

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

EFEITOS DA DIREÇÃO DO VENTO E DO CONFINAMENTO PARCIAL DE REGIÃO DE TRANSIÇÃO RIO-RESERVATÓRIO IDEALIZADA NA SUA EFICIÊNCIA DE RETENÇÃO DE SEDIMENTOS

Bruno Samistraro Machado¹; William Bonino Rauen²

Abstract: The construction of reservoirs in natural watercourses is essential for water resource management but increasingly challenged by progressive siltation, which compromises their operational efficiency. As a mitigation strategy, the use of pre-dams in the lotic-lentic transition zone has gained attention, particularly concerning their Sediment Trapping Efficiency (STE). A previous study indicated that partial confinement of these regions can enhance their STE under specific conditions by inducing hydrodynamic discontinuity in the horizontal plane, enhancing silt deposition. This study aims to refine the understanding and describe the effect of partial confinement on STE, for five different confinement ratios (R_c) and five wind orientations of moderate intensity, while keeping other geometric and hydro-sedimentological parameters fixed. A total of 22 idealized scenarios were simulated using the three-dimensional hydro-sedimentological model ECOMSED. Results showed that partial confinement did not affect STE under transverse and longitudinal winds relative to the axis of the water body and river flow direction. However, under oblique winds, partial confinement significantly influenced STE, with a positive correlation observed between STE and R_c . Additionally, evidence suggests the existence of a critical maximum value of R_c , beyond which STE stabilizes. These findings advance the understanding of how partial confinement of lotic-lentic transition zones can be part of a strategy for improving siltation control in reservoirs.

Resumo: A construção de reservatórios em cursos de água naturais é essencial para a gestão hídrica, mas sofre com o assoreamento progressivo, comprometendo sua operação. Como medida de mitigação, destaca-se o uso de pré-reservatórios na região de transição lótico-lêntico, especialmente quanto à sua Eficiência de Retenção de Sedimentos (ERS). Um estudo anterior evidenciou que o confinamento parcial dessas regiões pode aumentar sua ERS sob determinadas condições, ao causar descontinuidade hidrodinâmica no plano horizontal que oportuniza um aumento da deposição de silte. A presente pesquisa visa aprofundar o entendimento e descrever o efeito do confinamento parcial na ERS, para cinco diferentes razões de confinamento (R_c) e cinco orientações de um vento moderado, sendo fixadas outras características geométricas e hidrossedimentológicas. Foram simulados, com o modelo hidrossedimentológico tridimensional ECOMSED, 22 cenários idealizados. Os resultados evidenciaram que o confinamento parcial não afetou a ERS sob ventos transversais e longitudinais relativamente ao eixo do corpo de água e direção do aporte fluvial. Contudo, para os ventos oblíquos, o confinamento parcial teve impacto relevante na ERS, apresentando correlação positiva entre ERS e R_c . Verificou-se também indícios de existência de um valor crítico máximo de R_c , a partir do qual a ERS se estabiliza. Os resultados representam um avanço no entendimento dos efeitos do confinamento parcial da região de transição lótico-lêntico como estratégia para auxiliar o controle do assoreamento em reservatórios.

Palavras-Chave – controle de assoreamento; modelagem CFD; eficiência de retenção de sedimentos

1) Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental (PPGERHA), UFPR, Campus Centro Politécnico
bruno.samistraro@ufpr.br.

2) Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental (PPGERHA) e Departamento de Hidráulica e Saneamento (DHS), UFPR, Campus Centro Politécnico, wbr@ufpr.br.

INTRODUÇÃO

A gestão dos recursos hídricos é uma prática cuja influência abrange diversos serviços básicos oferecidos à sociedade. Nesse sentido, a utilização de reservatórios em cursos de água naturais é uma solução de engenharia que carrega a responsabilidade de garantir disponibilidade hídrica para o consumo, controlar cheias ou gerar energia elétrica, entre outros usos possíveis. No entanto, a construção de barramentos com o objetivo de gerar um reservatório artificial tem como consequência a alteração do equilíbrio hidrossedimentológico do corpo de água. Essa interferência, caso não controlada devidamente, pode comprometer a utilização desse recurso quanto à capacidade de armazenamento, devido ao assoreamento.

A problemática envolvendo o assoreamento de reservatórios possui grande relevância ao redor do mundo, devido ao seu aumento nas últimas décadas (Wisser et al., 2013). Como consequência, estima-se que, em escala global, os reservatórios perdem em média 1% de sua capacidade de armazenamento por ano como consequência do assoreamento (Schleiss et al., 2016). Ainda que esses problemas sejam bem documentados, Kondolf et al. (2014) destacam que muitos projetos recentes de barragens e reservatórios ao redor do mundo são concebidos sem planejamento de medidas de controle do assoreamento. Nesse contexto, destaca-se o uso de pré-reservatórios como uma das estratégias de controle, assim abordados por Paul e Putz (2008), os quais consistem em confinamentos do aporte fluvial a montante do reservatório principal com a finalidade de controlar a deposição de sedimentos e a passagem de contaminantes agregados ao sedimento.

Ao se tratar de pré-reservatórios como uma forma de controle de assoreamento, a região de transição lótico-lêntico é estratégica, devido aos seus gradientes longitudinais tipicamente elevados de variáveis hidrossedimentológicas. Nesse sentido, um estudo recente avaliou, por meio de modelagem computacional tridimensional hidrossedimentológica, possíveis efeitos do confinamento parcial de uma região de transição lótico-lêntica de geometria idealizada na sua Eficiência de Retenção de Sedimentos (ERS) (Salvador, 2020; Salvador e Rauen, 2022). Para cenários de interesse sob regimes permanentes, concluiu-se que o confinamento parcial das regiões de transição rio-reservatório pode aumentar a ERS sob determinadas condições hidrossedimentológicas e meteorológicas. Essa constatação revelou uma potencial solução de relativo baixo custo para melhorar o controle do assoreamento em reservatórios, a qual pode ser associada a outras medidas (tal como a dragagem) como parte de uma estratégia de gestão de sedimentos. Para possibilitar o uso prático, notou-se ser necessário melhor explorar e descrever efeitos de variáveis chaves na ERS, com a ampliação da faixa de cenários pertinentes ao confinamento parcial.

Com base nos estudos semelhantes, formulou-se a hipótese de que a variação da razão de confinamento da região de transição lótico-lêntico terá efeito sobre a ERS, apresentando correlação positiva. Tal hipótese fundamenta-se nos resultados de Salvador (2020) e Salvador e Rauen (2022), que indicaram interferência da região confinada no padrão de recirculação horizontal (chamada pelos autores de descontinuidade hidrodinâmica), a qual seria intensificada pelo aumento da razão de confinamento.

Isto posto, este trabalho tem por objetivo geral ampliar o entendimento e a capacidade descritiva do efeito do confinamento parcial na ERS de regiões de transição rio-reservatório sob uma maior gama de condições geométricas associadas à razão de confinamento, para diferentes direções do vento incidente. Reporta-se aqui parte de uma pesquisa de mestrado em andamento (Machado, 2025).

MÉTODOS

O objeto de estudo desta pesquisa corresponde a uma região de transição lótico-lêntica idealizada de um reservatório subtropical, de médio porte, com eixo longitudinal dominante, baseada nas características morfológicas, hidrossedimentológicas e meteorológicas da transição entre o Rio Passaúna e o Reservatório Passaúna, localizado na Região Metropolitana de Curitiba – PR, conforme caracterização e generalização realizadas por Salvador (2020). Esta zona de transição, reconhecida por sua dinâmica própria e elevada suscetibilidade à deposição de sedimentos, foi representada sob duas configurações geométricas: confinada e não confinada, com destaque para a variação da razão de confinamento (R_c), dada pela equação (1) e ilustrada pela Figura 1. Nota-se que o confinamento parcial foi proporcionado pelo estreitamento da seção do escoamento, mantendo-se leito plano e horizontal, com profundidade de 4,0 m no corpo de água.

$$R_c (\%) = \frac{2 \cdot c}{B} \cdot 100 \quad (1)$$

Conforme também ilustrado na Figura 1, a variável G_d representa o grau de desalinhamento entre as forçantes do padrão do escoamento – neste caso, o aporte fluvial ao corpo de água e o vento incidente, considerando o sentido para o qual cada forçante está orientada.

Utilizou-se um modelo hidrossedimentológico matemático-computacional tridimensional estabelecido e testado internacionalmente – ECOMSED (Hydroqual, 2002). Foram simulados cenários idealizados de escoamento com transporte suspenso e deposição de silte, em uma região de transição lótico-lêntico com geometria idealizada, com o objetivo principal de avaliar a influência de R_c e G_d sobre a ERS.

Observa-se que, pelo fato das geometrias simuladas e condições de contorno de montante e jusante serem simétricas em relação ao eixo longitudinal do corpo de água, os pares de valores de G_d invertidos pelo eixo longitudinal ($\pm 45^\circ$, $\pm 90^\circ$ e $\pm 135^\circ$) resultariam no mesmo valor de ERS na seção de análise, visto que a única diferença entre as duas simulações de cada par seria o sentido da recirculação horizontal, mas com magnitudes idênticas. Portanto, fixadas todas as outras variáveis, os resultados de ERS nos cenários com $G_d = -135^\circ$, -90° e -45° podem ser considerados idênticos aos que seriam obtidos por $G_d = 135^\circ$, 90° e 45° . Somando-se aos valores de $G_d = 0^\circ$ e 180° , foram consideradas cinco condições de vento incidente.

Foi definida uma faixa de valores de R_c entre 0% e 87% (os extremos simulados por Salvador, 2020) para avaliação da natureza do impacto dessa variável na ERS, conforme descrito na Tabela 1. Os cenários correspondentes à $R_c = 26\%$ foram incluídos posteriormente pela necessidade de representação de valores intermediários. Nesse caso, foram simulados apenas os ventos oblíquos ($G_d = -45^\circ$ e -135°), uma vez verificado que apenas sob eles ocorre efeito de R_c nas condições de simulação e geometria idealizadas considerados nesse estudo.

A fim de avaliar o efeito individual de R_c e G_d , foram fixadas as seguintes variáveis com base nos valores típicos para o objeto de estudo: velocidade de queda do sedimento ($w_s = 6,6 \cdot 10^{-5}$ m/s, representativa de silte), vazão fluvial moderada para o corpo de água de referência ($Q = 3$ m³/s) e velocidade do vento moderada ($U_v = 5$ m/s). Testes preliminares de malha e de convergência numérica para o regime permanente hidrossedimentológico foram realizados em consonância com Salvador (2020) e Salvador e Rauen (2022), tendo sido utilizados para validar resultados do ponto de vista do seu realismo físico, observando uma incerteza metodológica de $\pm 1\%$ associada à ERS. Nas simulações principais, foi utilizada uma malha computacional estruturada com resolução de 10 m x 10 m (uniforme) no plano horizontal e não uniforme no plano vertical, com 13 níveis sigma. O passo

de tempo utilizado foi de 1,5 s, sendo necessários três dias de tempo simulado para o alcance do regime permanente hidrossedimentológico. Outras características da modelagem foram reproduzidas do estudo de Salvador (2020) e Salvador e Rauen (2022).

Figura 1 – Diagrama esquemático (vista superior) do corpo de água simulado, com localização de pontos e dimensões de interesse e convenção adotada para o grau de术 desalinhanamento entre o vento e o aporte fluvial (G_d) para geometrias: a) parcialmente confinada, com R_c dada pela equação (1); e b) não confinada ($R_c = 0\%$)

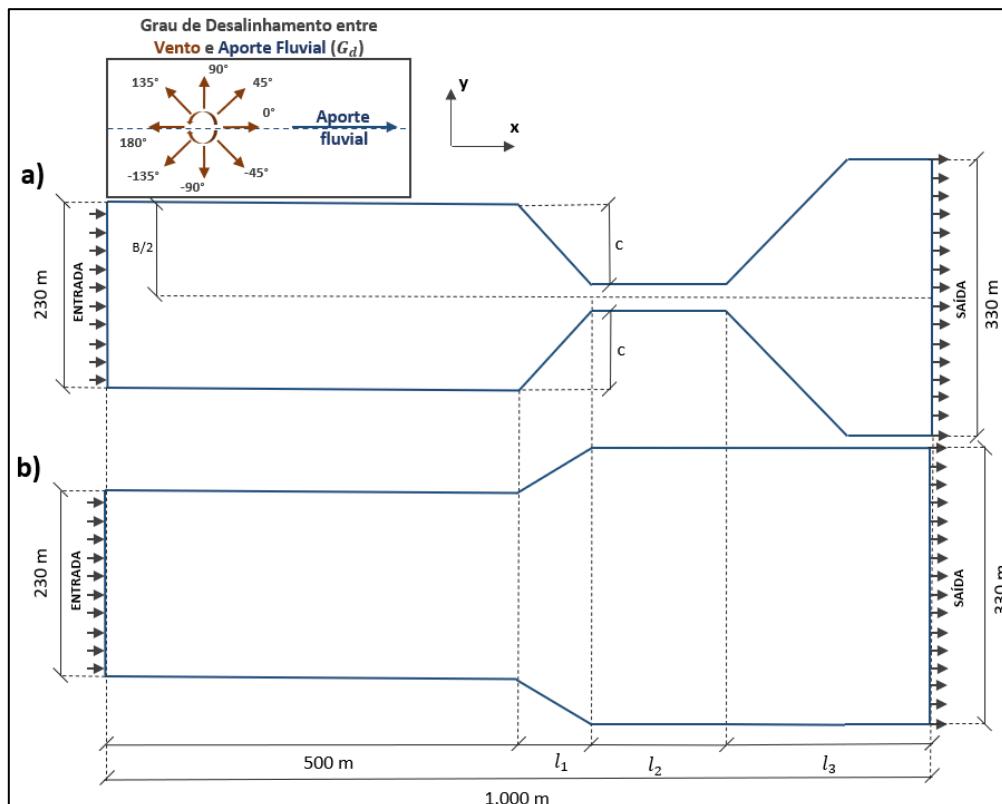


Tabela 1 –Características dos cenários de simulação

Grupo de Cenários	R_c	G_d	Número de cenários
1	0% (não confinada)	0° ±45° ±90° ±135° 180°	5
2	26%		2
3	52%		5
4	70%		5
5	87%		5
Total de cenários			22

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados das simulações foram obtidos como a ERS na seção $x = 500$ m, favorecendo a comparação entre as geometrias com diferentes configurações a jusante desse ponto (ver Figura 1). Os resultados demonstram que a influência da razão de confinamento sobre a ERS (Figura 2 e Tabela 2) mostrou-se dependente do ângulo de incidência de ventos oblíquos (neste caso, $G_d = \pm 45^\circ$ e $G_d = \pm 135^\circ$), corroborando com o observado por Salvador (2020) e Salvador e Rauen (2022).

Figura 2 – Resultados de ERS em $x = 500$ m em função da razão de confinamento (R_c), para diferentes orientações do vento relativamente ao aporte fluvial (G_d)

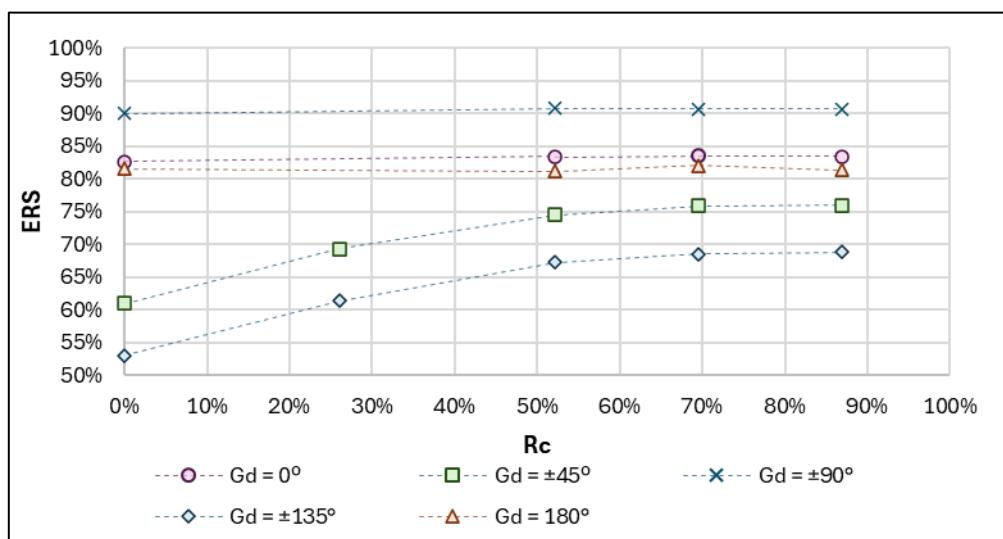


Tabela 2 – Resultados de ERS em $x = 500$ m

$R_c \backslash G_d$	0°	$\pm 45^\circ$	$\pm 90^\circ$	$\pm 135^\circ$	180°
0%	82,6%	61,0%	90,0%	53,0%	81,6%
26%	-	69,3%	-	61,4%	-
52%	83,4%	74,6%	90,8%	67,3%	81,2%
70%	83,5%	75,9%	90,7%	68,5%	82,1%
87%	83,5%	76,0%	90,7%	68,8%	81,3%

Sob a ação de ventos oblíquos ($\pm 45^\circ$ e $\pm 135^\circ$), a ERS aumentou com R_c . Esse fenômeno está associado à descontinuidade hidrodinâmica, assim definido por Salvador (2020) e Salvador e Rauen (2022), o que é evidenciado na Figura 3 para $G_d = -45^\circ$ no plano horizontal localizado em $z = 2,0$ m (meia profundidade). Observa-se pelo campo de velocidades que o padrão de recirculação horizontal é interrompido pelo confinamento parcial e concentrado apenas a montante do mesmo – efeito esse que se intensifica conforme R_c aumenta. Tal aumento, no entanto é limitado a um valor máximo, o que sugere a existência de um valor crítico máximo de R_c , a partir do qual os resultados de ERS se estabilizam.

Nos casos de vento longitudinal (0° e 180°) e transversal ($\pm 90^\circ$), a variação de R_c não causou efeito sobre a ERS, visto que acarretou variações menores que a incerteza de 1% definida na seção de métodos. Nota-se que, no mesmo plano horizontal à meia profundidade, não há um padrão de recirculação horizontal no corpo de água (Figura 4, para $G_d = -90^\circ$), o que justifica a constância observada nos resultados de ERS para diferentes valores de R_c .

Figura 3 – Campos de velocidade no plano horizontal à meia profundidade ($z = 2,0$ m) para $G_d = -45^\circ$ e: a) $R_c = 0\%$, b) $R_c = 26\%$, c) $R_c = 52\%$, d) $R_c = 70\%$, e) $R_c = 87\%$

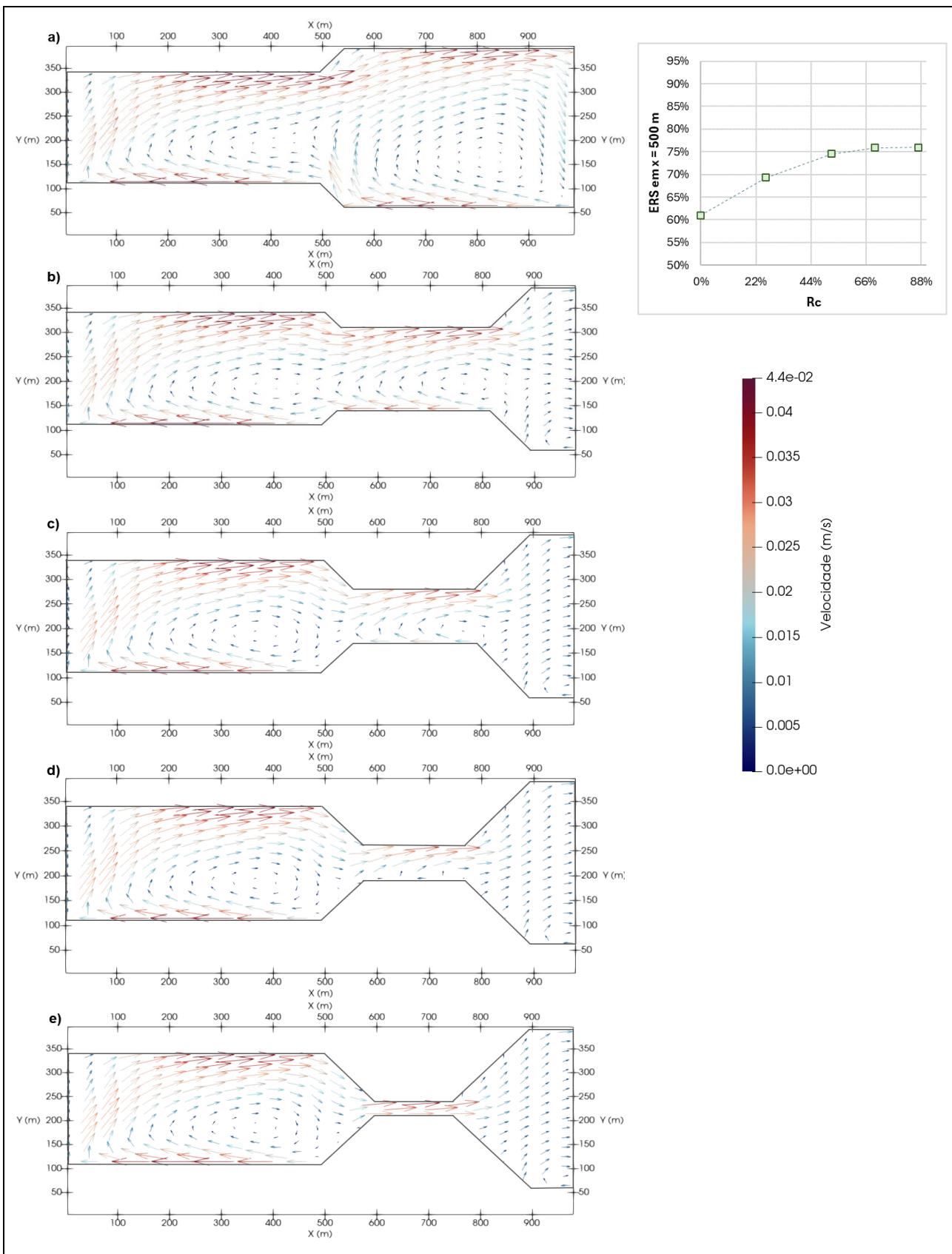
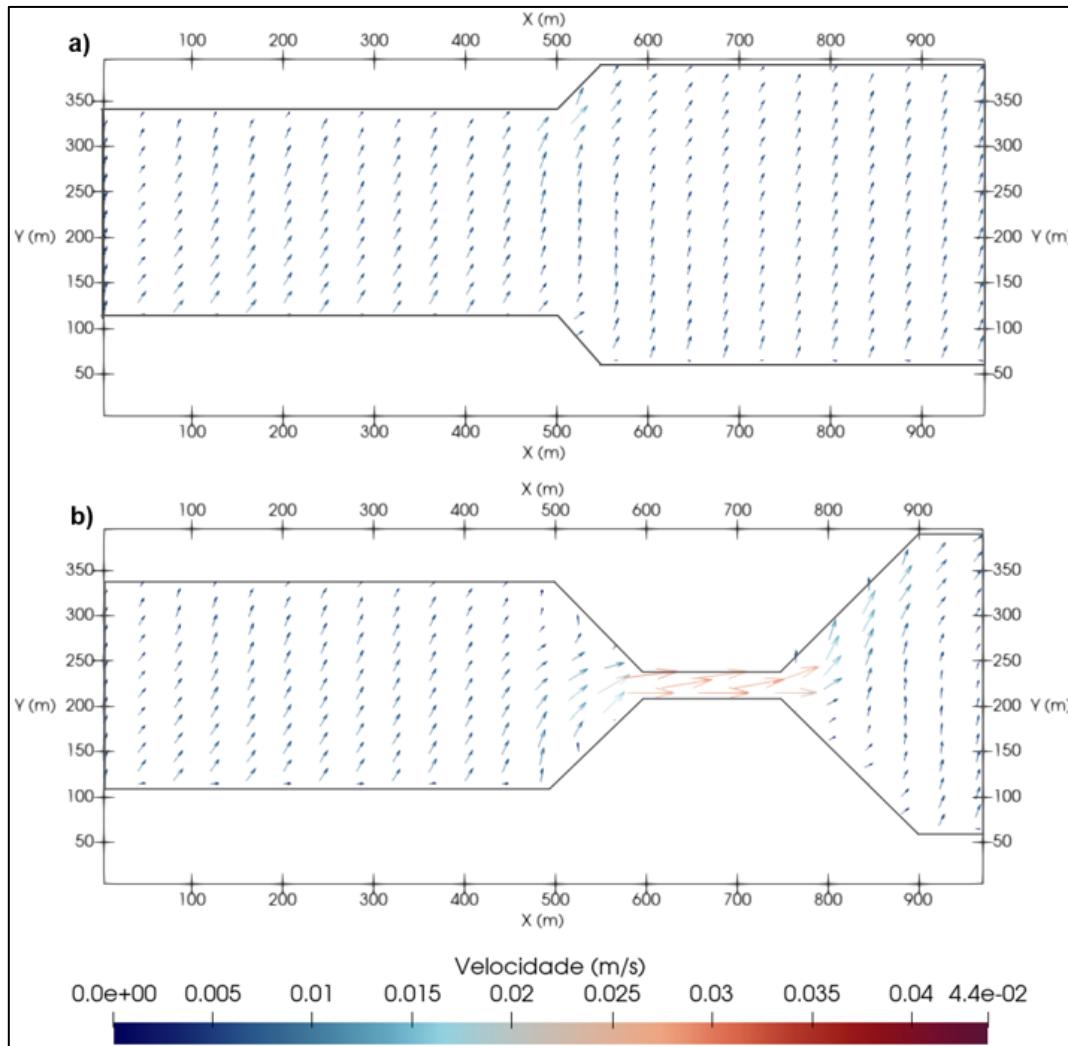


Figura 4 – Campos de velocidade no plano horizontal à meia profundidade ($z = 2,0$ m) para $G_d = -90^\circ$ e: a) $R_c = 0\%$, b) $R_c = 87\%$



CONCLUSÃO

Os resultados deste estudo estão permitindo avanços na compreensão dos processos hidrossedimentológicos em uma região de transição lótico-lêntico idealizada sujeita a diferentes graus de confinamento parcial e de desalinhamento entre o vento e o eixo do corpo de água. Nota-se que a hipótese da pesquisa foi parcialmente confirmada, visto que a razão de confinamento apenas sob a ação de ventos oblíquos apresentou efeito significativo na ERS, favorecendo maior controle do assoreamento no corpo de água e evidenciando correlação positiva entre ERS e R_c .

Além disso, a ocorrência de valores máximos de R_c associados à maximização da ERS sob dada condição do vento oblíquo sugere a existência de um valor de $R_{c\ crit}$ que está se mostrando dependente de outras variáveis do problema. A pesquisa ora busca avançar na investigação e descrição dos efeitos combinados dessas variáveis, de modo a fornecer subsídio ao projeto econômico da medida de confinamento parcial de regiões de transição rio-reservatório para controle do assoreamento.

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental (PPGERHA) da Universidade Federal do Paraná (UFPR) e à RHA Engenharia, pelo apoio institucional à realização da pesquisa de mestrado (em andamento) que originou este artigo.

REFERÊNCIAS

- HYDROQUAL; “*A primer for ECOMSED, User’s manual.*” Version 1.3. New Jersey: HydroQual, 2002.
- KONDOLF, G. M.; GAO, Y.; ANNANDALE, G. W.; MORRIS, G. L.; JIANG, E.; ZHANG, J.; CAO, Y.; CARLING, P.; FU, K.; GUO, Q. “*Sustainable sediment management in reservoirs and regulated rivers: Experiences from five continents*”. *Earth's Future*, v. 2, n. 5, p.256-280, 2014.
- MACHADO, B. S. “Avaliação da eficiência de confinamento parcial em região de transição rio-reservatório para controle de assoreamento”. Documento de Qualificação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) – Setor de tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba (PR), 2025.
- PAUL, L.; PUTZ, K. “*Suspended matter elimination in a pre-dam with discharge dependent storage level regulation*”. *Limnologica*, v.38, p.388-399, 2008.
- SALVADOR, N.M.; “*Avaliação de processos hidrossedimentológicos em região de transição rio-reservatório idealizada parcialmente confinada*”. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) – Setor de tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba (PR), 2020.
- SALVADOR, N.M.; RAUEN, W.B. “*Impact of partial confinement of reservoir lotic–lentic transition region on its sediment trapping efficiency*”. *International Journal of Environmental Science and Technology*, v.19, p. 3797-3818, 2022.
- SCHLEISS, A. J.; FRANCA, M. J.; JUEZ, C.; CESARE, G. “*Reservoir sedimentation*”. *Journal Of Hydraulic Research*, v. 54, n. 6, p.595-614, 20 set. 2016.
- WISSE, D.; FROLKING, S.; HAGEN, S.; BIERKENS, M. F. P. “*Beyond peak reservoir storage? A global estimate of declining water storage capacity in large reservoirs*”. *Water Resources Research*, v. 49, p. 5732 - 5739, 2013.