

Modelagem numérica de armadilha de sedimentos aplicada a um lago

Este estudo apresenta as etapas do desenvolvimento de uma proposta de solução para o avanço do assoreamento de um lago no Paraná, interior do Brasil. A concepção do projeto construtivo inicial da armadilha de sedimentos levou em consideração a vazão média do rio de 2,21 m³/s e a contribuição da carga de sedimentos de aproximadamente 0,18 kg/s. Para verificar a eficiência do projeto inicial proposto por Umeki (2012), empregou-se modelagem numérica com base na fluidodinâmica computacional. Quatro possibilidades de melhorias no projeto foram identificadas: aumento da largura de captação para eliminação de uma zona morta; alteração da localização da comporta de descarga de sedimentos para aproveitar o sentido das linhas de corrente e facilitar o fluxo de saída dos sedimentos; eliminação da inclinação interna, que mostrou-se desnecessária após alteração da localização da comporta de descarga de sedimentos; e aumento do diâmetro da tubulação para diminuição da velocidade de descarga dos sedimentos. As alterações foram providenciadas e comprovaram os benefícios da armadilha de sedimentos, uma vez que mostrou ser eficaz no controle do avanço do assoreamento, com eficiência mínima igual a 76% quando toda a distribuição granulométrica dos sedimentos foi considerada, e de 100% na retenção de sedimentos classificados como areia.

Palavras-chave: Assoreamento; Projeto; Armadilha de Sedimentos; Modelagem Numérica; Fluidodinâmica Computacional.

Numerical modeling of sediment trap applied to a lake

This study presents the stages of development of a proposed solution for the advancement of silting of a lake in Paraná, interior of Brazil. The conception of the initial constructive project of the sediment trap took into account the average flow of the river of 2.21 m³/s and the contribution of the sediment load of approximately 0.18 kg/s. To verify the efficiency of the initial project proposed by Umeki (2012), numerical modeling based on computational fluid dynamics was used. Four possibilities for improvement in the initial design were identified: increasing the catchment width to eliminate a dead zone; changing the location of the sediment discharge gate to take advantage of the direction of the current lines to facilitate the outflow of sediments; eliminating of the internal slope, which proved to be unnecessary after changing the location of the sediment discharge gate; and increasing the diameter of the discharge pipe to decrease the sediment discharge velocity. Changes in the design were provided and proved the benefits of the sediment trap since it proved to be effective in controlling the advance of silting, as it presented a minimum efficiency equal to 76% when the entire granulometric distribution of sediments was considered, and of 100% in retention of sediment classified as sand.

Keywords: Sedimentation; Project; Sediment Trap; Numerical Modeling; Computational Fluid Dynamics.

Topic: Engenharia Ambiental

Received: 12/10/2022

Approved: 21/10/2022

Reviewed anonymously in the process of blind peer.

Sabrina Aguiar da Silva 
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/2605942096595882>
<http://orcid.org/0000-0003-3797-8128>
aguiaresabrina7@gmail.com

Flávia Aparecida Reitz Cardoso 
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/2663975071704461>
<http://orcid.org/0000-0002-0432-9191>
flaviareitz@gmail.com

Matheus Korczovei Agostinho 
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/2982567426922457>
<http://orcid.org/0000-0002-7585-4014>
matheus.agos.k@gmail.com

Eudes José Arantes 
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/5368039952110556>
<http://orcid.org/0000-0002-7684-3069>
eudesarantes@gmail.com



DOI: 10.6008/CBPC2179-6858.2022.010.0012

Referencing this:

SILVA, S. A.; CARDOSO, F. A. R.; AGOSTINHO, M. K.; ARANTES, E. J..
Modelagem numérica de armadilha de sedimentos aplicada a um lago.
Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais, v.13, n.10, p.121-136, 2022. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2022.010.0012>

INTRODUÇÃO

Os reservatórios estão sujeitos a sedimentação que, sem as contramedidas de prevenção e mitigação adequadas, ameaça sua sustentabilidade. Além da evidente perda de capacidade de armazenamento, a operação adequada e segura das tomadas de água e saídas de fundo pertencentes às estruturas vitais pode ser afetada pela deposição de sedimentos no reservatório (SCHLEISS et al., 2016). Para sanar o problema, o desenvolvimento de técnicas para impedir ou ao menos conter o avanço do processo de assoreamento de reservatórios tem sido levantada por muitos estudiosos. Morris (2020) aponta algumas destas medidas: promover a diminuição da quantidade final de sedimentos que entra no reservatório por meio do controle da erosão da bacia e da retenção de sedimentos; remover os sedimentos de forma mecânica, por meio de dragagens; permitir a passagem do escoamento carregado de sedimentos pelo reservatório e fazer a liberação por descarga de fundo localizada na barragem.

Paralela a estas soluções, existe o método da implantação de uma armadilha de sedimentos no reservatório em processo de sedimentação e consequente assoreamento. Em um estudo realizado por Morris (2020), vários são os exemplos citados que comprovam a eficiência da captação de sedimentos com armadilhas de sedimentos, modeladas tanto numericamente quanto experimentalmente, em especial os apresentados na Tabela 1, que nortearão as discussões deste estudo. Ao promover a modelagem numérica de uma armadilha de sedimentos, de modo a prever sua eficiência e identificar possíveis falhas de projeto anteriormente a sua construção e implantação, reduz-se custos e tempo que as correções construtivas acarretam.

Tabela 1: Trabalhos já desenvolvidos que abordam o estudo de armadilhas de sedimentos.

Autores	Ano	Título
Souza et al.	2005	Construção de uma armadilha de sedimentos em laboratório e análise do escoamento de água em seu interior com o uso de velocimetria a laser
Souza et al.	2006	Estudo experimental e modelagem numérica do escoamento e do assoreamento em uma armadilha de sedimentos
Ranieri et al.	2012	Avaliação experimental de métodos de armadilhas de sedimentos para determinação do transporte costeiro da praia da Romana, ilha dos Guarás (nordeste do Pará)

Portanto, este estudo apresenta uma alternativa modelada numericamente para impedir a evolução do assoreamento de um lago localizado no Parque Joaquim Teodoro de Oliveira, localizado em uma cidade do interior do Paraná, Brasil. Esta deverá ser implantada à montante do lago e sinalizar a localização do canal aberto responsável pelo transporte de sedimentos captados pela armadilha e a sua destinação final.

METODOLOGIA

Caracterização da Bacia do Rio do Campo e do Lago

Na Figura 1 tem-se a localização do lago do Parque Joaquim Teodoro de Oliveira, além do rio que o abastece (Rio do Campo). Para realizar o dimensionamento de todos os elementos que compõem uma armadilha de sedimentos é necessário dispor dos dados de vazão (média e máxima) da bacia que abastece o lago, neste caso, a bacia do Rio do Campo. Conforme o trabalho desenvolvido por Umeki (2012), a área desta

bacia é de, aproximadamente, 115,9279 km².

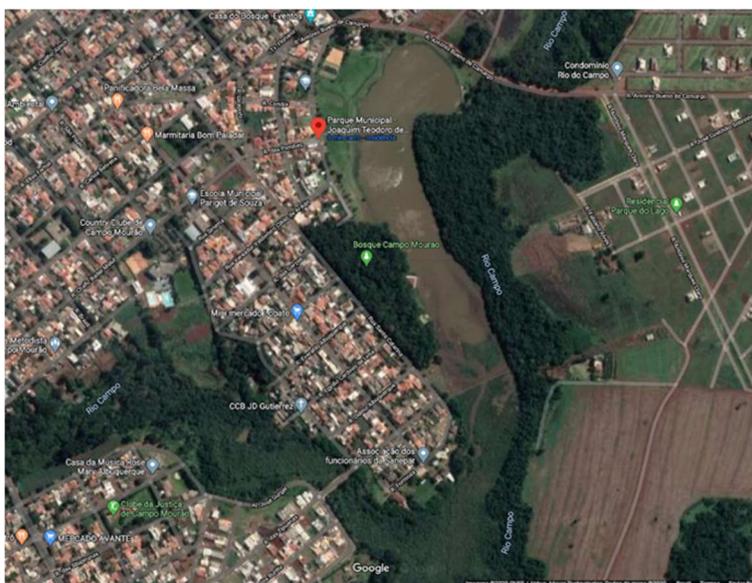


Figura 1: Mapa do lago do parque Joaquim Teodoro de Oliveira, Campo Mourão – PR. *Fonte: Google Maps (2021).*

Pretzel (2017) elaborou o gráfico da curva de permanência com as vazões mínimas e médias, conforme suas respectivas probabilidades e por meio de levantamento das áreas de drenagem da bacia hidrográfica do Rio do Campo determinou a área de escoamento do posto fluviométrico, correspondente a 79,72 km².

Então, por meio destes dados foi calculada a vazão específica, que alcançou o valor de 0,01905463 m³/s.km² para Q50 (vazão média). Para determinação da vazão média segundo Pretzel (2017), utilizou-se a Equação (1).

$$Q_{50} = 0,01905463 \cdot \text{Área} \tag{1}$$

Já para determinação da vazão máxima da bacia hidrográfica do Rio do Campo para um período de retorno de 100 anos, foi utilizada a Equação (2), disponibilizada por Arantes (2019).

$$Q = 0,077031 \cdot \text{Área}^{1,283544} \tag{2}$$

Etapas de Projeto da Armadilha de Sedimentos

Tabela 2: Equações utilizadas nas seções da metodologia.

Equação	Descrição	Equação
3	Cálculo da vazão na captação e no vertedor	$Q = 1,838 \cdot (L - 0,20h)^{\frac{3}{2}}$
4	Cálculo da área necessária à armadilha	$A = \frac{Q}{Vs}$
5	Estimativa da largura	$L = \frac{A}{b}$
6	Determinação da largura final	$L_{final} = 1,5 \cdot L$
7	Determinação da profundidade da armadilha	$V = \frac{Q}{A}$
8		$h = \frac{A}{b}$
9	Capacidade de armazenamento	$V = (B \cdot h) \cdot L$
10	Cálculo da perda de carga h	$h = k \cdot \left(\frac{V^2}{2g}\right)$
11	Cálculo do coeficiente de perda de carga k	$k = \beta \cdot \left(\frac{S}{b}\right)^{1,33} \cdot \text{sen } \alpha$
12	Determinação da área transversal interna da tubulação	$A = \pi \cdot r^2$
13	Cálculo da vazão na tubulação	$Q = V \cdot A$

Primeiramente foi necessário determinar as vazões média e máxima (para um período de retorno de 100 anos), para dimensionar a área de captação e o vertedor da armadilha, os dois principais elementos construtivos. Depois dimensionou-se, proporcionalmente a estes elementos, a armadilha de sedimentos de forma retangular.

Com relação ao posicionamento da armadilha, objetivou-se dispô-la de modo a captar o máximo de sedimentos oriundos do Rio do Campo antes que a água adentre ao lago já assoreado. As equações utilizadas para o dimensionamento da armadilha de sedimentos são expostas na Tabela 2.

Dimensionamento da Captação de Água e do Vertedor

Para determinação das alturas e das larguras da entrada (captação) e da saída (vertedor) de água da armadilha foi utilizada a vazão média do Rio do Campo.

Para este dimensionamento foi utilizada a metodologia de Porto (1998) de cálculo de vazão de vertedor com parede delgada. Foram estabelecidas as mesmas medidas de largura e altura para o canal de captação de água para a armadilha e para o vertedor e foram calculadas as vazões. Quando a vazão supriu a vazão média da bacia do Rio do Campo ($2,21 \text{ m}^3/\text{s}$), as medidas de largura (L) e altura (h) foram escolhidas para o dimensionamento. na Equação (8) da Tabela 2 tem-se o método de cálculo da vazão neste vertedor. Para o dimensionamento do canal de captação de água foi utilizada a mesma metodologia.

Cálculo das Dimensões e da Capacidade da Armadilha

Devido à escassez de literaturas que abordem os processos e as metodologias para o dimensionamento de armadilhas de sedimentos, neste estudo foi feito o uso da metodologia apresentada por Zaniboni et al. (2009) adequada à NBR 12213 (ABNT, 1992) para dimensionamento de caixas de areia (desarenadores) modificada e adaptada para armadilhas de sedimentos, já que ambas possuem o mesmo princípio de captação e retenção de sedimentos de cursos d'água. A seguir tem-se o procedimento adotado para determinação das medidas da armadilha. Assim, primeiramente são apresentados alguns critérios para dimensionamento de desarenadores, também adotados aqui para o dimensionamento da armadilha.

A velocidade crítica de sedimentação das partículas deve ser igual ou inferior a $0,021 \text{ m/s}$.

A velocidade de escoamento longitudinal deve ser igual ou inferior a $0,30 \text{ m/s}$.

O comprimento do desarenador, obtido ao aplicarem-se os critérios anteriores, deve ser multiplicado por um coeficiente de segurança mínimo de 1,5.

Para o dimensionamento de desarenadores de nível variável devem ser consideradas as condições de operação para os níveis de vazão máxima e mínima. Neste caso, a armadilha de sedimentos foi dimensionada para a condição de vazão média e com capacidade de suporte de extravasamento, caso ocorra, eventualmente, a vazão máxima calculada para o período de retorno de 100 anos.

Para cálculo da área foi necessário conhecer a vazão média de entrada de água carregada com sedimentos na caixa de areia (Q) e a velocidade de sedimentação (V_s) destas partículas, que, neste caso, será a velocidade crítica. A Equação 4 da Tabela 2 é utilizada para determinar a área necessária à armadilha de sedimentos.

Para suprir a necessidade da área de armadilha, foi considerada uma largura (b), de modo que o comprimento (L) gerado por meio da Equação 5 seja maior que ela e garanta que o formato seja retangular ($L > b$). Depois disso, para compensar a turbulência na entrada e na saída da mesma, aplicou-se um coeficiente de segurança de 50% no comprimento L da armadilha, conforme apresenta a Equação 6.

Depois de definidos largura (b) e comprimento (L), ajustou-se (de forma crescente) estes valores, para facilitar a construção dela, para aumentar sua capacidade de armazenamento de sedimentos ou para proporcionar maior segurança caso seja gerado extravasamento durante o período de vida útil.

Como já foi definida a largura (b) da mesma, definiu-se qual a profundidade necessária para suportar a velocidade de escoamento e a vazão. Como não é conhecida a velocidade de escoamento longitudinal nem a área da seção transversal, testou-se uma profundidade arbitrária para determinar a área e verifica-se o critério para velocidade de escoamento longitudinal ($V \leq 0,30$ m/s). Após obter a área transversal, determinou-se a profundidade (h) necessária. As equações necessárias para estes cálculos são a 7 e a 8 da Tabela 2.

Finalmente foi possível determinar qual o volume interno da armadilha de sedimentos (Equação 9 da Tabela 2). Determinado o volume que a armadilha suporta, buscou-se na literatura a quantidade de sedimentos que adentra ao lago do Parque Joaquim Teodoro de Oliveira. O trabalho de Umeki (2012) traz este dado. Este resultado apresenta-se na unidade de toneladas ao ano, assim, é necessário determinar o peso específico destes depósitos. O autor Morris (2020) apresenta o peso específico aparente médio dos depósitos de sedimentos, utilizado neste estudo.

Descarga dos Sedimentos Retidos

O projeto da armadilha de sedimentos conta com um sistema de descarga de sedimentos que deverá estar sempre aberto para não alterar de forma significativa a vazão natural do Rio do Campo, onde eles serão lançados. Para esta descarga, a armadilha contou com uma canalização conectada a mesma para retirar e destinar estes sedimentos a um canal que se findará em um local propício, que não acarrete risco em agravar o assoreamento do lago. Nesta seção são definidas as metodologias adotadas para o cálculo dos diâmetros (interno e externo) da tubulação que tem como destino este canal, assim como sugestão de ponto final de descarga de acordo com a capacidade da armadilha.

Antes dos sedimentos adentrarem a tubulação e ao canal, acontece o transporte por uma caixa de transição composta por gradeamento para impedir a passagem de materiais grosseiros, flutuantes ou em suspensão, como tronco de árvores, plantas, galhos etc., normalmente trazidos por cursos de água.

O dimensionamento da abertura na caixa para liberação dos sedimentos também foi feito com base na Equação 3 da Tabela 2, enquanto que o dimensionamento das barras que compõem o gradeamento foi feito com base nas recomendações propostas pela NBR 12213 (ABNT, 1992).

Como o gradeamento acarreta perda de carga (h), por meio das Equações 10 e 11 esta perda pôde ser calculada. A incógnita k representa o coeficiente de perda de carga que é adimensional e função dos parâmetros geométricos das grades, V é a velocidade média de aproximação em unidade de m/s e g é a

aceleração da gravidade, em m/s^2 . Para o cálculo do coeficiente k é necessário conhecer β (coeficiente, função forma da barra), s (espessura das barras), b (distância livre entre barras) e α (ângulo da grade em relação à horizontal). Além destas especificações, as barras que constituem as grades devem ser de material anticorrosivo ou protegido por tratamento adequado. O gradeamento e a comporta tem seus elementos representados na Figura 2. As incógnitas h e L são para dimensionamento da abertura da caixa de transição (Equação 3 da Tabela 2).

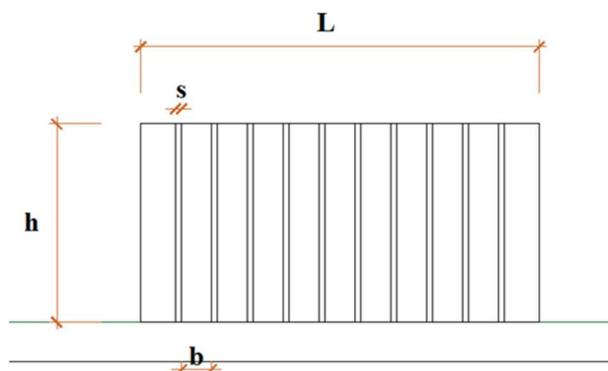


Figura 2: Caixa de transição com gradeamento.

Como a tubulação tem a função de destinar os sedimentos da caixa de transição para o canal aberto, optou-se por utilizar toda a área da seção transversal da caixa de transição para conectar a tubulação. Assim, o diâmetro externo da tubulação tem a mesma medida da altura (h) da caixa de transição. Além disto, foi verificada a capacidade de vazão desta tubulação e com base nestas informações, foram utilizadas as equações explanadas a seguir.

Para determinar a área transversal interna da tubulação utilizou-se a Equação 12 da Tabela 2, e adotou-se uma espessura de 10 cm à tubulação. Depois, foi definida a capacidade de vazão da tubulação. Para isto foi utilizada a velocidade média de aproximação dos sedimentos (V) e a Equação (13) da Tabela 2.

Para transportar os sedimentos retidos pela armadilha, o sistema desenvolvido contou com um canal aberto em vala que recebeu os sedimentos pela tubulação anteriormente dimensionada. Este canal apresentou diâmetro maior ou igual ao diâmetro da tubulação. Além disso, foi necessário definir a destinação final dos sedimentos captados pela armadilha. Neste caso existem diferentes possibilidades conforme o objetivo da implantação da armadilha desenvolvida. A seguir são apresentadas três delas:

Depositar os sedimentos em uma área paralela à localização da armadilha, mas que não acarrete risco de se direcionarem ao lago.

Desenvolver um sistema de venda ou doação dos sedimentos para a construção civil, já que os mesmos são constituídos, em maior parte por material arenoso. (UMEKI, 2012)

Lançar os sedimentos recuperados no Rio do Campo, logo após a barragem do lago.

Modelagem Numérica: Simulação Computacional

Com o projeto construtivo da armadilha de sedimentos finalizado, foi possível dar início à etapa de modelagem numérica. Cabe ressaltar que, antes do projeto definitivo, um primeiro foi desenvolvido e simulado computacionalmente por meio do *software* em questão. No entanto, só será apresentado o detalhamento da simulação computacional do projeto final, que foi 'otimizado' nos seguintes aspectos:

Aumento das dimensões da captação; Modificação da localização da comporta de descarga de sedimentos; Aumento da seção da tubulação de descarga; Retirada da inclinação interna.

A técnica empregada para simulação do funcionamento da armadilha de sedimentos projetada faz uso do método dos elementos finitos, por meio do *Ansys Workbench*. Como o objetivo da modelagem é verificar o comportamento do fluido oriundo do Rio do Campo ao adentrar à armadilha, optou-se em trabalhar com o sistema de análise denominado *Fluid Flow*. Após definido o sistema de análise, as etapas de simulação foram abertas e o *software* *Ansys Workbench* funcionou de forma hierárquica.

Geometria

Primeiramente é necessário definir a geometria da armadilha. O volume dimensionado nesta etapa corresponde àquele ocupado pelo volume de fluido, neste caso em específico, água com concentração de sedimentos, portanto, desconsideraram-se as espessuras das paredes.

Para realizar as simulações desenvolvidas neste trabalho, utiliza-se o ambiente de criação de geometria disponibilizado pelo *Ansys Workbench*, o *SpaceClaim*. A Figura 3 apresenta a geometria utilizada na modelagem conforme os resultados obtidos por meio do projeto construtivo da armadilha de sedimentos. A primeira imagem apresenta a vista frontal e por meio dela é possível observar a parte de captação da armadilha, enquanto a segunda, na parte inferior, apresenta o “fundo” da mesma onde encontram-se o vertedor e a comporta de esvaziamento de sedimentos.

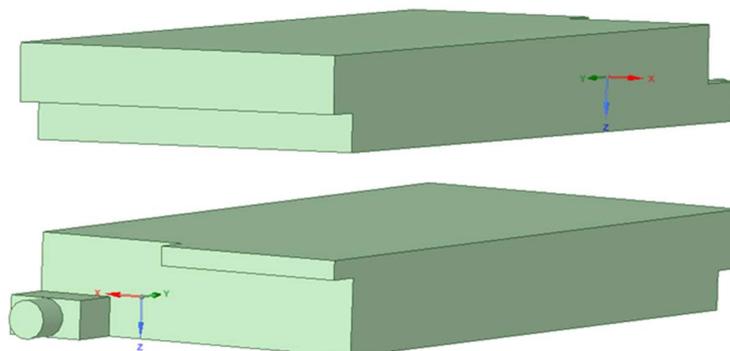


Figura 3: Geometria do volume interno da armadilha de sedimentos.

Definição da Malha

A definição da malha consiste na divisão da geometria em elementos com características a serem definidas. Quanto menores os elementos, maior o refinamento da modelagem, e maiores as quantidades de elementos e de nós. A malha foi configurada segundo as seguintes características: Criação de conexão automática a cada atualização da geometria; tamanho dos elementos: 0,2 m; tamanho máximo dos elementos: 0,2 m.

A malha gerada para a simulação da armadilha de sedimentos é apresentada por meio da Figura 4. Os números de elementos e de nós que compõem a malha da nova geometria consistem em 482.039 e 87.964, respectivamente.

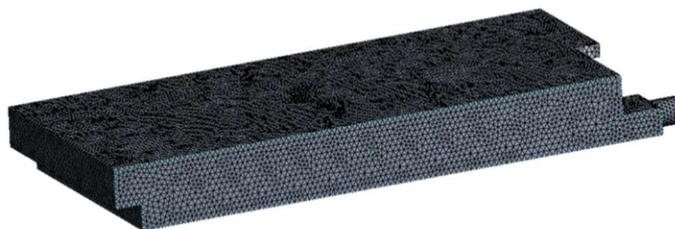


Figura 4: Malha da geometria da armadilha.

Configuração (CFX-Pre)

Primeiramente definiram-se as localizações das superfícies de entrada, saídas e abertura da armadilha. Também foi necessário calcular a velocidade de entrada na armadilha de acordo com a vazão média do Rio do Campo.

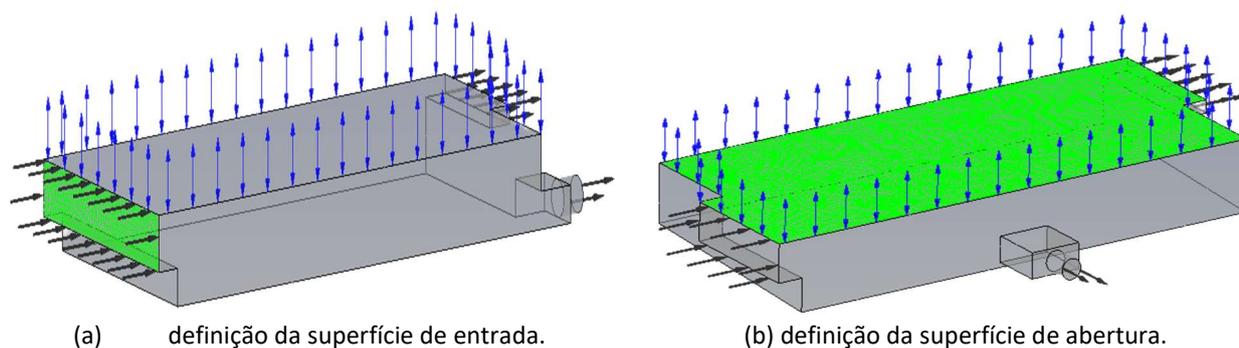
Com área da superfície de captação da armadilha igual a $13,5 \text{ m}^2$ ($9,00 \text{ m} \times 1,50 \text{ m}$) e vazão média do Rio do Campo igual a $2,21 \text{ m}^3/\text{s}$, tem-se velocidade de entrada igual a $0,164 \text{ m/s}$. A parte em verde da Figura 5 (a) apresenta a definição da superfície de entrada de fluido (água) e de partículas (sedimentos) à armadilha.

Além do fluido de entrada água, foi definido o sedimento como uma nova substância de entrada, portanto foi necessário definir o fluxo de massa de partículas na armadilha (conforme a quantidade de sedimentos que adentra ao parque ao ano) e obteve-se, de acordo com o trabalho desenvolvido por Kelniar et al. (2016), taxa de, aproximadamente, $0,18 \text{ kg/s}$.

Depois de determinadas as configurações de entrada, definiu-se a localização de abertura da armadilha, que, conforme o projeto desenvolvido, é a região do topo da mesma, conforme apresenta a parte em verde da Figura 5 (b). A Figura 5 (c) apresenta a localização e definição da superfície de saída de sedimentos da armadilha, que abrange o volume da tubulação de descarga. Como o diâmetro interno definido foi de $1,00 \text{ m}$, a velocidade de descarga de sedimentos por meio desta superfície é de $2,814 \text{ m/s}$.

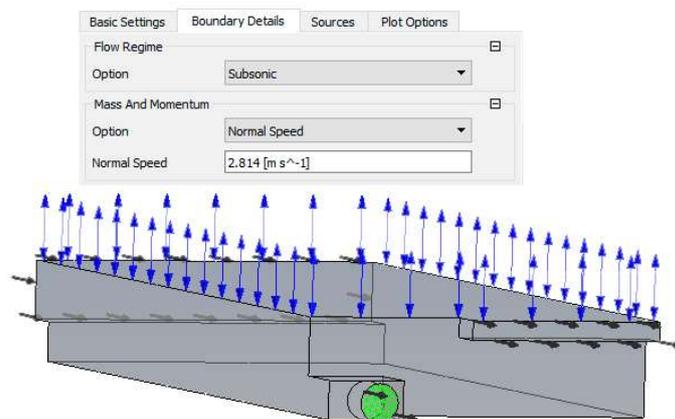
A superfície de saída foi projetada para promover o abastecimento de água do lago. Como é considerada eficiência de 70% à armadilha, além de água, é vertida uma parcela de sedimentos a ele.

Também foi necessário realizar algumas configurações no *solver control* do CFX-Pre, a respeito do controle das partículas. As configurações principais são tempo e distância máximos de rastreamento da partícula, pois limitam a apresentação da mesma nos resultados. O mesmo ocorre com a distância máxima de rastreamento, que, no caso da presente simulação, não pode ser menor que 22 metros, já que esta medida corresponde ao comprimento longitudinal total de transporte de partículas na armadilha.



(a) definição da superfície de entrada.

(b) definição da superfície de abertura.



(c) superfície de saída de sedimentos

Figura 5: Configurações da simulação.

Além das configurações de controle de partícula, também é necessário definir as configurações da simulação. Neste caso foi definido número de iterações igual a 100, suficiente para simular o comportamento da armadilha de sedimentos mediante à ação da água e dos sedimentos.

Solução: Função *Start Run*

O processo de simulação é feito por meio do *Workbench Solution*. Não foi definido um valor inicial (optou-se na inicialização automática). Como foram feitos vários testes de simulação antes de obter a armadilha final, o *software* acumulou o número de iterações, devido a isto, são apresentadas 6584 iterações, no entanto, este número corresponde a terceira iteração de um total de 100 que serão realizadas para a armadilha.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Caracterização da Bacia do Rio do Campo e do Lago

Por meio do estudo desenvolvido por Umeki (2012) obteve-se a área da bacia hidrográfica do Rio do Campo igual a 115,9279 Km². Com a Equação 1 apresentada por Pretzel (2017), obteve-se a vazão média (Q_{50}) de 2,21 m³/s. Para determinar a vazão máxima da bacia para um período de retorno de 100 anos, foi utilizada a Equação 2 e obteve-se um resultado de 34,37 m³/s.

Projeto Construtivo: Dimensionamento

Em seu estudo, Alighalehbabakhani et al. (2017) enfatizaram as consequências do acúmulo de sedimentos em lagos, reservatórios e barragens, tais como enchentes, comprometimento da geração de energia hidrelétrica e/ou abastecimento de água. Apesar do lago objeto de estudo do presente trabalho ser o cartão postal (atração turística) do município de Campo Mourão, também é de fundamental importância que o mesmo não tenha sua capacidade de armazenamento comprometida pelo assoreamento. Além disso, a armadilha de sedimentos dimensionada pode passar por adaptações e ser empregada em outros tipos de reservatórios, como os já mencionados anteriormente.

Antes de apresentar os resultados do dimensionamento da armadilha de sedimentos, cabe salientar a importância do conhecimento do parâmetro taxa de assoreamento dos lagos e reservatórios que passam por este processo. Cieśła et al. (2019) desenvolveram e implantaram 4 protótipos com diferentes geometrias e parâmetros de construção em um reservatório em Blizne, sudeste da Polônia para estudar sua eficácia. Um dos protótipos (o de número 2) foi considerado o mais eficaz e com capacidade de ser implantado em mares e oceanos (além de lagos e reservatórios) para medição da taxa de sedimentação e conseqüentemente da situação de assoreamento. Na presente pesquisa a situação do assoreamento do lago em estudo não foi evidenciada, no entanto pode ser medida por meio da implantação do protótipo desenvolvido por Cieśła et al. (2019).

Como a armadilha de sedimentos é desenvolvida com o objetivo de captar o máximo de sedimentos oriundo do Rio do Campo, a mesma deverá ser posicionada no ponto de transição do rio para o lago, ou seja, onde é feita a tomada de água.

Captação de Água

Estabeleceu-se largura (L) de 9 e altura (h) de 1,5 metros para a armadilha. Obteve-se capacidade de vazão (Q) igual a 29,38 m³/s. A visualização frontal da armadilha de sedimentos após alteração da captação é apresentada na Figura 6.



Figura 6: Vista frontal em corte da armadilha de sedimentos após alterações.

As medidas adotadas para o dimensionamento do vertedor foram de 5 e 0,5 metros para largura (L) e altura (h), respectivamente, obtendo-se a vazão (Q) igual a 3,18 m³/s.

Dimensões e Capacidade da Armadilha

A armadilha de sedimentos foi dimensionada para a condição de vazão média e com capacidade de suporte de extravasamento (paredes com espessura de 50 centímetros), caso ocorra, eventualmente, a vazão máxima calculada para o período de retorno de 100 anos ($Q = 34,37$ m³/s).

A capacidade de armazenamento de sedimentos da armadilha é de 427,5 m³. Ao considerar eficiência de 70% de retenção de sedimentos, ela deve impedir que 1729 m³ de sedimentos adentrem ao lago por ano.

Para o cálculo da área da armadilha de sedimentos foi utilizada a vazão média do Rio do Campo (Q_{50}) de 2,21 m³/s e velocidade crítica de sedimentação (V_s) de 0,021 m/s. O resultado da área necessária à armadilha foi de 105,19 m².

Depois de definida a área necessária à armadilha, considerou-se largura (b) de 8 metros e o

comprimento pôde ser calculado. Obteve-se comprimento (L) igual a 11,69 m. Para compensar a turbulência na entrada e saída da armadilha, aplicou-se coeficiente de segurança de 50% no comprimento L , sendo assim, o comprimento final (L_{final}) da armadilha deve ser de 17,53 m. Para fins práticos, portanto, definiu-se que a armadilha de sedimentos deve possuir largura interna de 9 m e comprimento interno de 19 m.

Diferentemente dos parâmetros largura (b) e comprimento (L) utilizados para determinar a área (em planta) da armadilha, para determinar a profundidade foi preciso definir as dimensões da seção transversal da mesma, ou seja, a mesma largura (b) e profundidade (h).

Para isto, foi necessário conhecer a velocidade de escoamento longitudinal (V) e a vazão Q (que já temos igual a 2,21 m³/s). A NBR 12213 (ABNT, 1992) estabelece que a velocidade de escoamento longitudinal não deve exceder 0,30 m/s, portanto, primeiramente estima-se uma profundidade interna h para a armadilha e verifica-se a velocidade de escoamento longitudinal. Primeiramente foi verificada a velocidade de escoamento longitudinal (V) para uma profundidade (h) de 2 metros e a velocidade encontrada foi de 0,123 m/s. Como esta velocidade é menor que 0,30 m/s, é possível utilizá-la para o dimensionamento da profundidade.

Com estes dados, obteve-se área transversal (A) da armadilha igual a 17,96 m² e profundidade (h) igual a 1,995 m. Assim, adotou-se profundidade interna h de 2,50 metros. Para a profundidade de 2,50 metros obtém-se $V = 0,098$ m/s, que também satisfaz a condição estabelecida por Zaniboni et al. (2009).

Após determinar as dimensões: largura, comprimento e profundidade, é possível determinar o volume interno da armadilha de sedimentos, igual a 427,5 m³.

Umeki (2012) afirma que adentra ao parque cerca de 3704,80 toneladas de sedimentos ao ano. Para complementar, Morris (2020) aborda o peso específico aparente médio de depósitos de sedimentos, igual a 1,5 toneladas por metro cúbico (1,5 ton/m³).

Ao considerar eficiência de captação de 70% a armadilha, a mesma tem capacidade de reter e impedir que adentrem ao lago 1729m³ de sedimentos por ano. Os elementos que promovem a descarga dos sedimentos retidos pela armadilha são uma caixa de transição com gradeamento e a tubulação para o direcionamento dos sedimentos para o canal aberto que promoverá o transporte dos sedimentos até o Rio do Campo, em ponto de descarte localizado após a barragem do lago.

O resultado do dimensionamento da abertura da caixa de transição para liberação dos sedimentos retidos na armadilha, feito com base na Equação 3 da Tabela 1 é apresentado a seguir. Foi dimensionada uma caixa de transição com largura (L) de 2,00 m e altura (h) de 1,00 m. Obteve-se, assim, capacidade de vazão igual a 3,31 m³/s à caixa de transição. A espessura adotada para as paredes da caixa foi de 0,20 m. Como a caixa é composta por gradeamento, também é necessário dimensioná-lo. Em conformidade à NBR 12213 (ABNT, 1992), adotou-se espaçamento de 15 cm e barras de seção transversal quadrada.

Como o gradeamento é um elemento que gera perda de carga durante o transporte dos sedimentos, a mesma também foi calculada. Primeiramente é necessário conhecer a velocidade média de aproximação (V), obtida por meio da relação entre a capacidade de vazão (3,31 m³/s) e a área transversal da caixa de transição ($L = 2,00$ m e $h = 1,00$ m). Tem-se, portanto, velocidade média de aproximação dos depósitos (V)

igual a 1,65 m/s.

Além disto, é necessário determinar o coeficiente de perda de carga (k) em função dos parâmetros geométricos das barras que compõem o gradeamento. Para isto, utilizou-se a Equação 11 da Tabela 1 e obteve-se coeficiente $k = 0,284$ (adimensional). O ângulo da grade em relação a horizontal é de 90° . Tem-se, portanto, um coeficiente de perda de carga em função dos parâmetros geométricos das barras (β) igual a 2,42 (adimensional).

Finalmente, foi possível determinar perda de carga h igual a 0,040 m gerada pela inserção do gradeamento na caixa de transição. Com relação ao dimensionamento da tubulação, determinou-se diâmetro externo de modo a ocupar toda a seção transversal da caixa de transição e o interno medindo 1,00 m. Depois de pré-estabelecidos estes valores, determinou-se área da seção transversal da tubulação igual a $0,78 \text{ m}^2$ e capacidade de vazão (Q) de $1,30 \text{ m}^3/\text{s}$. Sabendo-se que o comprimento interno total da armadilha é igual a 19 metros, tem-se volume interno igual a $427,5 \text{ m}^3$. Estas medidas são apresentadas na Figura 7.

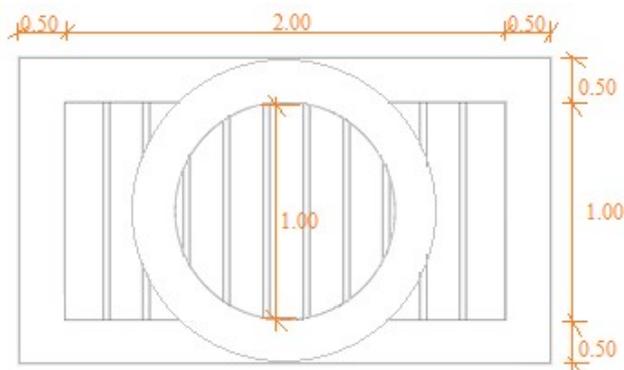


Figura 7: Diâmetros da tubulação de descarga de sedimentos.

Na metodologia foram apresentadas algumas opções para o descarte dos sedimentos. Optou-se por lançá-los no próprio Rio do Campo, logo após a barragem do lago. Esta opção pode ser considerada como a mais 'autossustentável' porque não necessita de nenhuma intervenção humana, com exceção do acionamento das comportas de descarga, caso opte-se que a mesma seja manual. Como sugestão da locação do canal aberto em vala, a distância retilínea entre a armadilha e o ponto final de descarte dos sedimentos é de aproximadamente 500 metros e margeia o Rio do Campo.

Espa et al. (2019) explicam que a descarga de sedimentos é capaz de mitigar o assoreamento de lagos e melhorar o fluxo de sedimentos por meio dos rios, no entanto, esta descarga à jusante pode trazer prejuízos ecológicos ao curso do rio. Devido a isto, recomenda-se que a descarga de sedimentos seja feita de forma controlada, ou seja, regulando a concentração de sedimentos no momento do descarte.

Tabela Comparativa: Modificações no projeto construtivo

Para tornar mais clara a visualização das alterações feitas no projeto construtivo inicial da armadilha de sedimentos para a obtenção do projeto construtivo final, a Tabela 3 apresenta quais variáveis foram modificadas e quais foram os resultados obtidos por meio delas.

Tabela 3: Comparativo entre as variáveis modificadas no Projeto 2 em relação ao 1.

Variável modificada	Incógnita	Medida inicial (Projeto 1)	Medida final (Projeto 2)	Justificativa da alteração
Largura do vertedor	L	5 m	9 m	Eliminação da zona morta
Inclinação interna	i	5,60%	0	A inclinação interna é desnecessária à armadilha após alteração da localização da comporta de descarga
Localização da comporta de descarga	-	Alocação na lateral direita da armadilha	Alocação no "fundo" da armadilha (face do vertedor)	Utilizar do sentido do fluxo natural que as linhas de corrente apresentaram na simulação para promover a descarga dos sedimentos
Diâmetros interno e externo da tubulação de descarga	Di e De	Di = 0,80 m De = 1,00 m	Di = 1,00 m De = 1,20 m	Diminuir a velocidade do fluxo de sedimentos na tubulação de descarga

Modelagem Numérica: Comparativo entre as Simulações

A apresentação dos resultados da segunda simulação será dividida em: linhas de corrente, partículas e transporte de partículas. A Figura 8 apresenta um comparativo entre os resultados das linhas de corrente obtidos na primeira (Figura 8 (a)) e segunda simulação (Figura 8 (b)).

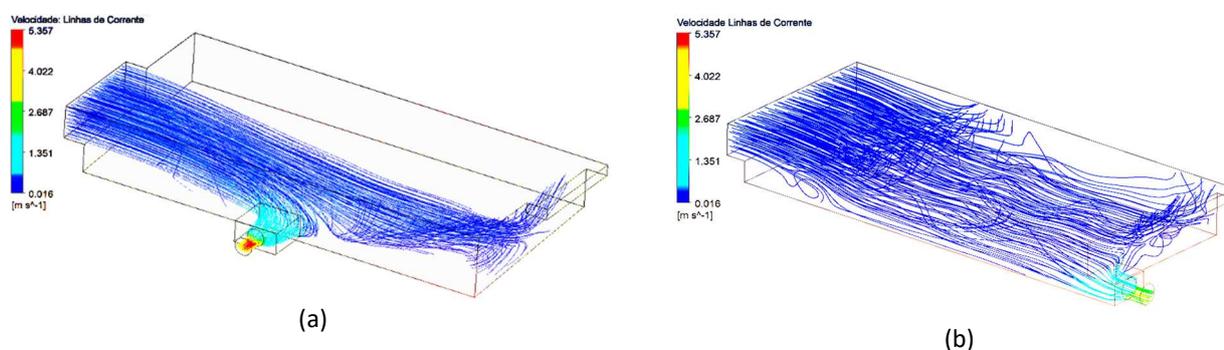


Figura 8: Comparativo entre as simulações de linhas de corrente.

Conforme esperado, observa-se maior velocidade das linhas de corrente na tubulação de descarga de sedimentos, já que esta apresenta volume com menor seção transversal. No entanto, na segunda simulação esta velocidade é menor, já a velocidade de entrada é menor e o diâmetro da tubulação de descarga é maior quando comparados com o resultado de linhas de corrente da primeira simulação.

Observa-se que a zona morta gerada nos resultados da primeira simulação (primeiro projeto construtivo) foi eliminada na segunda, devido a superfície de captação de fluido do rio passar a ocupar toda a largura do volume interno frontal da armadilha. Além disso, a substituição da localização da caixa de transição facilita a descarga dos sedimentos, pois passa a ser favorecida pelo sentido das linhas de corrente. A Figura 9 apresenta o comparativo dos resultados das partículas (deposição dos sedimentos no interior da armadilha), obtidos nas duas simulações realizadas.

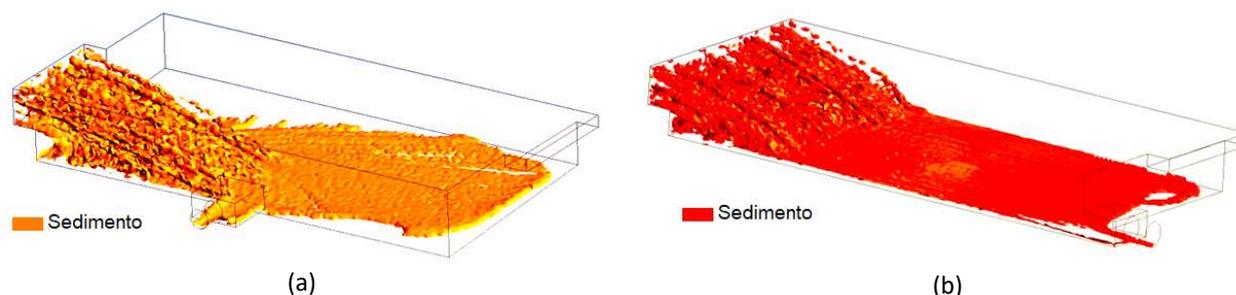


Figura 9: Comparativo entre as simulações de preenchimento com sedimentos.

Neste comparativo também se observa a eliminação da zona morta após as alterações pertinentes promovidas na armadilha. Finalmente, a Figura 10 apresenta o comparativo dos resultados de transporte de partículas no interior da armadilha. Foram utilizadas as mesmas configurações em ambas as simulações para facilitar a análise comparativa das linhas que representam o transporte e deposição das partículas no decorrer do tempo (100 segundos).

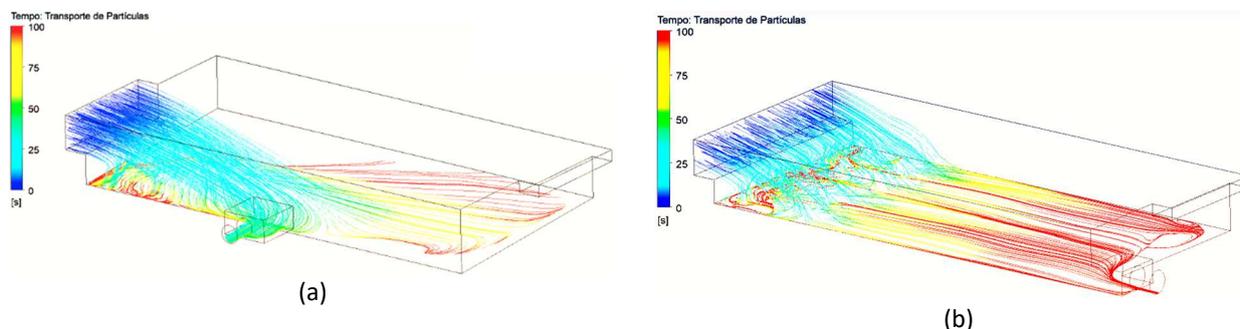


Figura 10: Comparativo das simulações do transporte de partículas.

Assim como nos outros comparativos, observa-se que a deposição das partículas no interior da armadilha na simulação 2 acontece antes do observado no resultado da primeira simulação. Isto ocorre devido ao aumento da área de captação e conseqüente redução da velocidade de entrada de fluido à armadilha. No entanto, como os sedimentos estão ‘diluídos’ na água, seu fluxo acaba por ‘empurrá-los’ para fora da armadilha quando a comporta de esvaziamento é acionada.

Eficiência da Armadilha de Sedimentos

Em seu estudo, Toniolo et al. (2005) analisaram a eficiência de cinco diferentes armadilhas de sedimentos construídas experimentalmente e comprovaram que a eficiência da armadilha de sedimentos está diretamente relacionada à granulometria do sedimento.

De acordo com Umeki (2012), a descarga de sedimentos suspensa no Rio do Campo é de 0,043 kg/s. Ao cruzar este dado com a quantidade de sedimentos que chega ao lago do Parque Joaquim Teodoro de Oliveira, do total de 0,18 kg/s tem-se 76% de partículas classificadas em “partículas de fundo” e 24% em partículas em suspensão. A Tabela 4 apresenta a porcentagem do tamanho das partículas dos sedimentos do Rio do Campo.

Tabela 4: Porcentagem do tamanho das partículas do sedimento do Rio do Campo.

Pontos	Argila	Silte	Areia fina	Areia média e grossa
Rio do Campo	4%	8%	26 %	62 %

Fonte: Adaptado de Umeki (2012).

Portanto, cerca de 0,137 kg/s das partículas são classificadas em partículas “de fundo” enquanto que 0,043 kg/s são partículas em suspensão.

Sendo assim, ao considerar a composição granulométrica dos sedimentos que adentram a armadilha, pode-se atribuir à mesma, eficiência mínima igual a 76%. Mínima porque parte das partículas suspensas pode ser “eliminada” pela comporta de descarga. De acordo com os resultados das simulações realizadas neste

trabalho, ao considerar a classificação das partículas de sedimento como “areia”, atribui-se eficiência de 100% à armadilha.

CONCLUSÕES

Com o estudo foi possível desenvolver uma alternativa viável para retardar o avanço do assoreamento do lago do parque Joaquim Teodoro de Oliveira de Campo Mourão, Paraná, que consiste em uma armadilha de sedimentos a ser instalada à montante do mesmo. Para isto, foi possível determinar as vazões média e máxima deste rio, assim como a contribuição da carga de sedimentos que chega até o parque.

A metodologia de dimensionamento de desarenadores: NBR 12213 (ABNT, 1992) mostrou-se eficaz ao ter seus princípios empregados no dimensionamento da armadilha de sedimentos desenvolvida.

A simulação numérica permitiu identificar possibilidades de melhorias no primeiro projeto desenvolvido. Depois das mudanças promovidas no projeto inicial e por meio de uma nova simulação numérica as melhorias puderam ser comprovadas, o que garante eficiência, comprova a importância da utilização da ferramenta empregada e conseqüentemente gera economia de recursos.

Por meio do estudo de Umeki (2012) foi possível identificar que 0,137 kg/s do total de 0,18 kg/s de sedimentos que adentra ao lago são compostos por partículas mais grossas, enquanto que 0,043 kg/s são sedimentos compostos por partículas em suspensão. Quando essa distribuição granulométrica é atribuída aos sedimentos captados pela armadilha, a mesma apresenta uma eficiência que pode ser denominada “eficiência mínima” igual a 76%. Opta-se pela utilização deste termo porque existe uma grande probabilidade de parte dos sedimentos em suspensão serem eliminados pela comporta de descarga e não adentrarem totalmente ao lago pelo vertedor.

Já com relação à eficiência observada por meio das simulações realizadas com um sedimento do tipo areia (diâmetro de partículas maior), tem-se a deposição total entre 75 e 100 segundos. Devido a esta característica e ao fato da massa de sedimento que sai pelo vertedor (que abastece o lago) ser nula, afirma-se que a eficiência da armadilha é igual a 100%.

Como este é um projeto flexível, que pode ser submetido a alterações para ser executado e implantado em outros lagos ou reservatórios, isto o transforma em uma ferramenta de controle de assoreamento.

Neste caso verificou-se que, para que a armadilha se ‘auto sustente’, a solução mais indicada é a de lançamento dos sedimentos no próprio Rio do Campo, logo após a barragem do lago, no entanto, a forma de descarte pode ser determinada de acordo com as características e disponibilidades de cada local.

REFERÊNCIAS

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 12213**: Projeto de captação de água de superfície para abastecimento público - procedimento. ABNT, 1992.

ALIGHALEHBABAKHANI, F.; MILLER, C. J.; SELEGEAN, J. P.; BARKACH, J.; SADATIYAN ABKENAR, S. M.; DAHL, T.; BASKARAN, M.. Estimates of sediment trapping rates for two

reservoirs in the Lake Erie watershed: Past and present scenarios. **Journal of Hydrology**, v.544, p.147-155, 2017. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.11.032>

CIEŚLA, M.; BARTOSZEK, L.; ROKOSZ, R. G.. Effectiveness assessment of a new system of sediment trap in the investigation of matter sedimentation in a reservoir: a case

study. **Hydrology**, v.6, n.2, 2019. DOI: <http://doi.org/10.3390/hydrology6020048>

ESPA, P.; BATALLA, R. J.; BRIGNOLI, M. L.; CROSA, G.; GENTILI, G.; QUADRONI, S.. Tackling reservoir siltation by controlled sediment flushing: Impact on downstream fauna and related management issues. **PLoS ONE**, v.14, n.6, 2019. DOI: <http://doi.org/10.1371/journal.pone.0218822>

KELNIAR, A. R.; KRUGER, F. R.; ARANTES, E. J.. Proposta para o Índice de Sustentabilidade da Bacia Hidrográfica do Rio do Campo, Campo Mourão, PR. **Periódico Eletrônico Fórum Ambiental da Alta Paulista**, v.12, n.6, 2016. DOI: <http://doi.org/10.17271/1980082712620161478>

MORRIS, G. L.. Classification of management alternatives to combat reservoir sedimentation. **Water**, v.12, n.3, 2020. DOI: <http://doi.org/10.3390/w12030861>

PRETZEL, L. D.. **Qualidade da água da bacia hidrográfica do Rio do Campo**: Aplicação do Modelo Matemático QUAL-UFMG. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2017.

RANIERI, L. A.; EL-ROBRINI, M.. Avaliação experimental de métodos de armadilhas de sedimentos para determinação do transporte costeiro da Praia da Romana, Ilha dos Guarás (Nordeste do Pará). **Geociências**, v.31, n.1, p.103-116, 2012.

SCHLEISS, A. J.; FRANCA, M. J.; JUEZ, C.; CESARE, G..

Reservoir sedimentation. **Journal of Hydraulic Research**, v.54, n.6, p.595-614, 2016. DOI: <http://doi.org/10.1080/00221686.2016.1225320>

SOUZA, L. B. S.; VILLELA, S. M.. Simulação Computacional do Assoreamento em uma Armadilha de Sedimentos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.11, n.4, p.163-174, 2006.

SOUZA, L. B. S.; VENÂNCIO, S. S.; MARTINS, J. C.; FILHO, J. E. A.; VILLELA, S. M.; PAULO, E.; SCHULZ, H. E.. Construção de uma armadilha de sedimentos em laboratório e análise do escoamento de água em seu interior com uso de velocimetria a laser. In: **DANS SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS**, 16. **Anais**. João Pessoa, 2005. p.13. DOI: <http://doi.org/0.13140/2.1.4842.3204>

TONIOLO, H.; SCHULTZ, J.. Experiments on sediment trap efficiency in reservoirs. **Lakes and Reservoirs: Research and Management**, v.10, n.1, p.13-24, 2005. DOI: <http://doi.org/10.1111/j.1440-1770.2005.00256.x>

UMEKI, K. L.. **Estudo do Transporte de Sedimentos na bacia hidrográfica Rio do Campo, Campo Mourão - PR**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2012.

ZANIBONI, N.; TSUTIYA, M. T.. Equipamentos e metodologia para o controle e redução de perdas reais em sistemas de abastecimento de água. **Revista DAE**, v.57, n.181, p.45-52, 2009. DOI: <http://doi.org/10.4322/dae.2014.041>

Os autores detêm os direitos autorais de sua obra publicada. A CBPC – Companhia Brasileira de Produção Científica (CNPJ: 11.221.422/0001-03) detêm os direitos materiais dos trabalhos publicados (obras, artigos etc.). Os direitos referem-se à publicação do trabalho em qualquer parte do mundo, incluindo os direitos às renovações, expansões e disseminações da contribuição, bem como outros direitos subsidiários. Todos os trabalhos publicados eletronicamente poderão posteriormente ser publicados em coletâneas impressas ou digitais sob coordenação da Companhia Brasileira de Produção Científica e seus parceiros autorizados. Os (as) autores (as) preservam os direitos autorais, mas não têm permissão para a publicação da contribuição em outro meio, impresso ou digital, em português ou em tradução.