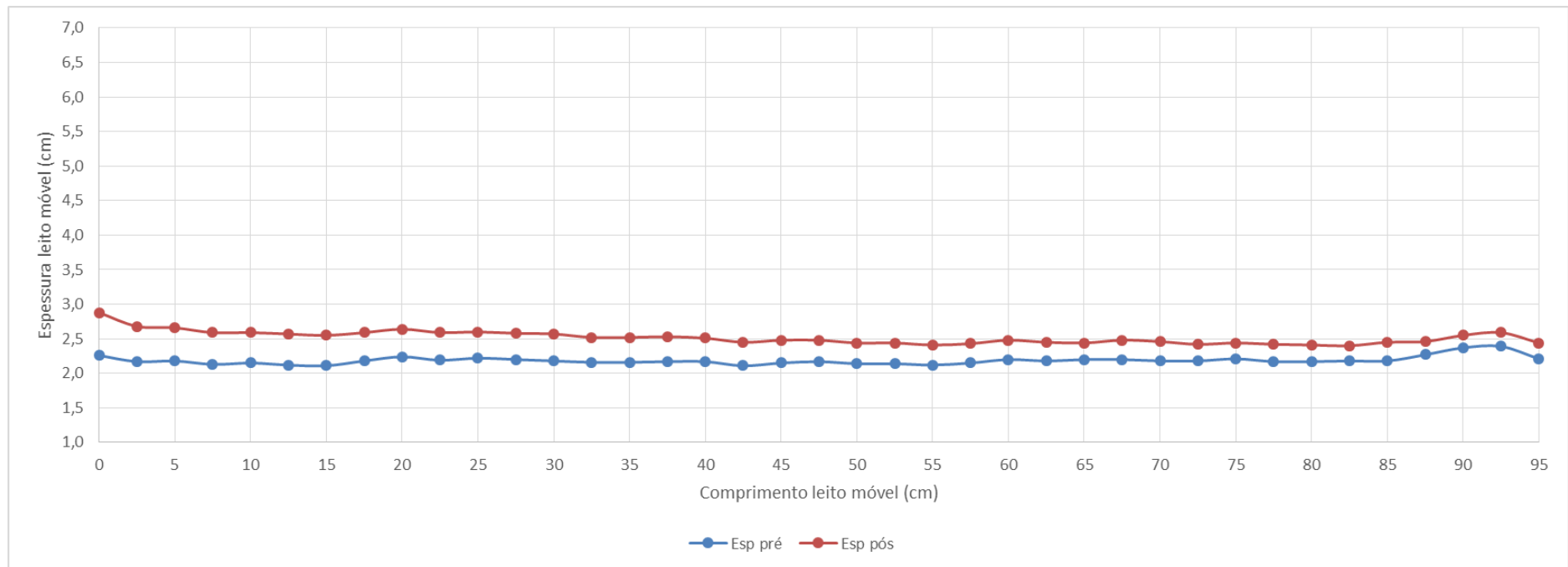
EO24



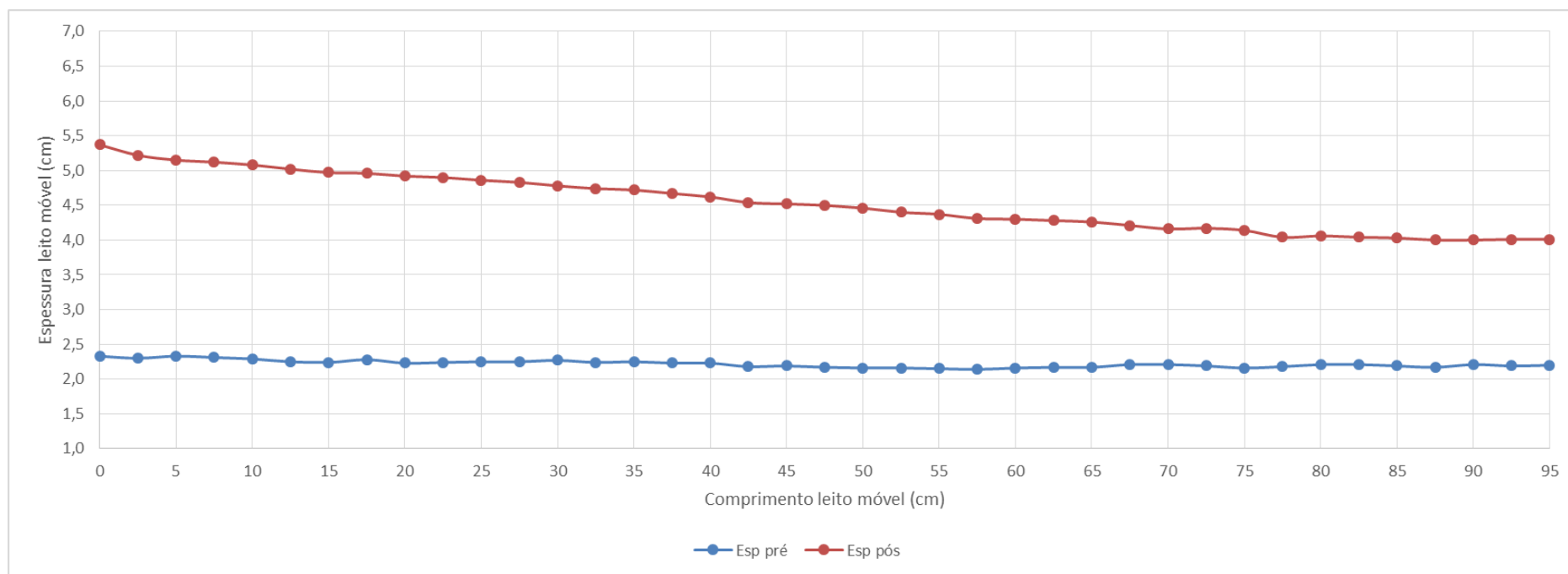
EO25



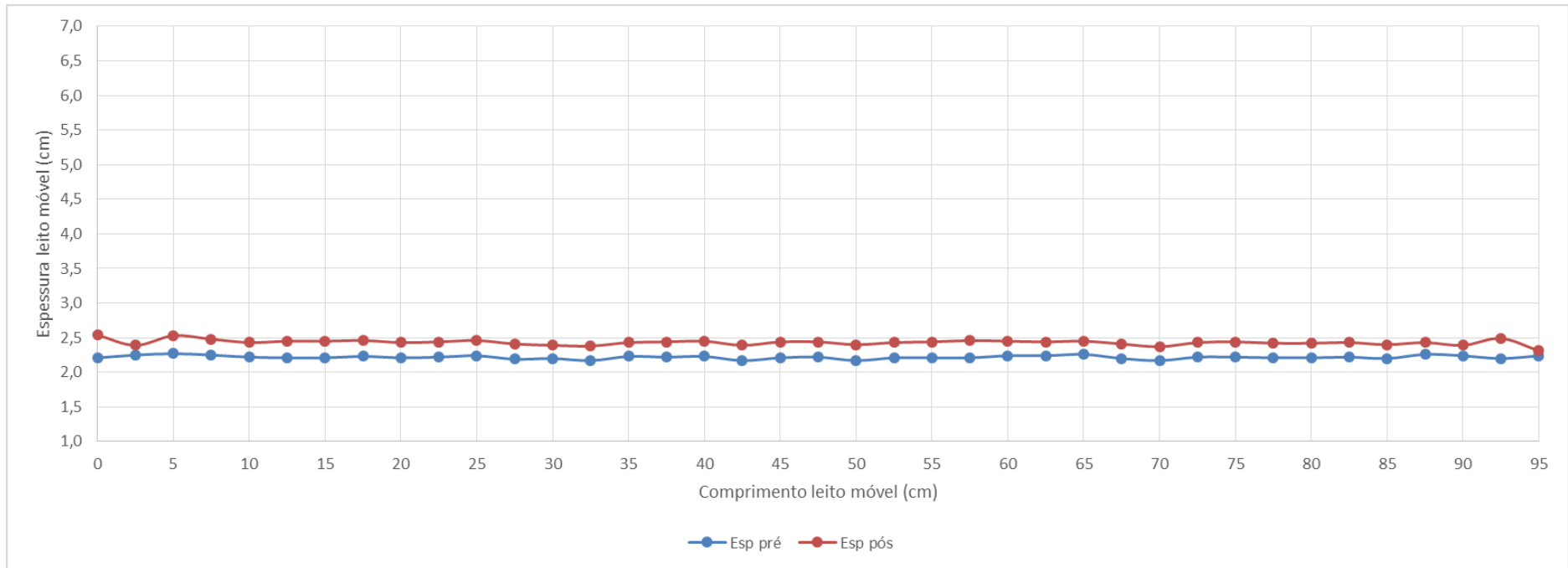
EO26



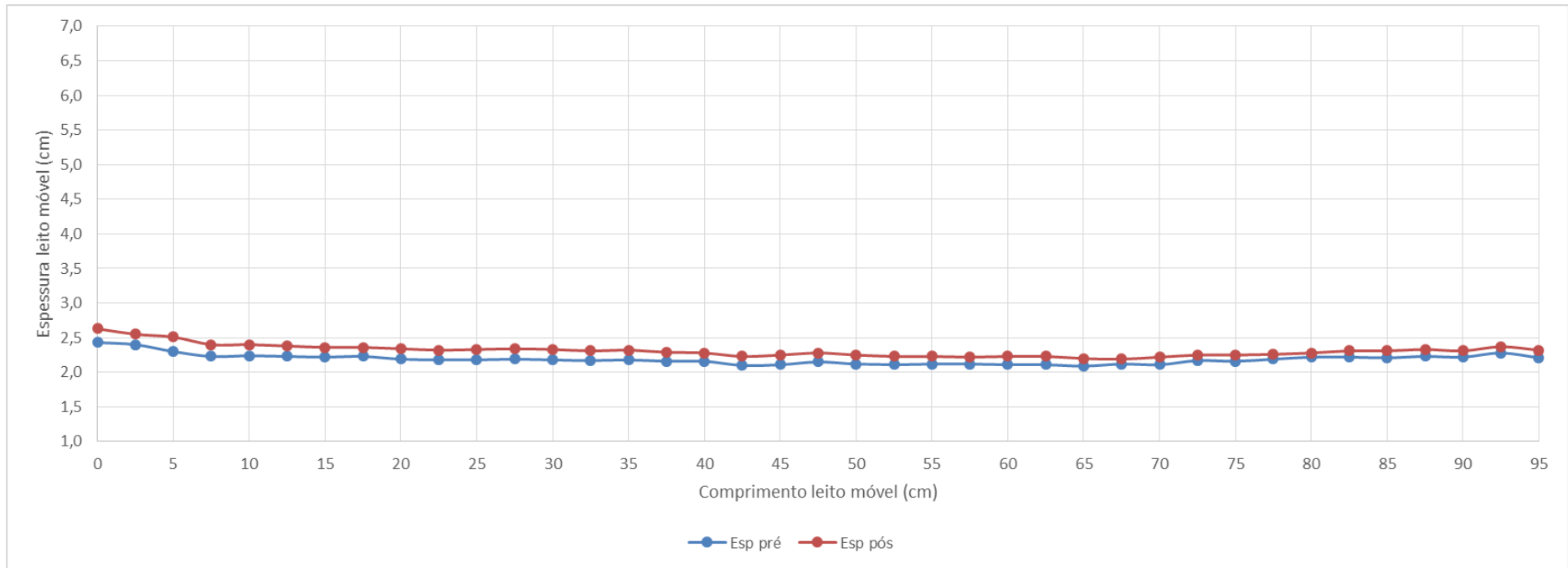
EO27



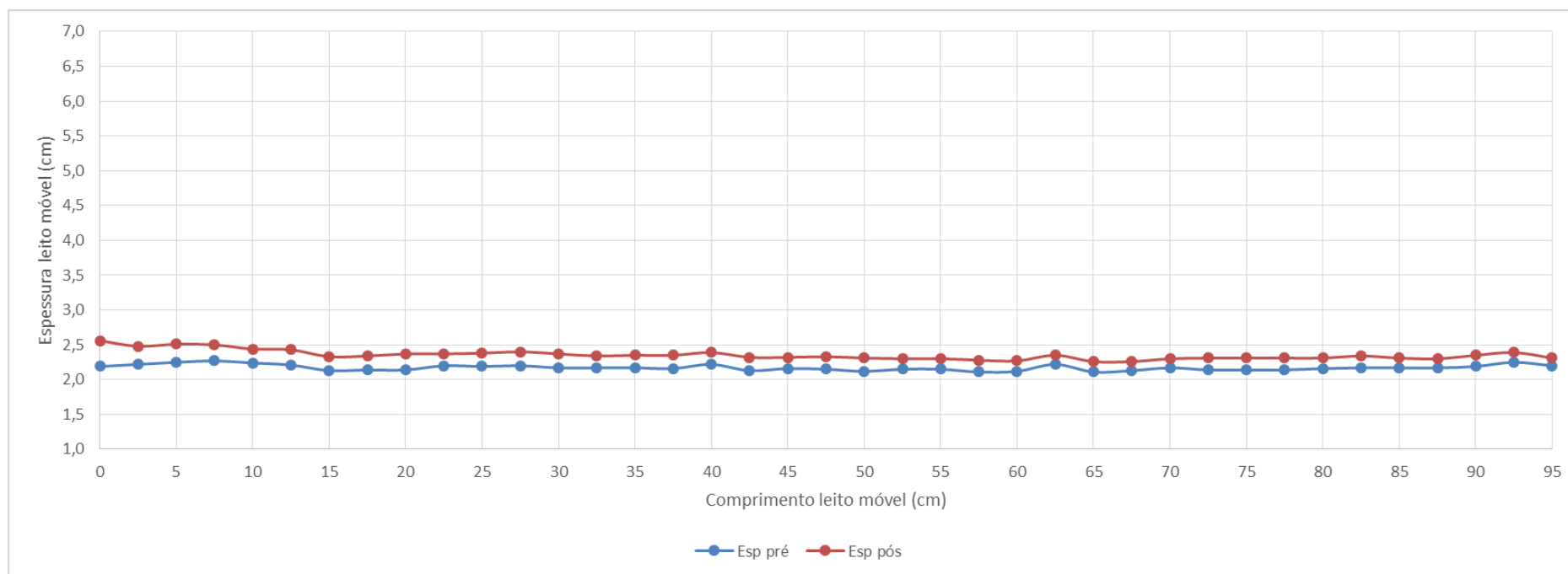
EO28



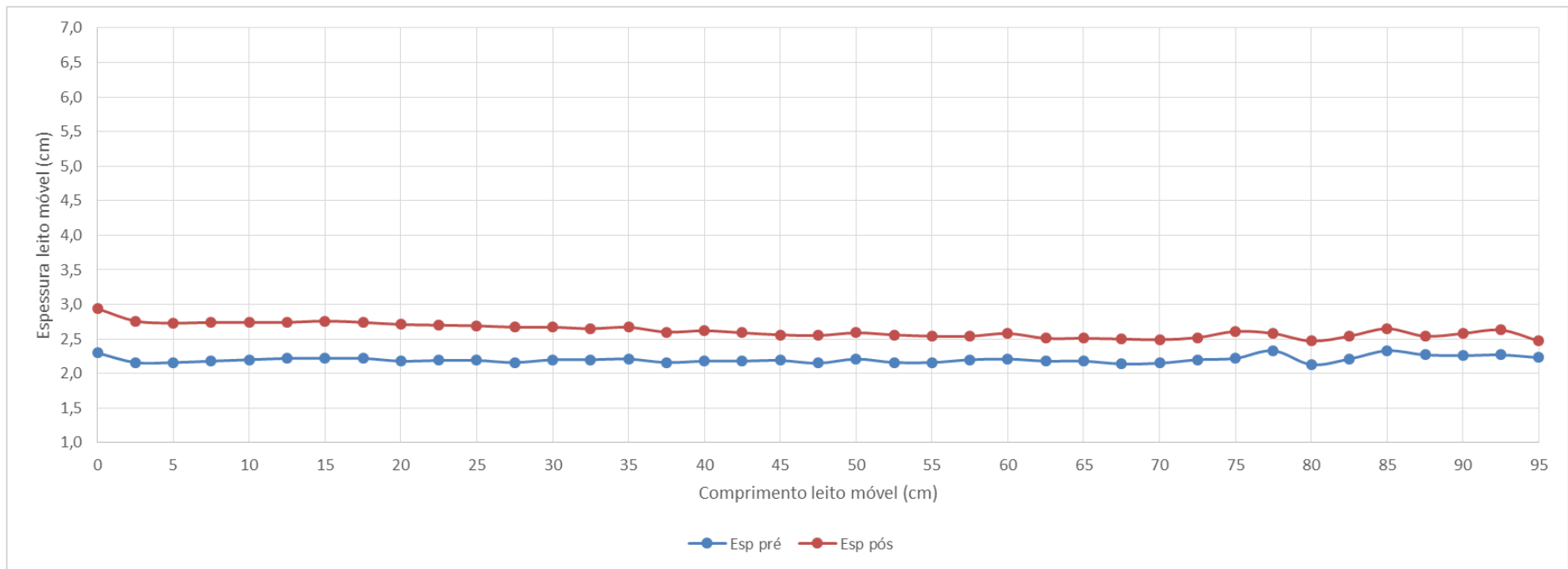
EO29



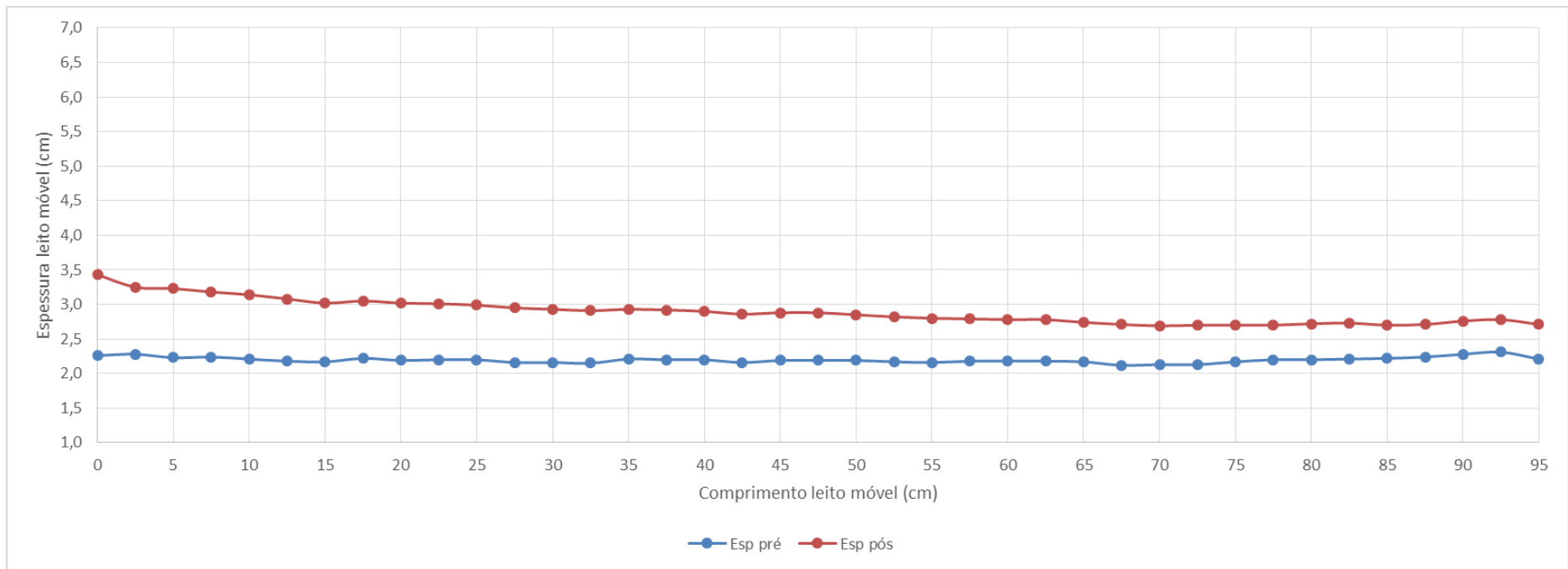
EO30



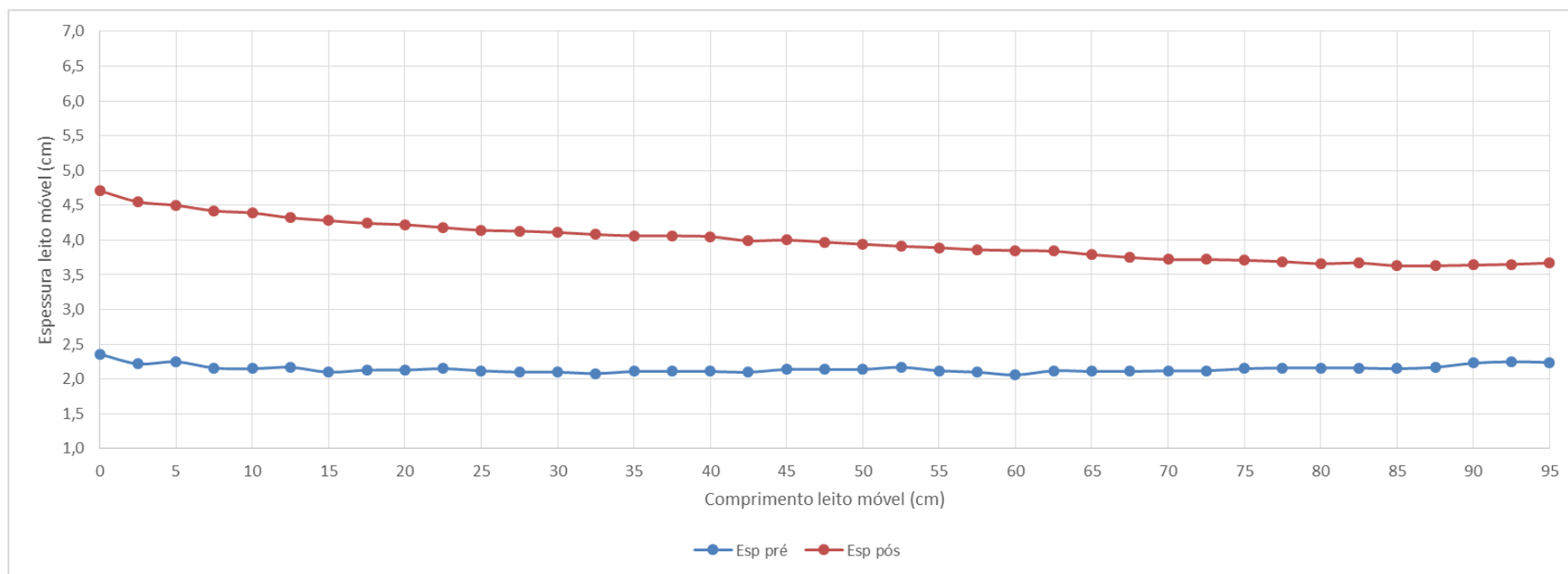
EO31



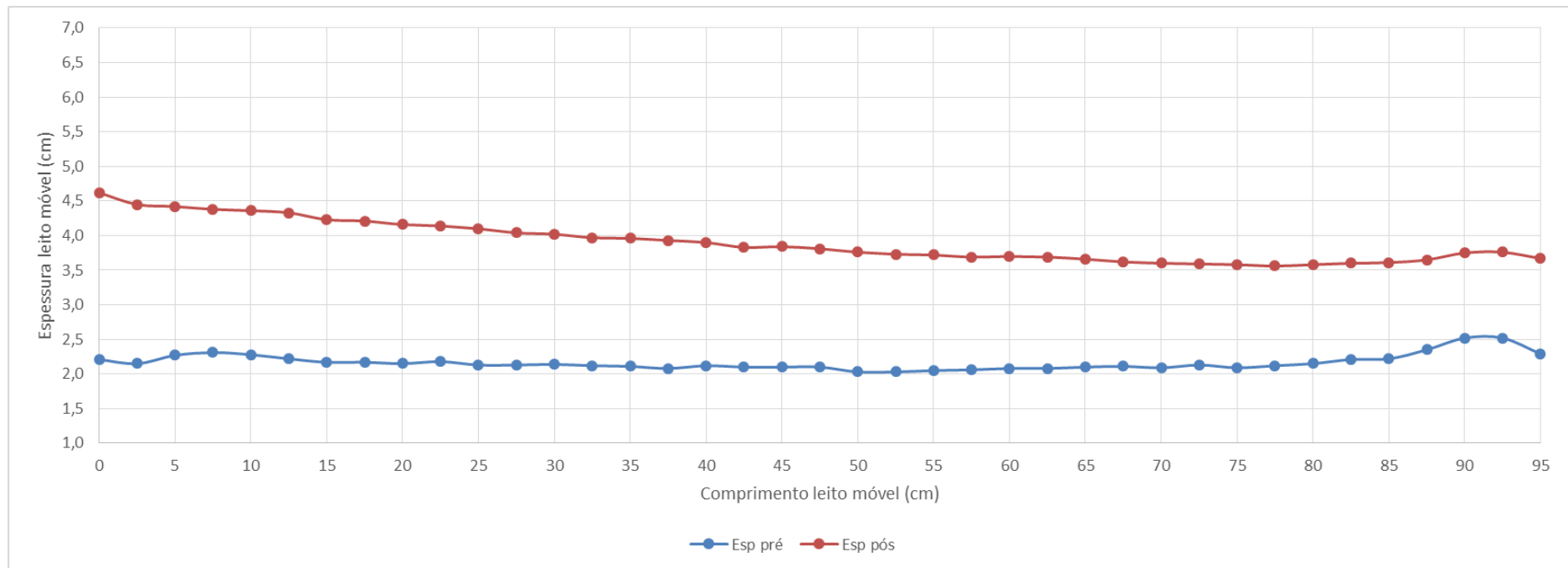
EO32



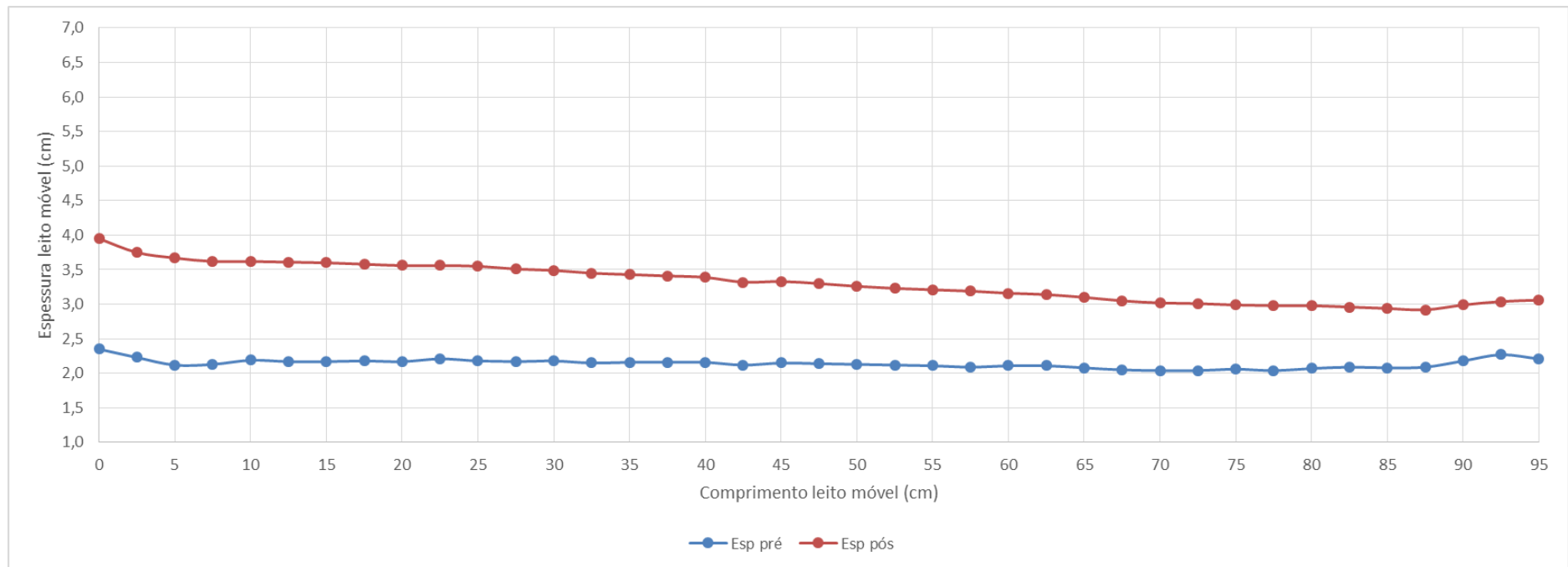
EO33



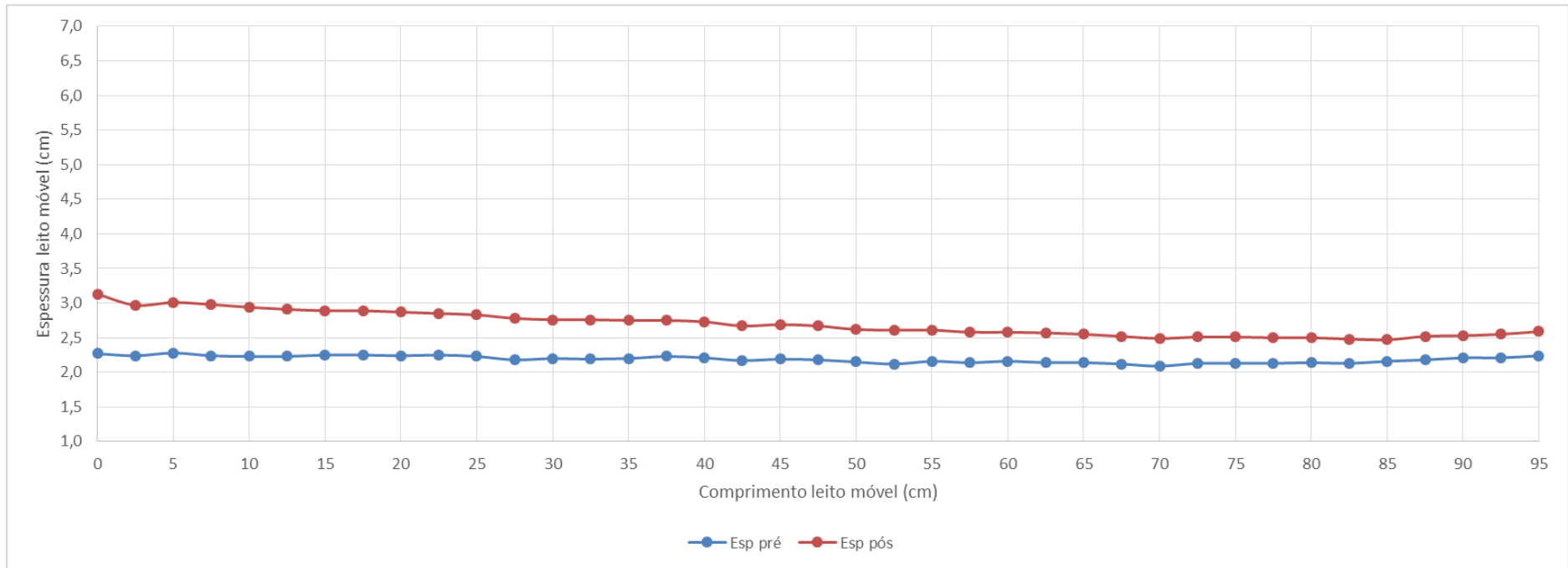
EO34



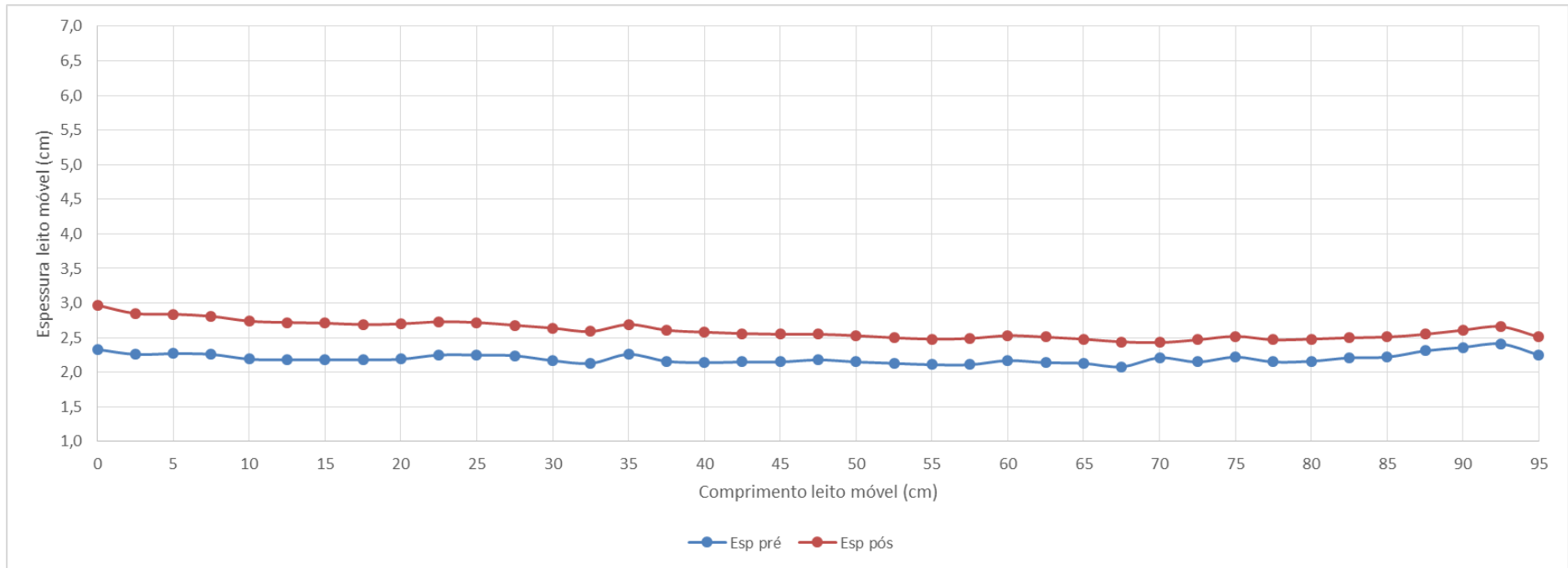
EO35



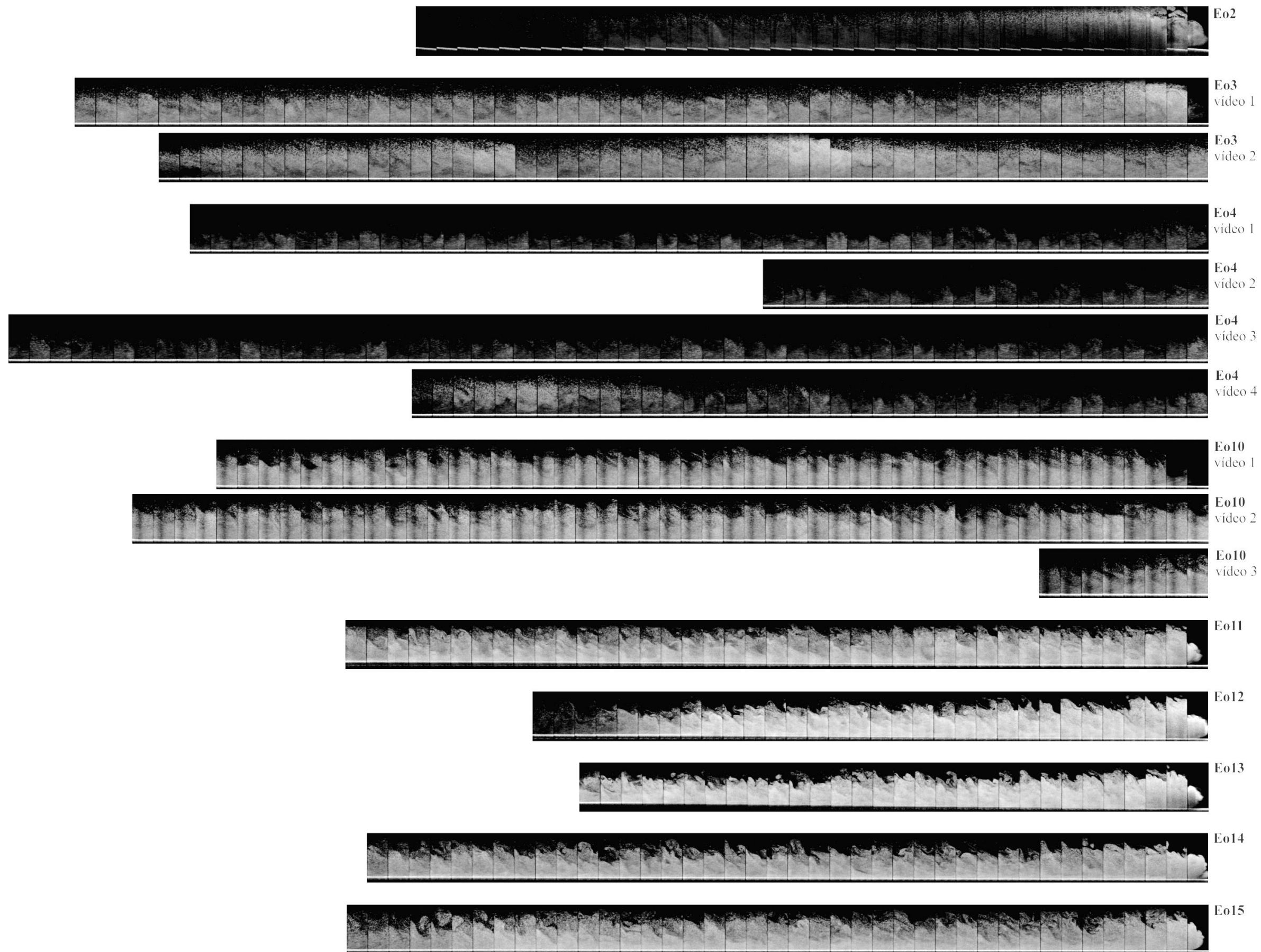
EO36

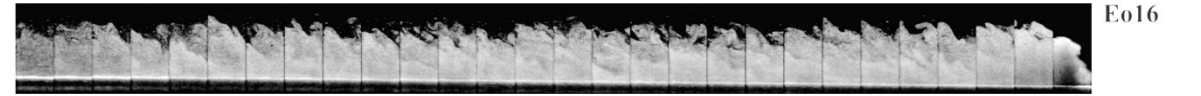


EO37

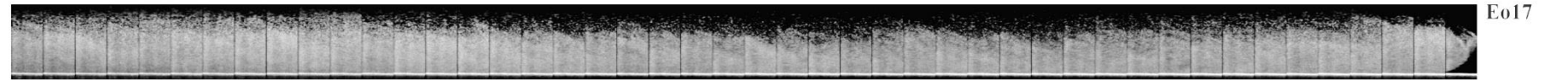


ANEXO II – Montagem das imagens obtidas com o ecógrafo (uma imagem - 6 cm x 14 cm - a cada 10 segundos).

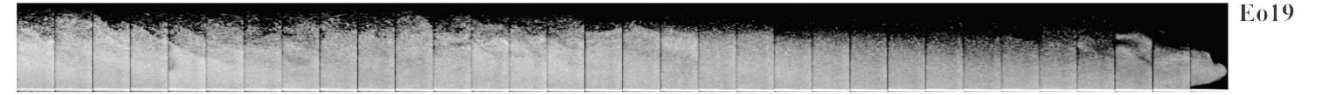




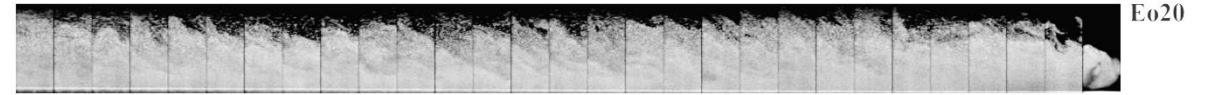
Eo16



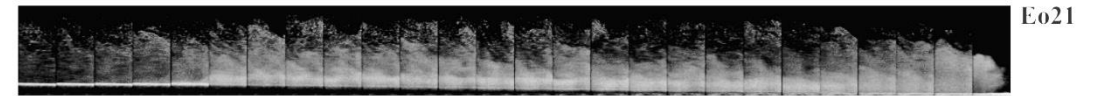
Eo17



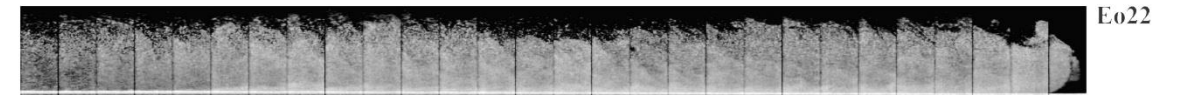
Eo19



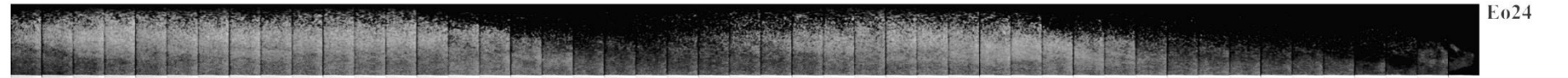
Eo20



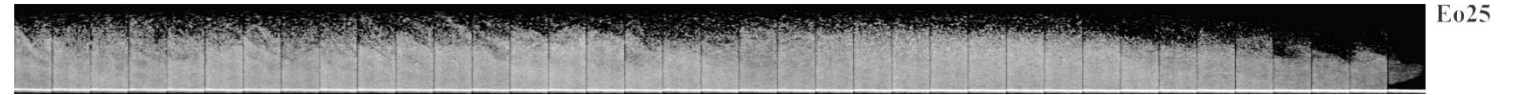
Eo21



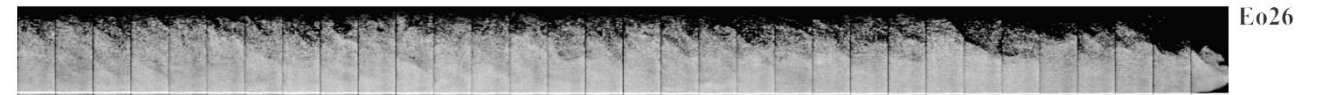
Eo22



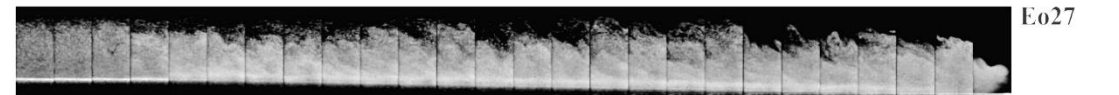
Eo24



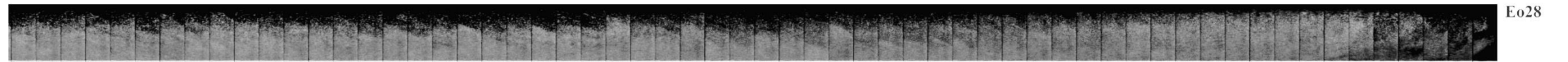
Eo25



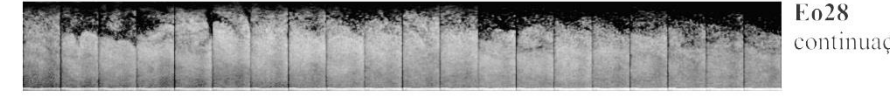
Eo26



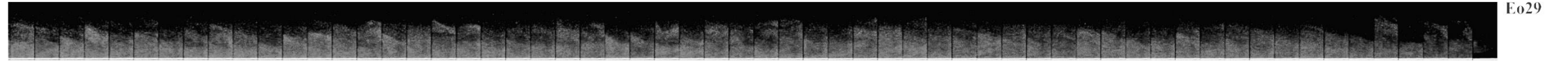
Eo27



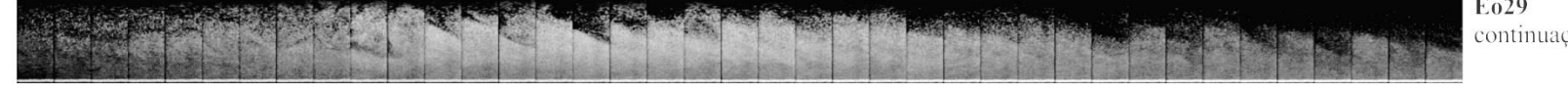
Eo28



Eo28
continuação



Eo29



Eo29
continuação

