

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INOVAÇÕES TECNOLÓGICAS

SABRINA AGUIAR DA SILVA

**PROJETO E MODELAGEM NUMÉRICA DE ARMADILHA DE  
SEDIMENTOS APLICADA AO LAGO DO PARQUE JOAQUIM  
TEODORO DE OLIVEIRA DE CAMPO MOURÃO - PARANÁ**

CAMPO MOURÃO

2020

SABRINA AGUIAR DA SILVA

**PROJETO E MODELAGEM NUMÉRICA DE ARMADILHA DE  
SEDIMENTOS APLICADA AO LAGO DO PARQUE JOAQUIM  
TEODORO DE OLIVEIRA DE CAMPO MOURÃO - PARANÁ**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Inovações Tecnológicas, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Inovações Tecnológicas.

Orientador: Prof. Dr. Eudes José Arantes.

CAMPO MOURÃO

2020



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite que outros remixem, adaptem e criem a partir do seu trabalho para fins não comerciais, desde que atribuam a você o devido crédito e que licenciem as novas criações sob termos idênticos.



---

## TERMO DE APROVAÇÃO

# PROJETO E MODELAGEM NUMÉRICA DE ARMADILHA DE SEDIMENTOS APLICADA AO LAGO DO PARQUE JOAQUIM TEODORO DE OLIVEIRA DE CAMPO MOURÃO - PARANÁ

por

SABRINA AGUIAR DA SILVA

Esta Dissertação foi apresentada às nove horas, do dia dezessete de setembro de dois mil e vinte como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Inovações Tecnológicas, Linha de Pesquisa Desenvolvimento Tecnológico em Saneamento e Recursos Hídricos, no Programa de Pós-Graduação em Inovações Tecnológicas – PPGIT, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

---

Prof. Dr. Eudes José Arantes  
(Orientador – PPGIT)

---

Prof.<sup>a</sup> Dra. Flávia Aparecida Reitz Cardoso  
(Membro Interno – PPGIT)

---

Prof. Dr. Alexandre Botari  
(Membro Externo – UEM)

Dedico aos meus pais, irmão e avó por acreditarem em mim.  
Em memória do meu querido avô, Pedro José de Aguiar (*in memoriam*) e dos meus queridos e saudosos amigos Willian Petsch e Higor Leonardo (*in memoriam*).

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus pelo dom da vida, por me proporcionar força, determinação, coragem, e por nunca me abandonar.

Agradeço aos meus pais Arnaldo Francisco da Silva, Simone Aguiar da Silva e à minha segunda mãe, minha avó Santa Nunes de Aguiar por nunca desistirem de mim e me proporcionarem todo apoio necessário. Também agradeço ao meu querido irmão, Diego Aguiar da Silva e aos meus avós Maria Jandira da Silva e José Francisco da Silva. Todos vocês são os pilares da minha existência, obrigada por se fazerem essenciais em minha vida.

Ao meu noivo, Wellinthon Henrique de Souza. Obrigada pela paz, cuidado e carinho que me proporciona, por todo amor que reluz em seus olhos, palavras e atitudes para comigo. Você é um homem incrível e eu sou extremamente grata por tanto.

Um agradecimento especial a minha querida amiga, Bianca Mendonça Rodrigues, que me deu grande apoio afetivo e colaborou com o desenvolvimento deste trabalho de forma excepcional. Também agradeço aos meus amigos Nicolle Kozielski, Thais Ribeiro, Matheus Korczovei, Leda Batelo, Patricia Davi e Gabriel Mendonça pelas risadas, amizade sincera e por trazerem calma em momentos difíceis. Vocês são família.

Ao meu orientador, professor doutor Eudes José Arantes, pelos ensinamentos paciência, apoio e dedicação durante todo o processo de desenvolvimento deste trabalho.

Um agradecimento especial ao professor doutor Alexandre Botari e professora doutora Flávia Aparecida Reitz Cardoso, que compõem a banca de avaliação. Obrigada por todas as considerações, contribuições e dedicação ao avaliarem este estudo.

Finalmente, eu sou extremamente grata à UTFPR - Campus de Campo Mourão, meu segundo lar, onde iniciei minha caminhada aos 14 anos. Aqui eu concluí o ensino médio técnico, a graduação, e agora o mestrado. Esta instituição é responsável por grande parte do meu desenvolvimento profissional e pessoal e por ela eu tenho um carinho imensurável. Torna-se difícil transpor em palavras tamanha gratidão.

Enfim, a todos, meu sincero muito obrigado!

## RESUMO

Partindo-se de resultados de estudos já realizados na bacia do Rio do Campo, este trabalho apresenta as etapas do desenvolvimento de uma proposta de solução para o avanço do assoreamento do lago do parque Joaquim Teodoro de Oliveira em Campo Mourão no Paraná, processo natural que atinge praticamente todos os reservatórios de água e que compromete sua capacidade de armazenamento. Inicialmente determinou-se que a vazão média do Rio do Campo é de 2,21 m<sup>3</sup>/s e que a contribuição da carga de sedimentos que chega até o lago é de, aproximadamente, 0,18 kg/s. Com base nestes dados deu-se início à concepção do projeto construtivo inicial da armadilha de sedimentos por meio da metodologia para dimensionamento de desarenadores (NBR 12213 (1992)), já que não encontrou-se, na bibliografia, uma metodologia específica e consolidada para o dimensionamento de armadilhas de sedimentos. Para verificar a eficiência do projeto inicial foi feito uso da modelagem numérica com base na fluidodinâmica computacional (pacote CFD), ferramenta que permite identificar problemas e erros de projeto antes que o mesmo seja executado, o que garante redução de custos, tempo e otimização do projeto ainda em fase de concepção. Os benefícios da ferramenta utilizada foram comprovados, já que foram identificadas 4 possibilidades de melhorias no projeto inicial: Aumento da largura de captação para eliminação de uma “zona morta” identificada na primeira simulação; Alteração da localização da comporta de descarga de sedimentos para aproveitar o sentido das linhas de corrente para facilitar a 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 de descarga, para diminuição da velocidade de descarga dos sedimentos. Sendo assim, as alterações no projeto foram providenciadas e, por meio dele, foi feita uma nova simulação. Os resultados da segunda simulação comprovaram os benefícios das alterações e os objetivos das mesmas puderam ser atingidos. Portanto, pode-se dizer que o projeto da armadilha de sedimentos desenvolvido é uma ferramenta eficaz de controle de avanço de assoreamento de lagos e reservatórios, já que a mesma apresenta eficiência mínima igual a 76% quando toda a distribuição granulométrica dos sedimentos é considerada e de 100% na retenção de sedimentos classificados como areia. Finalmente, é importante frisar que uma das premissas deste estudo é sua capacidade de adaptação para implantação em outros reservatórios, de acordo com as características particulares de cada local.

**Palavras Chave:** Assoreamento. Projeto. Armadilha de Sedimentos. Modelagem Numérica. Fluidodinâmica Computacional.

## ABSTRACT

Based on the results of studies already carried out in the Rio do Campo basin, this work presents the stages of the development of a solution proposal for the advancement of aggradation of the lake in the Joaquim Teodoro de Oliveira park in Campo Mourão, state of Paraná, a natural process that reaches virtually all water reservoirs and compromises its storage capacity. Initially it was determined that the average flow of the Rio do Campo is  $2.21 \text{ m}^3 / \text{s}$  and that the contribution of the sediment load that reaches the lake is approximately  $0.18 \text{ kg} / \text{s}$ . Based on these data, the conception of the initial constructive design of the sediment trap was initiated by means of the desander dimensioning methodology (NBR 12213 (1992)), since a specific and consolidated methodology was not found in the bibliography for the dimensioning of sediment traps. To check the efficiency of the initial project, numerical modeling was used based on computational fluid dynamics (CFD package), a tool that allows the identification of problems and design errors before it is executed, which guarantees reduction of costs, time and optimization of the project, while still in the design phase. The benefits of the tool used were proven by the identification of 4 possibilities for improvement in the initial project: Increased catchment width to eliminate a “dead zone” identified in the first simulation; Changing the location of the sediment discharge gate to take advantage of the direction of the current lines to facilitate the outflow of sediment; Elimination 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 speed. Therefore, changes in the project were provided and, through it, a new simulation was made. The results of the second simulation proved the benefits of the changes and the goals of the changes could be achieved. Therefore, it can be said that the sediment trap project developed is an effective tool for the control of advancing aggradation of lakes and reservoirs, since it has a minimum efficiency equal to 76% when the entire granulometric distribution of the sediments is considered and 100% in the retention of sediments classified as sand. Finally, it is important to emphasize that one of the premises of this study is its ability to adapt for implantation in other reservoirs, according to the particular characteristics of each location.

**Keywords:** Silting up. Project. Sediment Trap. Numerical Modeling. Computational Fluid Dynamics.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 1</b> - Etapas de processamento do CFD .....	30
<b>Figura 2</b> - Esquema em planta e corte da caixa de areia .....	33
<b>Figura 3</b> - Vista geral da armadilha de sedimentos experimental .....	36
<b>Figura 4</b> - Projeto simplificado da armadilha.....	36
<b>Figura 5</b> - Vertedor construído em acrílico .....	37
<b>Figura 6</b> - Mapa do lago do parque Joaquim Teodoro de Oliveira, Campo Mourão - PR.....	39
<b>Figura 7</b> - Uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica do Rio do Campo .....	40
<b>Figura 8</b> - Gráfico da curva de permanência do Rio do Campo.....	41
<b>Figura 9</b> - Segmentação da bacia hidrográfica do Rio do Campo em áreas de drenagem .....	41
<b>Figura 10</b> - Vertedor de parede delgada.....	43
<b>Figura 11</b> - Inclinação interna da armadilha de sedimentos .....	45
<b>Figura 12</b> - Incógnitas utilizadas para determinar o volume da armadilha .....	47
<b>Figura 13</b> - Forma geométrica segundo a seção transversal das barras.....	48
<b>Figura 14</b> - Caixa de transição com gradeamento .....	49
<b>Figura 15</b> - Sistemas de análise: Workbench 2020 .....	52
<b>Figura 16</b> - Etapas de simulação: Fluid Flow.....	53
<b>Figura 17</b> - Ambiente de geometria: SpaceClaim .....	53
<b>Figura 18</b> - Formatos de arquivo de importação de geometria aceitos pelo SpaceClaim .....	54
<b>Figura 19</b> - Geometria do volume interno da armadilha criado no SpaceClaim .....	54
<b>Figura 20</b> - Ambiente de criação de malha - Meshing .....	55
<b>Figura 21</b> - Detalhes: configurações de malha .....	56
<b>Figura 22</b> - Malha.....	57
<b>Figura 23</b> - Configurações: condições de entrada à armadilha .....	58
<b>Figura 24</b> - Configurações da simulação: definição da superfície de entrada.....	58
<b>Figura 25</b> - Configurações da simulação: definição da superfície de abertura.....	59
<b>Figura 26</b> - Configuração da simulação: definição da superfície de saída .....	59
<b>Figura 27</b> - Configurações da simulação: definição da superfície de saída de sedimentos.....	60
<b>Figura 28</b> - Configurações: controle de partículas .....	61
<b>Figura 29</b> - Configuração do solution: Start Run .....	62
<b>Figura 30</b> - Informações apresentadas em cada iteração .....	63
<b>Figura 31</b> - Nova geometria do volume interno da armadilha de sedimentos.....	64
<b>Figura 32</b> - Malha da nova geometria .....	65
<b>Figura 33</b> - Configurações de entrada: segunda simulação .....	66



<b>Figura 34</b> - Configurações da segunda simulação: definição da superfície de entrada .....	66
<b>Figura 35</b> - Configurações da simulação: nova superfície de saída de sedimentos.....	67
<b>Figura 36</b> - Segunda simulação: informações apresentadas em cada iteração .....	68
<b>Figura 37</b> - Posicionamento da armadilha de sedimentos .....	70
<b>Figura 38</b> - Detalhamento do captador de água.....	71
<b>Figura 39</b> - Detalhamento do vertedor .....	71
<b>Figura 40</b> - Detalhe da inclinação interna da armadilha de sedimentos .....	72
<b>Figura 41</b> - Medidas da armadilha: largura e comprimento internos e externos .....	73
<b>Figura 42</b> - Medidas da armadilha em corte (vista frontal - captação).....	74
<b>Figura 43</b> - Valores das incógnitas para determinação do volume interno .....	74
<b>Figura 44</b> - Vista em planta da caixa de transição e da tubulação.....	76
<b>Figura 45</b> - Vista lateral em corte da caixa de transição e do início da tubulação .....	76
<b>Figura 46</b> - Medidas internas da caixa de transição e do gradeamento .....	77
<b>Figura 47</b> - Diâmetros interno e externo da tubulação .....	78
<b>Figura 48</b> - Locação do canal de transporte de sedimentos e ponto final de descarte.....	79
<b>Figura 49</b> - Projeto em três dimensões da armadilha de sedimentos: lateral direita .....	80
<b>Figura 50</b> - Projeto em três dimensões da armadilha de sedimentos: lateral esquerda .....	80
<b>Figura 51</b> - Resultados da simulação .....	80
<b>Figura 52</b> - Velocidade das linhas de corrente .....	81
<b>Figura 53</b> - Simulação do preenchimento com sedimentos.....	82
<b>Figura 54</b> - Simulação do transporte de partículas .....	83
<b>Figura 55</b> - Alteração da largura do captador.....	84
<b>Figura 56</b> - Vista frontal em corte da armadilha de sedimentos após alterações .....	85
<b>Figura 57</b> - Nova localização da comporta de descarga dos sedimentos .....	85
<b>Figura 58</b> - Alteração no diâmetro da tubulação de descarga de sedimentos.....	86
<b>Figura 59</b> - Comparativo entre as simulações de linhas de corrente .....	88
<b>Figura 60</b> - Comparativo entre as simulações de preenchimento com sedimentos.....	89
<b>Figura 61</b> - Comparativo das simulações do transporte de partículas .....	90

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Trabalhos já desenvolvidos que abordam o estudo de armadilhas de sedimentos .....	16
<b>Tabela 2</b> - Equações utilizadas nas seções da metodologia.....	44
<b>Tabela 3</b> – Comparativo entre as variáveis modificadas no Projeto 2 em relação ao 1 .....	87
<b>Tabela 4</b> - Porcentagem do tamanho das partículas do sedimento do Rio do Campo .....	91

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>15</b>
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	<b>18</b>
<b>2.1 Objetivo Geral</b> .....	<b>18</b>
<b>2.2 Objetivos Específicos</b> .....	<b>18</b>
<b>3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>19</b>
<b>3.1 Sedimentação</b> .....	<b>19</b>
3.1.1 Fatores que influenciam o Processo Erosivo .....	19
3.1.2 Estudos Sedimentológicos .....	20
3.1.3 Transporte e Deposição de Sedimentos em Bacias Hidrográficas .....	22
3.1.4 Taxa de Sedimentação .....	23
<b>3.2 Assoreamento</b> .....	<b>23</b>
3.2.1 Tipos de Depósitos Sedimentares em Reservatórios .....	24
3.2.2 Assoreamento de Lagos e Reservatórios .....	24
3.2.3 Medidas para Controle de Assoreamento de Reservatórios .....	25
3.2.3.1 Controle preventivo .....	25
3.2.3.2 Controle corretivo .....	26
3.2.3.2.1 <i>Despejo de sedimentos dragados</i> .....	27
<b>3.3 Fluidodinâmica Computacional</b> .....	<b>28</b>
3.3.1 Definições Básicas de CFD .....	28
3.3.2 A Matemática do CFD .....	28
3.3.3 Aplicações e Metodologia do CFD .....	29
3.3.3.1 Aplicações .....	29
3.3.3.2 Metodologia .....	29
3.3.3.2.1 <i>Pré-processamento</i> .....	30
3.3.3.2.2 <i>Processamento</i> .....	31
3.3.3.2.3 <i>Pós-processamento</i> .....	31

<b>3.4 Armadilha de Sedimentos.....</b>	<b>32</b>
3.4.1 Desarenador ou Caixa de Areia.....	33
3.4.2. Desenvolvimento Experimental de uma Armadilha de Sedimentos .....	35
<b>4 METODOLOGIA .....</b>	<b>39</b>
<b>4.1 Caracterização da Bacia do Rio do Campo e do Lago.....</b>	<b>39</b>
4.1.1 Área da Bacia Hidrográfica do Rio do Campo.....	39
4.1.2 Vazão Média .....	40
4.1.3 Vazão Máxima .....	42
<b>4.2 Projeto Inicial da Armadilha de Sedimentos .....</b>	<b>42</b>
4.2.1 Escolha do Posicionamento.....	42
4.2.2 Dimensionamento da Captação de Água e do Vertedor.....	42
4.2.3 Inclinação interna .....	44
4.2.4 Cálculo das Dimensões e da Capacidade da Armadilha .....	45
4.2.4.1 Cálculo da área.....	46
4.2.4.2 Determinação da largura e do comprimento .....	46
4.2.4.3 Profundidade da armadilha.....	46
4.2.4.4 Capacidade de armazenamento de sedimentos.....	47
4.2.5 Descarga dos Sedimentos Retidos.....	48
4.2.5.1 Caixa de transição e gradeamento .....	48
4.2.5.2 Cálculo dos diâmetros da tubulação.....	49
4.2.5.3 Canal aberto de transporte.....	50
4.2.5.4 Destinação final dos sedimentos .....	50
<b>4.3 Modelagem Numérica: Primeira Simulação.....</b>	<b>50</b>
4.3.1 Workbench: <i>Fluid Flow</i> (CFX).....	51
4.3.1.1 Geometria .....	53
4.3.1.2 Malha.....	55
4.3.1.3 Configuração (CFX-Pre).....	57
4.3.1.4 Solução: Start Run.....	62

<b>4.4 Modelagem Numérica: Segunda Simulação .....</b>	<b>64</b>
4.4.1 Geometria.....	64
4.4.2 Malha.....	64
4.4.3 Configuração (CFX-Pre).....	65
4.4.4 Solução: <i>Start Run</i> .....	67
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>69</b>
<b>5.1 Caracterização da Bacia do Rio do Campo e do Lago.....</b>	<b>69</b>
5.1.1 Área da Bacia Hidrográfica do Rio do Campo.....	69
5.1.2 Vazão Média da Bacia do Rio do Campo .....	69
5.1.2 Vazão Máxima da Bacia do Rio do Campo .....	69
<b>5.2 Primeiro Projeto Construtivo da Armadilha de Sedimentos .....</b>	<b>69</b>
5.2.1 Posicionamento .....	70
5.2.3 Inclinação Interna.....	72
5.2.4 Dimensões e Capacidade da Armadilha.....	72
5.2.4.1 Área.....	72
5.2.4.2 Determinação da largura e do comprimento .....	72
5.2.4.3 Profundidade .....	73
5.2.4.4 Capacidade de armazenamento de sedimentos.....	74
5.2.5 Elementos que Promovem a Descarga dos Sedimentos Retidos.....	75
5.2.5.1 Caixa de transição e gradeamento .....	76
5.2.5.2 Determinação dos diâmetros e verificação da capacidade de vazão .....	78
5.2.5.3 Transporte e destinação final dos sedimentos .....	78
5.2.6 Apresentação da Armadilha de Sedimentos em Perspectiva.....	79
5.2.6.1 Perspectiva: lateral direita (caixa de transição).....	79
5.2.6.2 Modelagem em 3D: lateral esquerda.....	80
<b>5.3 Modelagem Numérica: Primeira Simulação.....</b>	<b>80</b>
<b>5.4 Alterações no Projeto Após Primeira Simulação .....</b>	<b>84</b>
5.4.1 Aumento das Dimensões da Captação .....	84

5.4.2 Alteração da Localização da Comporta de Descarga de Sedimentos .....	85
5.4.3 Aumento do Diâmetro da Tubulação de Descarga de Sedimentos .....	86
5.4.4 Eliminação da Inclinação Interna .....	86
<b>5.5 Tabela Comparativa: Alterações no projeto construtivo .....</b>	<b>87</b>
<b>5.6 Modelagem Numérica: Simulação Final .....</b>	<b>87</b>
<b>5.7 Eficiência da Armadilha de Sedimentos.....</b>	<b>91</b>
<b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>92</b>
<b>6.1 Sugestões para Trabalhos Futuros .....</b>	<b>93</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>94</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O assoreamento é responsável pela diminuição do volume de água de reservatórios e consequente redução da capacidade de geração de energia. Sua principal causa é o transporte de sedimentos pela água da chuva, que pode ser originado pelo solo exposto devido à retirada da vegetação e esgotamento do mesmo pelo uso inadequado. Todos os reservatórios estão fadados a ter a sua capacidade de armazenamento parcialmente ou totalmente tomada pelos sedimentos, e assorearem. Portanto, a análise do processo de assoreamento deve fazer parte das atividades dos projetos de construção e manutenção, sendo indispensável uma correta colocação dos órgãos de tomada de água, para prevenir eventuais dificuldades de operação, ou mesmo de interrupções no provisãoamento da água (CABRAL, 2005).

Observa-se a necessidade do desenvolvimento de técnicas para impedir ou ao menos conter o avanço do processo de assoreamento de reservatórios. Shen e Lai (1996) apontam 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.

Atualmente, encontram-se poucos estudos que envolvem o desenvolvimento de projetos aplicados com o auxílio da modelagem numérica. Alguns trabalhos que envolvem armadilhas de sedimentos e que são de grande relevância para este estudo são apresentados por meio da Tabela 1, já que abordam o estudo de armadilhas de sedimentos. Inclusive, os resultados obtidos por meio da tese de Souza (2006), comprovam a eficiência da captação de sedimentos com armadilhas de sedimentos, modeladas tanto numericamente quanto experimentalmente, o que motivou o desenvolvimento do projeto da armadilha de sedimentos e de sua modelagem.

Justifica-se, portanto, a importância da inovação tecnológica aplicada à fluidodinâmica, 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, reduzindo custos e tempo que as correções construtivas acarretariam.

**Tabela 1** - Trabalhos já desenvolvidos que abordam o estudo de armadilhas de sedimentos

Autores	Ano	Título
Souza, Venâncio, Martins, Filho, Villela e Schulz	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	2006	Estudo experimental e modelagem numérica do escoamento e do assoreamento em uma armadilha de sedimentos
Robrini	2012	Avaliação experimental de métodos de armadilhas de sedimentos para determinação do transporte costeiro da praia da Romana, ilha dos Guarás (nordeste do Pará)

Versteeg e Malalasekra (2007) definem a fluidodinâmica computacional como a análise de sistemas que envolvem escoamento de fluidos, transferência de calor e fenômenos associados, tais como reações químicas por meio do uso de simulações computacionais, ou seja, consiste em um conjunto de técnicas de simulação computacional utilizado para prever os fenômenos físicos ou físico-químicos que ocorrem em escoamentos.

É utilizado um *software* de CFD (*Computational Fluid Dynamics*), ou Dinâmica de Fluidos Computacional, por ser uma ferramenta de projeto industrial bem estabelecida e por inexistirem estudos divulgados de modelagem numérica de armadilha de sedimentos por meio da utilização desta ferramenta, o que contribui significativamente para o fator inovação deste trabalho.

De forma simplificada, Silva (2019) explica que o CFD funciona por meio da solução das equações de escoamento de fluidos sobre uma região de interesse, com condições de contorno especificadas (conhecidas) nas fronteiras daquela região. As equações que descrevem os processos de transferência de massa (que é o caso deste estudo) são conhecidas como equações de Navier-Stokes, equações diferenciais parciais que foram derivadas no início do século XIX e não possuem soluções analíticas, a não ser para situações muito simplificadas, mas que podem ser discretizadas para serem resolvidas numericamente na sua plenitude.

O método de solução mais comum utilizado nos códigos de CFD é o método dos volumes finitos. Neste método, a região de interesse é dividida em pequenas sub-regiões, chamadas de volumes de controle. Todas as equações são discretizadas e resolvidas iterativamente para cada volume de controle de modo a levar em consideração a interface com os demais volumes vizinhos ao volume de análise na malha computacional. Como resultado,



uma aproximação do valor de cada variável nos pontos específicos do domínio pode ser obtida. Desta maneira, é possível obter uma representação completa do comportamento do escoamento (SILVA, 2019).

Sendo assim, este trabalho apresenta a metodologia e as etapas de concepção e verificação do projeto de uma armadilha de sedimentos, onde foi constatada uma eficiência mínima de 76% ao considerar a composição dos sedimentos: 0,137 kg/s de sedimentos de “fundo” e 0,043 kg/s de sedimentos em suspensão e de 100% ao considerar o sedimento composto somente por partículas mais grossas como a areia. Esta última é verificada por meio dos resultados das simulações, já que todos os sedimentos que adentram a armadilha se depositam e saem pela comporta de descarga.

Além disto, as possibilidades de melhorias no projeto inicial puderam ser identificadas nos resultados da primeira modelagem, as modificações pertinentes foram promovidas e uma nova simulação (do novo projeto) foi realizada. Desta forma é possível realizar análises comparativas entre os resultados das duas simulações e observar o processo evolutivo do projeto construtivo.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

Propor uma alternativa para impedir a evolução do assoreamento do lago do Parque Joaquim Teodoro de Oliveira de Campo Mourão - Paraná por meio do desenvolvimento de projeto e modelagem numérica de uma armadilha de sedimentos.

### **2.2 Objetivos Específicos**

Para alcançar o objetivo geral apresentado, são definidos os seguintes objetivos específicos:

- Determinar a vazão do Rio do Campo com base na bibliografia desenvolvida até o momento.
- Determinar a contribuição da carga de sedimentos que chega até o lago do Parque Joaquim Teodoro de Oliveira para o processo de assoreamento.
- Desenvolver o projeto construtivo de uma armadilha de sedimentos em três dimensões.
- Modelar a armadilha de sedimentos projetada por meio de simulação fluidodinâmica (CFD), que deverá ser implantada à montante do lago.
- Sinalizar a localização do canal aberto responsável pelo transporte de sedimentos captados pela armadilha e a destinação final dos mesmos.

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo aborda os principais conceitos de assoreamento de lagos, tais quais aqueles relacionados aos processos de sedimentação. Está organizado de forma a abordar conceitos que envolvem o desenvolvimento da modelagem numérica de uma armadilha de sedimentos aplicada. Buscou-se abordar definições básicas e explicações essenciais da fluidodinâmica computacional, além da aplicação de barragens à contenção de sedimentos.

#### 3.1 Sedimentação

O autor Silva (2004) explica que o processo erosivo sedimentológico é um problema que acompanha a humanidade desde os primórdios e está diretamente relacionado à sedimentação, por se tratar de um processo que altera as características do solo, que serão apresentadas e explicadas nas próximas seções.

##### 3.1.1 Fatores que influenciam o Processo Erosivo

O processo erosivo sedimentológico é complexo, pois envolve fatores de ordem física, meteorológica e antrópica/cultural que influencia de forma e magnitude variável, de acordo com o local de ocorrência. Dentre os principais destes fatores estão o tipo de solo, o embasamento geológico, o clima, a topografia e a cobertura do solo (SILVA, 2004).

O solo é formado por partículas elementares, e, de acordo com Bertoni e Neto (1990), sua estrutura é a forma como estas partículas se arranjam e determina a facilidade ou dificuldade de trabalho das terras, permeabilidade e resistência à erosão. Além disto, a estrutura pode ser modificada por meio de práticas de manejo.

Além da estrutura do solo, outras características físicas também influenciam na resistência à erosão, como: taxa de infiltração; permeabilidade; porosidade; densidade; textura; tamanho e características químicas; existência/ausência de matéria orgânica e propriedades biológicas do solo (REICHARDT, 1987; WEIRICH NETO et al., 2002; ALVES et al., 2007).

Assim como explica Reichardt (1987), a taxa de infiltração é a lâmina de água (volume de água por unidade de área) que atravessa a superfície do solo, por unidade de tempo, e pode ser expressa em termos de altura da lâmina d'água ou volume d'água por unidade de tempo (mm/h).

A permeabilidade é a capacidade do solo de permitir que a água o atravesse, também pode ser descrita como a condutividade hidráulica do solo saturado. Esta característica tem relação direta com o tamanho das partículas, volume e distribuição dos poros e varia nos horizontes de determinado solo (BERTONI; LOMBARDI NETO, 1990).

Bertoni e Neto (1990) também definem a porosidade como a relação entre a proporção de espaço ocupado pelos fluidos e o espaço ocupado pela massa do solo. A porosidade de determinado solo é reduzida quando há diminuição no teor de matéria orgânica, compactação do solo ou ação do efeito do impacto das gotas de chuva. Estas três causas geram diminuição do tamanho dos agregados maiores, que acarreta na redução do tamanho dos poros.

Já a densidade do solo seco é a relação entre sua massa e volume total (volume de partículas sólidas e poros). A principal finalidade da densidade do solo é indicar o grau de compactação, e também pode ser utilizada para medir alterações na estrutura e porosidade do solo (REINERT; REICHERT, 2006).

Finalmente, a textura dos solos compreende a granulometria do solo e depende do material que o originou e dos agentes naturais de formação do mesmo (BERTONI; LOMBARDI NETO, 1990).

Para fazer uma análise completa da erosão de determinado solo, faz-se necessário fazer a análise integrada entre todos os fatores acima supracitados. Esta análise integrada fornece subsídios que contribuem para a compreensão geral do processo erosivo e fornecem bases sólidas para encontrar a melhor forma de manejar o solo e a sua cobertura, de modo a reduzir e até evitar os problemas causados com o transporte de sedimentos na bacia hidrográfica, especialmente o assoreamento dos cursos d'água e dos reservatórios (SILVA, 2004).

### 3.1.2 Estudos Sedimentológicos

No contexto aqui abordado, Carvalho (2008) explica que sedimento é a partícula derivada de rochas ou de materiais biológicos que pode ser transportada por fluido (como a água) do seu ambiente original para locais de deposição. Quando restrita aos cursos d'água e lagos, a sedimentologia (disciplina que estuda os sedimentos) denomina-se hidrossedimentologia e sua aplicação mais difundida é a avaliação do assoreamento e da vida útil de reservatórios.

A sedimentação envolve os processos de erosão, transporte e deposição (assoreamento) dos sedimentos. A erosão é a etapa inicial da sedimentação e envolve a separação das partículas das rochas e dos solos devido à ação de algum agente externo, como chuvas, ventos, etc.

(CARVALHO, 2008). Além disto, de acordo com Salomão (1991), a erosão pode decorrer de forma natural, resultante da influência de agentes naturais que degradam o solo, ou antrópica, quando é consequência de intervenções humanas sobre o meio físico, como desmatamento, agricultura, expansão urbana desordenada, etc.

Carvalho (2000) ressalta o fato de a erosão antrópica ser cerca de cem vezes mais agravante, com a interferência humana, do que seria considerando apenas termos geológicos. Muller (1995) salienta que a erosão é um problema duplo: ao mesmo tempo em que dilapida camadas férteis de solo de modo a prejudicar terrenos utilizados para a agricultura, a deposição dos materiais erodidos em leitos de rios e reservatórios interfere e compromete a utilização dos mesmos. Além disto, os sedimentos originados em processos erosivos também podem ser veículos de poluentes como fertilizantes e produtos químicos.

Cabe salientar a respeito dos diversos problemas causados pelo transporte de sedimentos em cursos d'água e reservatórios, como o aumento do custo do tratamento da água, desequilíbrio do balanço de oxigênio dissolvido na água, danos no crescimento e desenvolvimento de espécies aquáticas (devido ao aumento da turbidez), diminuição da capacidade de armazenamento e redução do potencial de geração de energia elétrica (BARROSO; SILVA, 1992).

Miranda (2011) diz que após ocorrerem os processos de erosão, os sedimentos originados são transportados. Estudar e conhecer as características deste transporte é de suma importância para caracterizar a bacia hidrográfica, quantificar os impactos causados pelas ações humanas na região e, principalmente, para estimar a sedimentação de corpos hídricos.

Todos os cursos d'água são capazes de transportar sedimentos em forma de suspensão, arraste, saltação, rolamento (escorregamento) ou pela combinação de alguns destes (BRANCO; ROCHA, 1977). Nagle et al. (1999) explicam que a forma como o sedimento é transportado depende do tipo e das características do mesmo, ou seja, sedimentos de maior granulometria movimentam-se como carga de fundo, enquanto que sedimentos menores ficam em suspensão na coluna d'água.

Muller (1995) explica que o valor de saturação é a capacidade máxima de transporte de sedimentos dos corpos hídricos e depende da vazão e da declividade do curso d'água, além do tipo, granulometria e peso específico do sedimento. Quando o valor de saturação é maior que a quantidade de sedimentos transportada há a formação de depósitos nos corpos hídricos e quando este valor é menor, há a tendência de processos erosivos nas margens e leitos destes corpos.

Apesar de todo desenvolvimento científico, ainda é difícil estimar precisamente a quantidade de sedimento transportada pelos rios porque medir o material sólido que é carregado

por um curso d'água é mais custoso e complexo que medir o volume líquido (MCCULLY, 2001).

### 3.1.3 Transporte e Deposição de Sedimentos em Bacias Hidrográficas

Zachar (1982) explica que o modo como uma bacia hidrográfica se comporta em relação ao sedimento varia conforme diversos fatores, tais como: características das rochas e dos solos, cobertura vegetal, declividades, regime de chuvas, dentre outros.

Normalmente os sedimentos são depositados no leito dos lagos e reservatórios ao serem carregados pelas enxurradas da bacia de contribuição ou por ocorrer a deposição de matéria orgânica em decomposição, originada na bacia ou na água (SILVA, 2004).

Paiva (2003) explica que a construção de um lago originado em determinado curso d'água favorece a deposição de sedimentos e conseqüente assoreamento devido à alteração gerada nas características hidráulicas do trecho do rio. Isso ocorre devido ao aumento da área molhada, conseqüentemente ocorre a diminuição da velocidade média, de modo a desacelerar o movimento das partículas sólidas na direção do escoamento e gerar sua deposição ao longo do reservatório. Deste modo, as partículas maiores se depositam na entrada do reservatório e as menores podem permanecer em suspensão ou se depositar em posições mais baixas, podendo chegar às estruturas de descarga.

Parte do sedimento que chega aos cursos d'água é conduzida em suspensão, principalmente àquele de granulometria mais fina, juntamente com materiais já dissolvidos. Existem, portanto, duas frações que compõem os sedimentos em suspensão: Sólidos particulados e sólidos dissolvidos e nestes englobam-se tanto a fração mineral como a fração orgânica do sedimento. Os sólidos sedimentáveis compõem parte do volume total de sedimento carregado e consistem de particulados que decantam no momento em que a água fica em estado de estagnação. Servem como indicador físico da qualidade da água, já que dependem do aporte de sedimentos nos cursos d'água (SILVA, 2004).

Scapin (2005) cita alguns dos diversos problemas gerados pelo transporte de sedimentos em cursos d'água, como:

- Assoreamento de rios: diminui navegabilidade e aumenta as dimensões de enchentes.
- Assoreamento de reservatórios: diminui vida útil e gera necessidade de dragagens periódicas (custo elevado).

- Inviabilidade de rios para abastecimento e/ou irrigação, a depender da quantidade de sedimento transportada.
- Contaminação do leito e das águas dos cursos d'água.
- Turbidez, alteração na fonte de alimentação e habitat para a fauna.
- Retenção de produtos tóxicos nas águas dos lagos e reservatórios.

Os problemas acima explicitados podem ser agravados quando o desenvolvimento e consequente aumento da taxa de ocupação do espaço geográfico são maiores. Mesmo assim, existe pouca pesquisa no ramo da hidrossedimentologia, provavelmente devido ao fato das consequências geradas não ocorrerem imediatamente e os trabalhos, onerosos, exigirem elevado tempo e esforço (BEASLEY, 1972; CARVALHO, 1994).

#### 3.1.4 Taxa de Sedimentação

A taxa de sedimentação é a quantidade de material, orgânico e/ou mineral depositado pela água no leito do curso d'água ou reservatório de água e determinado intervalo de tempo. Pode ser medida em termos de acumulação vertical, ao longo do tempo ou por meio da medição da densidade de sedimentos por unidade de área ao longo do tempo. Os metais são transferidos para os sedimentos por adsorção sobre a matéria em suspensão e posterior sedimentação (SHUCHUN et al., 2009).

Sabará e Barbosa (2007) explicam que como causa do aumento da taxa de sedimentação pode-se citar a substituição de vegetação nativa por agricultura intensiva, crescimento populacional e o uso e ocupação do solo de bacias hidrográficas.

O transporte e a deposição de sedimento em cursos d'água degradam o canal de modo a alterar as características físicas e químicas da água do rio. Com relação aos aspectos positivos enquanto processo natural, a sedimentação atua como agente fertilizador das várzeas ribeirinhas e contribui para o aumento de produção agrícola nestas áreas, quando for o caso (SCAPIN, 2005).

### 3.2 Assoreamento

Como o principal objetivo deste estudo é avaliar a implantação de uma armadilha de sedimentos no lago do parque Joaquim Teodoro de Oliveira para avaliar sua eficiência no

problema de assoreamento deste lago, que ameaça extingui-lo, cabe apresentar as principais teorias e conceitos relacionados ao tema.

### 3.2.1 Tipos de Depósitos Sedimentares em Reservatórios

Carvalho (1994) explica que os sedimentos depositados no fundo dos lagos os alteram fisicamente, além de prejudicar a fauna e a flora do leito, de modo a exercer reflexos ambientais em todo o curso d'água. Além disto, com relação ao modo como as partículas dos sedimentos são depositadas, as frações menores, a depender da energia e da viscosidade do meio, serão depositadas no trecho inferior do reservatório ou permanecerão em suspensão.

Os depósitos de remanso são àqueles depositados acima do nível de água represado junto à barragem, o escoamento ocorre com menor velocidade. Quando o nível d'água do reservatório diminui, parte do material depositado em remanso pode ser removida e transportada para dentro do ambiente lacustre. Já os depósitos denominados deltaicos podem ser totalmente constituídos por sedimentos como areias ou conter grande volume de partículas menores, como silte. A maioria das partículas se movimenta por arraste, enquanto que uma pequena parcela fica em suspensão. Quanto mais lento o fluxo e menor o tamanho das partículas, mais para o interior do reservatório a deposição ocorre (SILVA, 2007).

### 3.2.2 Assoreamento de Lagos e Reservatórios

Silva (2007) explica que estudar os processos de erosão, transporte de partículas em cursos d'água e deposição dos sedimentos é de grande importância para estimar a vida útil de reservatórios em processo de assoreamento. Este estudo é feito por meio da análise da fragilidade do solo e do sedimento depositado.

Conforme citado anteriormente, a capacidade de armazenamento de um reservatório é proporcional ao aumento da deposição de sedimentos no mesmo. Além disto, a influência do remanso aumenta para montante, assim como os sedimentos passam a escoar para a jusante quando as velocidades (vazão) no lago aumentam e conseqüentemente ocorre a diminuição de retenção de partículas. Portanto, é notória a influência da evolução do fundo de um reservatório sobre a geometria do mesmo, assim como o tamanho do material que é depositado. (MORRIS; FAN 1997).



### 3.2.3 Medidas para Controle de Assoreamento de Reservatórios

Nesta seção serão apresentadas algumas definições abordadas no Guia de Avaliação de Assoreamento de Reservatórios. Este guia foi desenvolvido pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) em Brasília, no ano de 2000.

Conforme aborda o Guia Ava (2000), as previsões e as medições sedimentológicas servem para identificar possíveis assoreamentos de reservatórios e necessidades de controle do sedimento para amenização dos efeitos. No entanto, realizar o controle de sedimentos traz consigo diversas implicações, como meio de proteger obras e patrimônios existentes nas áreas de sedimentação. Grande parte das medidas de amenização é complexa, já que o sedimento é derivado de toda erosão existente na área de drenagem da barragem, normalmente de difícil acesso pelo órgão responsável pelo aproveitamento. Geralmente, somente um plano de governo pode executar um programa de controle de erosão em toda a bacia hidrográfica.

Os programas de controle de sedimento são formados por membros com o objetivo de proteger as margens dos rios e reservatórios para diminuir a entrada dos sedimentos no sistema. Os programas de prevenção de sedimentação de reservatórios são os de maior importância, enquanto que as medidas corretivas devem ser efetuadas apenas onde já não existe alternativa.

A seguir serão apresentados alguns dos principais conceitos relacionados ao controle preventivo e ao controle corretivo de sedimentos propostos pelo Guia Ava (2000).

#### 3.2.3.1 Controle preventivo

De acordo com CIGB (ICOLD, 1989), a principal medida preventiva no controle de sedimentos diz respeito às regiões das cabeceiras dos rios (alta bacia), que contribui significativamente no escoamento, mas pouco com carga sólida. Portanto, é de suma importância preservar a vegetação nestas regiões para que não haja grande produção de sedimentos.

A seguir serão apresentadas algumas das medidas preventivas que devem ser utilizadas em todas as fases: inventário, viabilidade, projeto e operação:

- *Seleção do local do aproveitamento:* selecionar o local com menos aporte de sedimentos. Esta escolha dependerá dos custos financeiros para proteger a área mais desprotegida.

- *No projeto do reservatório:* é necessário prever o volume morto adequado e o volume reservado para sedimento, para isto, promove-se o aumento da altura da barragem. Além disso, é importante prever o descarregador de sedimento com comporta, e cabe ressaltar que usinas afastadas da barragem requerem de desarenador após a tomada d'água.
- *Controle de erosão na bacia:* é o mais eficiente, mas de difícil aplicação pelo barrageiro. Pode ser feito por meio de conservação e manejo do solo na agricultura (práticas vegetativas, edáficas ou mecânicas) ou em estradas, cidades ou obras diversas (proteção de taludes, obras de drenagem, controle de erosão em ravinas e voçorocas).
- *Controle de erosão nos cursos d'água e margens de reservatórios:* este controle é feito em calhas e desbarrancamentos por meio da proteção com vegetação ciliar ou proteção estrutural (enrocamento, espigões, etc.).
- *Controle da afluência de sedimento já na calha:* por meio de barragens a montante, que pode ser submersa (caso seja o caso), onde deve se retirar periodicamente o sedimento retido; Por meio de rede de vegetação; Pela promoção do desvio de enchentes para área de inundação, onde utiliza-se as bacias de decantação.
- *Controle de deposição de sedimentos:* pode ser realizado por meio de descarregador com comporta (por correntes de densidade para descarregar os sedimentos de fundo); Por depleção do reservatório, onde uma grande depleção do reservatório gera o escorregamento dos depósitos para o volume morto; Por operação planejada do reservatório, por meio de softwares e programas específicos que visam prever a acomodação do sedimento.

### 3.2.3.2 Controle corretivo

Já o controle corretivo do assoreamento é conhecido por basear-se em medidas mitigadoras, caras e repetitivas, é feito na fase de operação do aproveitamento. Normalmente existem mais sedimentos depositados que o previsto pelo operador (quando não é implementada a fase de monitoramento), já que submersos crescem lentamente.

A seguir serão apresentadas algumas das medidas corretivas do controle de sedimento e do assoreamento de reservatórios:

- *Remoção do sedimento do reservatório:* pode ser feita por meio de dragagem (eventualmente e quase permanente), por obras de derivação by-pass (canal ou conduto), por sinfonagem (sobre a barragem ou retirando sedimentos mais distantes pelo descarregador de fundo), ou por descarregador de fundo (sua construção pode tornar-se necessária depois que a barragem está pronta).
- *Alteamento da barragem:* neste caso em específico, é necessário dimensionar adequadamente o alteamento, já que este promoverá o aumento do nível e do espelho d'água.

#### 3.2.3.2.1 *Despejo de sedimentos dragados*

Cabe reservar uma seção deste capítulo para abordar a respeito de uma das medidas corretivas mais implantadas em lagos em processo de assoreamento: a dragagem, que também foi implantada por determinado período de tempo no lago objeto deste estudo.

A realização de dragagens apresenta custo elevado, portanto, pode ser mais viável aumentar a altura da barragem, caso seja o caso. Normalmente as dragagens são feitas em pequenos reservatórios para aliviar problemas causados por depósitos em certas posições, por exemplo, no pé da tomada d'água.

Existem diversos tipos de equipamentos para retiradas dos depósitos de sedimentos: o sistema pneumático (*air-lift*), mecânico (*drag-line* ou *clam-shell*) e as dragas de sucção e recalque, que utilizam bombas centrífugas para executar o transporte hidráulico do material (Engevix, 1980). É muito importante procurar o equipamento adequado para cada caso, permitindo maior economia.

Realizar dragagens traz consigo um grande problema: encontrar uma posição de despejo do material dragado. Isto se deve ao fato dos sedimentos serem poluentes em potencial (contém impurezas, como lixo) ou ao elevado custo do transporte para fontes de aproveitamento. Depositar este material na margem do reservatório, na área mais próxima do local de dragagem, ou jogar para o canal de jusante da barragem, pode se tornar uma solução inadequada. No primeiro caso a maior parte do sedimento pode retornar em curto prazo, nas primeiras chuvas, para o reservatório. No segundo caso, vai criar problemas diversos a jusante, incluindo o assoreamento do canal.

### 3.3 Fluidodinâmica Computacional

Vesteege e Malalasekra (2007) explicam que a fluidodinâmica computacional é a análise de sistemas que envolvem escoamento de fluidos, transferência de calor e fenômenos associados, tais como reações químicas por meio de simulações computacionais. Patankar (1980) complementa essa explicação ao definir a fluidodinâmica computacional como um conjunto de técnicas de simulação computacional usado para prever fenômenos físicos ou físico-químicos que ocorrem em escoamentos. De forma sucinta, Mitre (2018) resume a definição em questão como sendo um conjunto de técnicas numéricas para obter a solução de equações matemáticas que descrevem um problema de interesse.

Para compor a fundamentação teórica relacionada à fluidodinâmica computacional, serão abordadas algumas definições da ferramenta CFD (*Computational Fluid Dynamics*), ou Dinâmica de Fluidos Computacional, ferramenta baseada em computação que simula o comportamento de sistemas que envolvem escoamento de fluidos, transferência de calor e outros processos físicos relacionados, utilizada para modelar numericamente a armadilha de sedimentos desenvolvida neste estudo.

#### 3.3.1 Definições Básicas de CFD

Silva (2019) explica que o CFD funciona por meio da solução das equações de escoamento de fluidos (em uma forma especial) sobre uma região de interesse, com condições de contorno especificadas (conhecidas) nas fronteiras daquela região. Atualmente é uma ferramenta de projeto industrial bem estabelecida reduz os tempos de projeto e melhora processos de engenharia. Além disso, fornece uma alternativa de custo-benefício e precisão aos testes experimentais aplicados a modelos em escala, com variações entre as simulações sendo realizadas rapidamente.

#### 3.3.2 A Matemática do CFD

O conjunto de equações que descreve processos de quantidade de movimento, transferência de calor e transferência de massa são as equações de Navier Stokes, equações diferenciais parciais sem soluções analíticas (somente em situações muito simplificadas), mas que podem ser discretizadas e resolvidas numericamente (SILVA, 2019).

Equações que descrevem outros processos podem ser resolvidas em conjunto com as equações de Navier Stokes. É utilizado um modelo de aproximação para derivar estas equações adicionais. A formulação Euleriana e Lagrangeana é utilizada para tratar de forma acoplada fluidos que carregam partículas ou gotas de líquidos em meio a um fluido principal.

Silva (2019) explica que o método mais utilizado nos códigos de CFD é o Método dos Volumes Finitos. Neste método, a região de interesse é dividida em pequenas sub-regiões, os chamados volumes de controle. Todas as equações são discretizadas e resolvidas iterativamente para cada volume de controle e leva-se em consideração a interface com os demais volumes vizinhos ao volume de análise na malha computacional. Como resultado, uma aproximação do valor de cada variável nos pontos específicos do domínio pode ser obtida. Assim, obtém-se uma representação completa do comportamento do escoamento.

### 3.3.3 Aplicações e Metodologia do CFD

Abordadas por Silva (2019), a seguir estão algumas das aplicações do pacote CFD e a metodologia na qual o mesmo se baseia.

#### 3.3.3.1 Aplicações

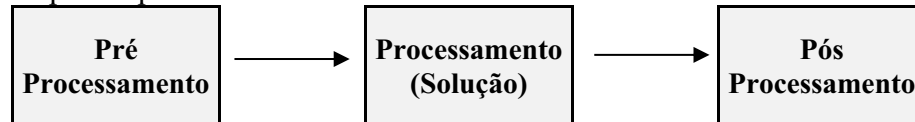
Cabe ressaltar que neste estudo o pacote aplica-se em meio ambiente: dispersão de poluentes no ar e na água (não necessariamente os sedimentos classificam-se como poluentes).

- *Indústria de processos*: Misturadores e reatores químicos.
- *Saúde e segurança*: Investigação dos efeitos do fogo e da fumaça.
- *Indústria automobilística*: Modelagem de combustão e aerodinâmica de veículos.
- *Eletrônica*: Transferência de calor em circuitos eletrônicos.
- *Meio ambiente*: Dispersão de poluentes no ar ou na água.
- *Energia*: Otimização de processos de combustão.
- *Medicina*: Escoamento de sangue pelas veias e artérias.

#### 3.3.3.2 Metodologia

O CFD pode ser utilizado para determinar o comportamento de um componente em fase de projeto ou identificar dificuldades do mesmo já implantado e propor melhorias no projeto, de forma a possibilitar a previsão de possíveis problemas e orientar o andamento do projeto de equipamentos e processos. Normalmente, uma simulação realizada por meio do CFD é constituída por três etapas bem definidas, representadas por meio da Figura 1.

**Figura 1** - Etapas de processamento do CFD



Fonte: Silva (2019).

A seguir, conforme abordado por Silva (2019), será explanado o que compõe cada uma destas etapas de processamento.

#### 3.3.3.2.1 Pré-processamento

O pré-processamento é a etapa de definição e configuração do problema a ser analisado. Esta etapa pode ser dividida em duas partes:

- Geometria/malha.
- Definição da física do problema.

Definir a geometria e a malha do objeto de modelagem compõe o primeiro estágio do pré-processamento. Basicamente insere-se no *software* um sólido geométrico fechado e é produzida, com base no mesmo, uma malha para que a verdadeira física do problema possa ser introduzida no pré-processador. Cabe ressaltar que ambas (geometria e malha) podem ser geradas por meio do *software* ICEM-CFD, incorporado ao pacote da Ansys, mas também podem ser feitas por meio de qualquer outra ferramenta de criação de geometria e de malha compatíveis ao CFD, tais como alguns softwares de CAD (Computer Aid Design).

Os básicos e principais passos que envolvem este processo inicial consistem, portanto, na definição da geometria na região de interesse, criação de regiões de escoamento de fluidos, regiões de sólidos e nomenclaturas às superfícies de contorno e configuração das propriedades da malha, além dos ajustes.

O segundo estágio do pré-processamento consiste na definição da física do problema, utilizado para gerar os dados de entrada do *solver*. Os arquivos de malha são carregados pelo pré-processador da física do problema e as seguintes propriedades são definidas:

- Os modelos físicos a ser incluídos na simulação são selecionados.
- As propriedades do fluido são especificadas.
- As condições de contorno são especificadas.

#### 3.3.3.2.2 *Processamento*

O componente que resolve o problema de CFD de forma a gerar os resultados solicitados é o *solver*. Esta etapa de solução compõe um processo não iterativo.

Primeiramente as equações diferenciais parciais são integradas sobre todos os volumes de controle na região de interesse, o que corresponde à aplicação de uma lei de conservação para cada volume de controle. Assim, estas equações integrais são convertidas para um sistema de equações algébricas por meio de um conjunto de aproximações para os termos das equações integrais e finalmente as equações algébricas podem ser resolvidas iterativamente.

Este processo iterativo é necessário devido a não linearidade das equações. Diz-se que conforme uma solução se aproxima da solução exata, a mesma converge para a mesma e para cada iteração, um erro (resíduo) é registrado como medida da conservação geral das propriedades do escoamento.

Reconhecer a proximidade da solução com a solução exata depende de fatores como tamanho e formato dos volumes de controle e tamanho dos resíduos finais. Frequentemente processos físicos complexos como combustão e turbulência são modelados por meio de relações empíricas e as aproximações a eles inerentes contribuem para as diferenças entre a solução obtida por CFD e o escoamento real. No entanto, cabe salientar que os resultados obtidos com CFD são muito próximos das situações reais e confiáveis, desde que devidamente testados.

Nesta etapa de processamento não é necessária intervenção do usuário e o *solver* produz um arquivo de resultados que é passado para o pós-processador.

#### 3.3.3.2.3 *Pós-processamento*

Finalmente, a etapa de pós-processamento serve para análise, visualização e apresentação dos resultados de forma interativa. Além disto, inclui a obtenção de valores em pontos do domínio e a realização de animações complexas. Algumas das características importantes da etapa de pós-processamento são:

- Visualização da geometria e volumes de controle.
- Visualização de vetores que mostram a direção e a magnitude do escoamento.
- Visualização da variação de variáveis escalares (temperatura, concentração de espécies químicas, pressão, propriedades, etc.) ao longo do domínio.
- Cálculos numéricos quantitativos.
- Animação.
- Gráfico  $(x, y)$ .
- Saída para impressora.

### **3.4 Armadilha de Sedimentos**

Nesta seção serão apresentados alguns conceitos relacionados à armadilha de sedimentos. Como o desenvolvimento do projeto da mesma foi feito com base nos princípios do desarenador (caixa de areia), uma das instalações que compõe uma captação de água, primeiramente serão abordados alguns princípios do mesmo.

Tsutiya (2006) explica que para captar água em cursos de água, é necessário um conjunto de estruturas e dispositivos, construídos ou montados em um manancial para promover a retirada de água e destiná-la a um sistema de abastecimento. A citação do autor é normativa: NBR 12213 (1992) - Projeto de captação de água de superfície para abastecimento público. Geralmente os elementos que constituem uma captação são:

- Barragem, vertedor ou enrocamento.
- Tomada de água.
- Gradeamento.
- Desarenador.
- Dispositivos de controle. Canais e tubulações.

A seguir serão apresentadas somente as principais definições e concepções do desarenador apresentadas por Tsutiya (2006) e recomendadas pela NBR 12213 (1992).



### 3.4.1 Desarenador ou Caixa de Areia

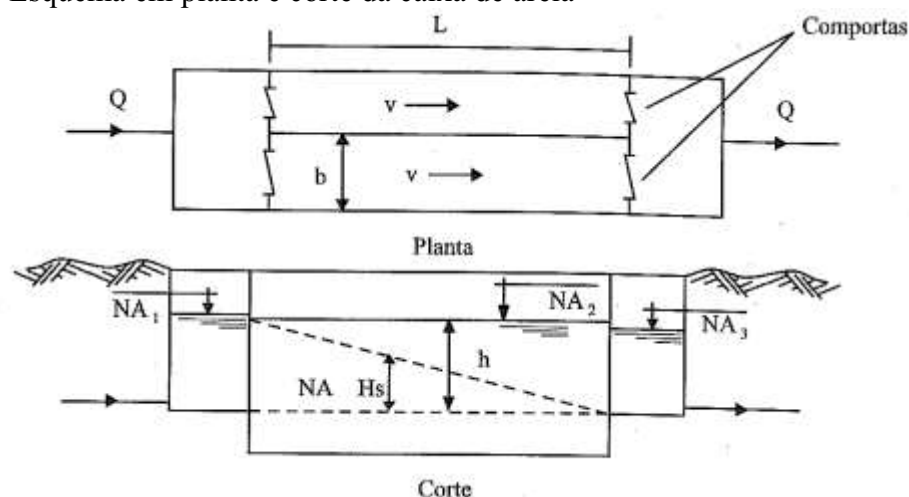
Muitos cursos de água carregam grande quantidade de areia em suspensão, que não deve ir para o sistema, portanto deve ser promovida uma retenção, que é feita por meio de desarenador ou caixa de areia, que são dispositivos por onde as águas passam com velocidade reduzida e onde ocorre o processo de sedimentação.

O desarenador é instalado preferencialmente próximo à tomada de água e pode ser de nível constante ou variável, dimensionado segundo alguns critérios:

- Velocidade crítica de sedimentação das partículas igual ou inferior a 0,021 m/s.
- Velocidade de escoamento longitudinal igual ou inferior a 0,30 m/s.
- Comprimento do desarenador, obtido pela aplicação dos critérios acima descritos e multiplicado por um coeficiente de segurança de, no mínimo, 1,50.

Além destes critérios, no dimensionamento do desarenador de nível variável, devem ser consideradas as condições para os níveis máximo e mínimo. A Figura 2 representa o esquema (em corte e planta) de uma caixa de areia.  $Q$  representa a vazão e  $V_s$  a velocidade de sedimentação de uma partícula de areia.

**Figura 2** - Esquema em planta e corte da caixa de areia



Fonte: Tsutiya (2006).

Uma partícula que na entrada da caixa de areia de profundidade  $h$  esteja na superfície da água se depositará ao longo do comprimento  $L$  da mesma, com tempo de percurso  $t$  e velocidade  $V_s$ . Como  $V$  é a velocidade do fluxo ao longo da caixa de areia, tem-se:

$$V_S = \frac{h}{t} \quad (1)$$

$$V = \frac{L}{t} = \frac{Q}{b \cdot h} \quad (2)$$

Pela Equação (2), obtém-se:

$$h = \frac{Q \cdot t}{b \cdot L} \quad (3)$$

Substituindo a Equação (3) na Equação (1), obtém-se:

$$V_S = \frac{Q}{b \cdot L} \quad (4)$$

Como  $b \cdot L = A$ , a área em planta, tem-se:

$$V_S = \frac{Q}{A} \quad (5)$$

Portanto, a taxa de aplicação em  $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{s}$  é a velocidade de sedimentação da partícula. A área da caixa de areia é obtida por meio da divisão da vazão afluyente pela velocidade de sedimentação da partícula.

Para obter as outras dimensões da caixa de areia, como  $L$ ,  $b$  e  $h$ , consideram-se:

- Relação  $L/b \geq 4$ , para evitar que curtos circuitos na caixa de areia reduzam a sua eficiência.
- Velocidade de escoamento na caixa de areia  $\leq 0,3$  m/s.
- A largura  $b \geq 0,5$  m, para possibilitar facilidades de construção e operação.
- As dimensões da caixa de areia devem ser compatíveis com o terreno disponível e com a topografia local.

A remoção de areia pode ser feita hidraulicamente por meio de descarga por tubo instalado ou por demais equipamentos, tal como bombas do tipo draga. Caso esta remoção seja feita por processo manual, atenta-se às seguintes recomendações:

- Depósito capaz de acumular o mínimo equivalente a 10% do volume do desarenador.
- Largura mínima que permita acesso livre e movimentação do operador e do equipamento auxiliar de limpeza.

O desarenador pode ser dispensado quando for comprovado que o transporte de sólidos sedimentáveis não prejudica o sistema.

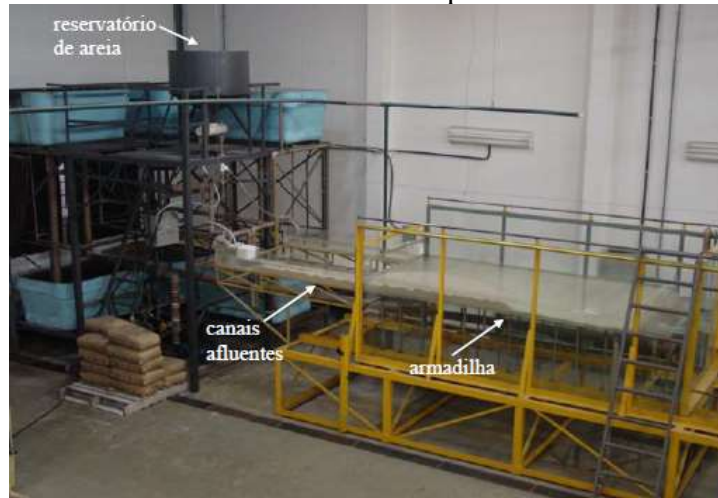
#### 3.4.2. Desenvolvimento Experimental de uma Armadilha de Sedimentos

Pode-se dizer que atualmente existem poucos estudos que envolvem armadilhas de sedimentos e suas aplicações. No entanto, Souza (2006) realizou um estudo experimental e modelou numericamente (por meio do *software* MIKE 21C) uma armadilha de sedimentos para análises de escoamento e assoreamento na mesma. Portanto, serão retratadas nesta seção algumas das principais concepções do desenvolvimento experimental de uma armadilha de sedimentos, que envolvem os elementos que a constituem e a sua funcionalidade, propostos pelo autor acima citado.

Souza (2006) desenvolveu, experimentalmente, uma armadilha de sedimentos em acrílico e aproveitou, em parte, o equipamento construído durante o desenvolvimento do trabalho de Barbosa (1999), utilizado e modificado por Silva (2002), sobre estudos de correntes de densidade em reservatórios. Optou-se por desenvolver uma armadilha de sedimentos com paredes e fundo em acrílico para permitir a observação da deposição de areia por meio de fotografias tiradas de diferentes ângulos, ao longo do processo de assoreamento.

Por meio da Figura 3 tem-se uma vista geral da armadilha construída e em operação.

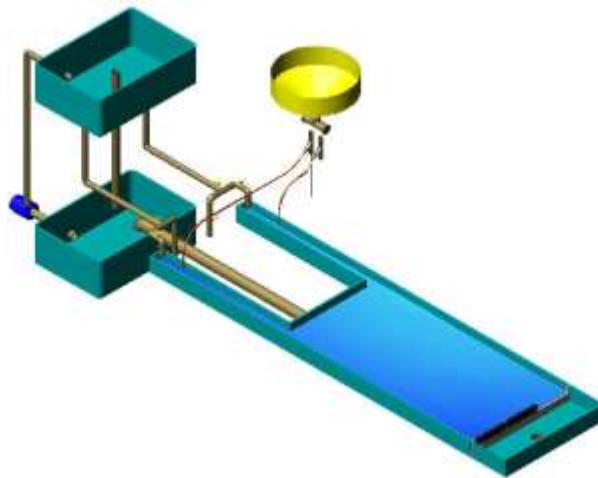
**Figura 3** - Vista geral da armadilha de sedimentos experimental



Fonte: Souza (2006).

A mesma armadilha de sedimentos é apresentada de forma simplificada na Figura 4.

**Figura 4** - Projeto simplificado da armadilha



Fonte: Souza (2006).

Observa-se que as paredes laterais e o fundo da armadilha de sedimentos foram construídos em acrílico, sendo este construído com várias placas para possibilitar sua montagem com diferentes ângulos de inclinação ao longo do comprimento da armadilha, para melhor representação de um reservatório real, formado por barragem. Para reproduzir a funcionalidade de uma armadilha de sedimentos de forma experimental, o autor construiu a armadilha por meio do uso dos seguintes componentes, que serão discriminados em seguida: canais afluentes, reservatório elevado, sistema de descarga de areia, vertedor e todo o sistema de recirculação de água.

O abastecimento da armadilha é feito por meio de dois canais prismáticos, em acrílico, de seção retangular, denominados canais afluentes da armadilha. A vazão é medida por uma ramificação da tubulação que descarrega água nos canais e leva o fluido a uma caixa de água posicionada sobre uma balança eletrônica, onde registros permitem garantir que a mesma vazão que abastece a caixa de água seja transferida para os canais.

Para a descarga de sedimentos constante, um sistema de escoamento bifásico, ar e areia foi adotado com êxito. A injeção de ar comprimido na mangueira flexível que ligava o reservatório de sedimento a cada canal impedia qualquer interrupção no transporte de areia e consequente variação indesejável na descarga.

Neste sistema de descarga de sedimento em funcionamento, a descarga pelo “fio de areia” foi de 2 g/s e o transporte da areia até cada canal é feito em uma mangueira transparente e flexível, para que seja monitorado, e para que não haja acúmulo de material ao longo do percurso e o lançamento de areia pode ser realizado em qualquer trecho desejado do canal.

O lançamento de areia é feito no montante do canal para que a agitação da água no local produza uma mistura completa de fluido e sedimento. Assim, é feita uma distribuição vertical da concentração de areia, semelhante àquela encontrada nos escoamentos fluviais, decrescente no sentido da superfície, se forma ao longo dos 2m de canal e atinge a armadilha com melhor representação de situações naturais.

Com relação ao vertedor da armadilha, o mesmo foi dividido em três seções, nas quais pranchas são colocadas para se obter diferentes configurações dessa estrutura. O mesmo pode ser visualizado por meio da Figura 5, com o fundo da armadilha sustentado pela estrutura metálica em azul a montante (lado esquerdo da Figura) e a tubulação para recirculação da água vertida, a jusante.

**Figura 5** - Vertedor construído em acrílico



Fonte: Souza (2006).

O autor ainda explica que o equipamento construído representa um reservatório de água abastecido por dois rios e tem por função permitir um trabalho experimental que auxilie na pesquisa do assoreamento de reservatórios. Não foi estudado neste trabalho nenhum reservatório real em particular, cuja geometria se assemelhe àquela da armadilha e justifique a denominação desta de modelo reduzido. Ainda, mesmo que essa semelhança geométrica existisse, as pequenas dimensões do equipamento impediriam que se obtivesse semelhança entre modelo construído e protótipo (reservatório real) com relação aos adimensionais importantes para o fenômeno estudado.

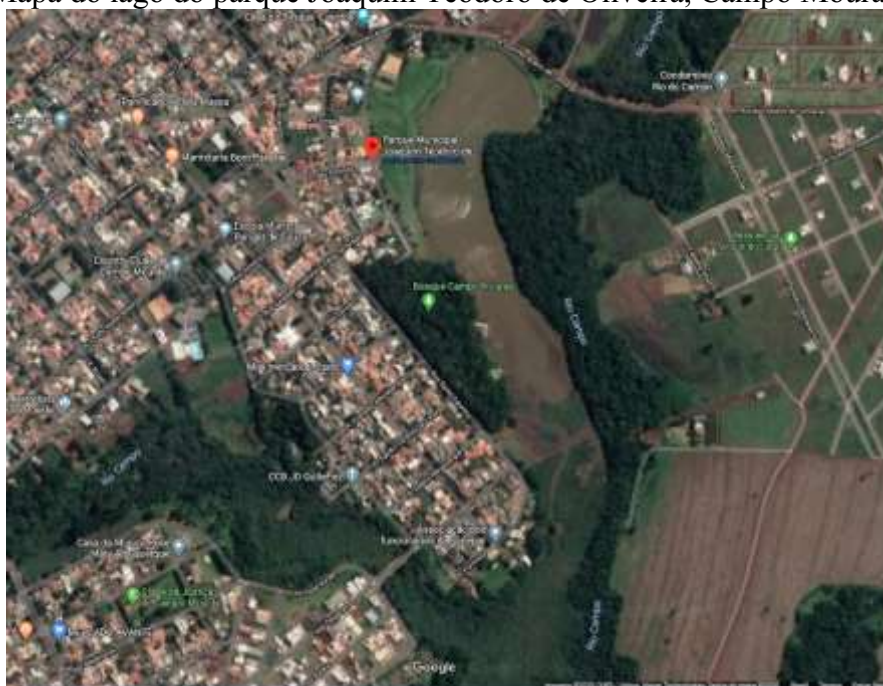
Portanto, a retratação deste experimento no presente trabalho serve para apresentar os principais componentes que constituem uma armadilha de sedimentos e suas funcionalidades.

## 4 METODOLOGIA

### 4.1 Caracterização da Bacia do Rio do Campo e do Lago

Primeiramente apresenta-se, por meio da Figura 6, a localização do lago do Parque Joaquim Teodoro de Oliveira, além do rio que o abastece (Rio do Campo).

**Figura 6** - Mapa do lago do parque Joaquim Teodoro de Oliveira, Campo Mourão - PR



Fonte: Google Maps (2020).

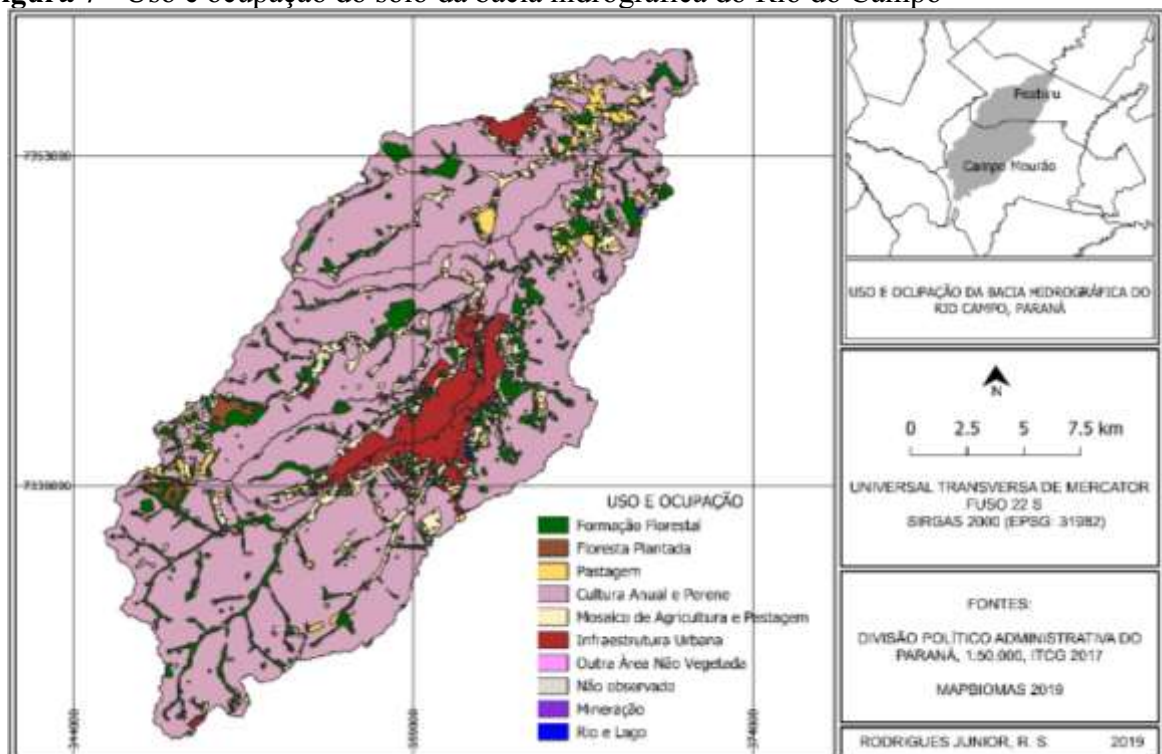
Para realizar o dimensionamento de todos os elementos que compõem uma armadilha de sedimentos é necessário dispor dos dados de vazão (média e máxima) da bacia que abastece o lago, neste caso em específico, a bacia do Rio do Campo.

#### 4.1.1 Área da Bacia Hidrográfica do Rio do Campo

Observa-se, com os dados acima apresentados, a necessidade da determinação da área da bacia hidrográfica do Rio do Campo. Com base em estudos já realizados nesta região, tem-se o trabalho desenvolvido por Umeki (2012), que estuda o transporte de sedimentos na bacia hidrográfica do Rio do Campo. Para isto, a autora determinou, com base na literatura disponível, a área desta bacia, que será utilizada no presente trabalho.

Sendo assim, a Figura 7 ilustra o uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica do Rio do Campo, apresentando área de aproximadamente 115,9279 Km<sup>2</sup>, sendo que a agropecuária ocupa 95,9921 Km<sup>2</sup> ou 82,8% da área total, a silvicultura domina 1,5709 Km<sup>2</sup> ou 1,35%, a área urbana é de 3,3360 Km<sup>2</sup> com 2,87% do total e a vegetação nativa conta com área de 15,0524 Km<sup>2</sup> e 12,98% da área da bacia (CARNEIRO; FERREIRA, 2010). Analogamente à área total do município, a agropecuária é predominante no uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica do Rio do Campo (UMEKI, 2012).

**Figura 7** - Uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica do Rio do Campo



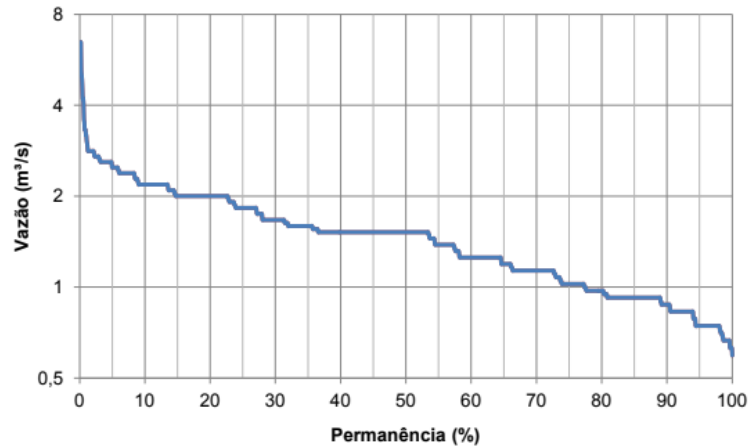
Fonte: Junior (2019). Escala 1: 280.000

#### 4.1.2 Vazão Média

Pretzel (2017) elaborou o gráfico da curva de permanência com as vazões mínimas e médias, conforme suas respectivas probabilidades. A curva é apresentada na Figura 8.



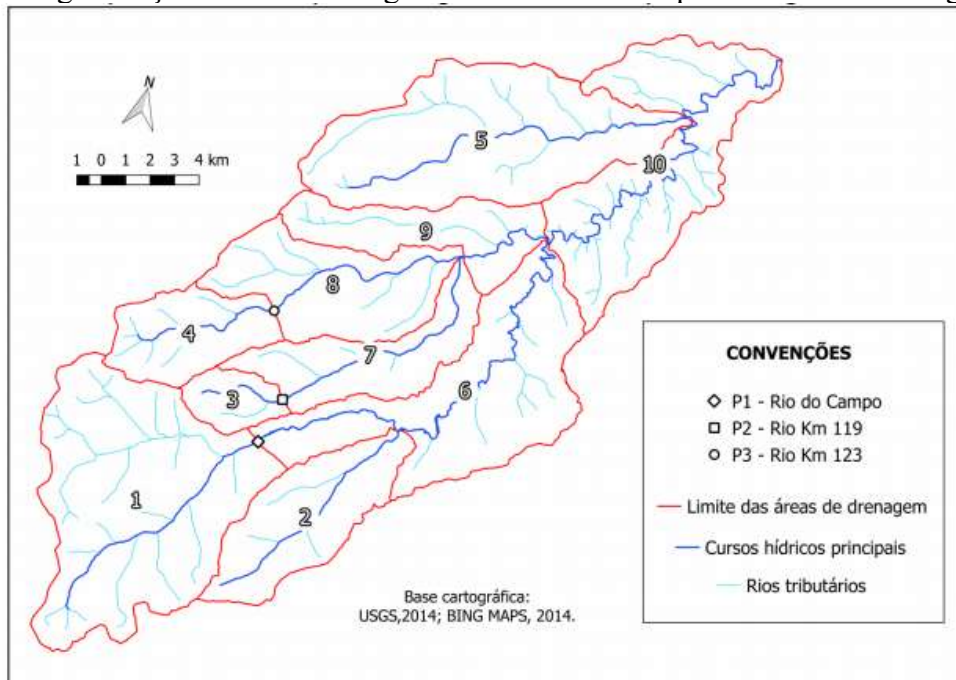
**Figura 8** - Gráfico da curva de permanência do Rio do Campo



Fonte: Pretzel (2017).

Por meio de levantamento das áreas de drenagem da bacia hidrográfica do Rio do Campo (Figura 9) foi possível determinar a área de escoamento do posto fluviométrico, correspondente a 79,72 km<sup>2</sup>.

**Figura 9** - Segmentação da bacia hidrográfica do Rio do Campo em áreas de drenagem



Fonte: Pretzel (2017).

Então, por meio destes dados foi calculada a vazão específica, que alcançou o valor de 0,01905463 m<sup>3</sup>/s.km<sup>2</sup> para  $Q_{50}$  (vazão média). Para determinação da vazão média segundo Pretzel (2017), utilizou-se a Equação (6).

$$Q_{50} = 0,01905463 \cdot \text{Área} \quad (6)$$

#### 4.1.3 Vazão Máxima

Para determinação da vazão máxima da bacia hidrográfica do Rio do Campo para um período de retorno de 100 anos, foi utilizada a Equação (7), disponibilizada por Arantes (2019).

$$Q = 0,077031 \cdot \text{Área}^{1,283544} \quad (7)$$

## 4.2 Projeto Inicial da Armadilha de Sedimentos

Para determinar as dimensões da armadilha de sedimentos a ser desenvolvida, primeiramente foi necessário determinar as vazões média e máxima (para um período de retorno de 100 anos), para que assim fosse possível dimensionar a área de captação e o vertedor da armadilha, já que são estes os dois principais elementos construtivos. Após determinadas as dimensões destes elementos, dimensionou-se, proporcionalmente a eles, a armadilha de sedimentos de forma retangular. A seguir serão apresentados os métodos para escolha do posicionamento da armadilha, dimensionamentos de captação e vertedor, inclinação interna para favorecer a deposição dos sedimentos e determinação da periodicidade de descarga dos sedimentos retidos na armadilha.

### 4.2.1 Escolha do Posicionamento

Com relação ao posicionamento da armadilha de sedimentos, objetiva-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.

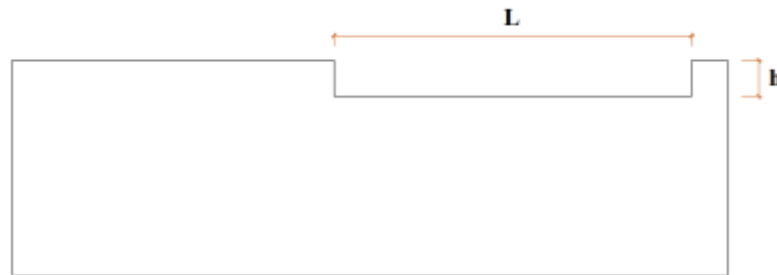
### 4.2.2 Dimensionamento da Captação de Água e do Vertedor

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 (1999) 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 m<sup>3</sup>/s), as medidas de largura ( $L$ ) e altura ( $h$ ) foram escolhidas para o dimensionamento. Por meio da Figura 10 apresenta-se a representação do vertedor de parede delgada e 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.

**Figura 10** - Vertedor de parede delgada



Fonte: O autor (2020).

Para fins mais práticos, optou-se por apresentar as equações utilizadas para o dimensionamento da armadilha de sedimentos por meio de uma tabela (Tabela 2).

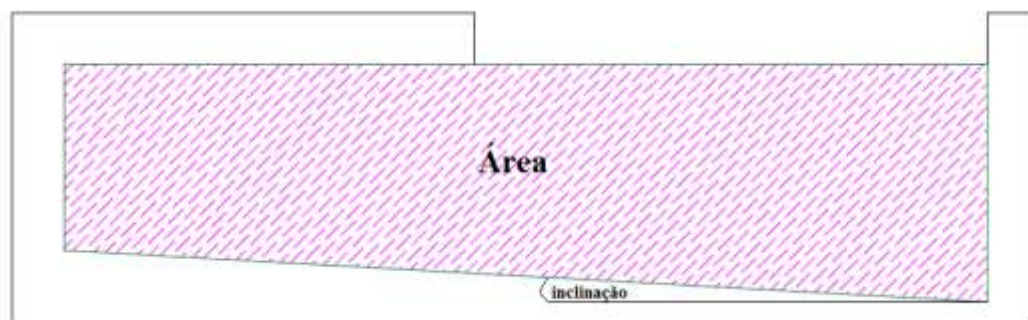
**Tabela 2** - Equações utilizadas nas seções da metodologia

<b>Equação</b>	<b>Seção</b>	<b>Descrição</b>	<b>Fórmula</b>
8	4.2.2	Cálculo da vazão na captação e no vertedor	$Q = 1,838. (L - 0,20h)^{\frac{3}{2}}$
	4.2.4.1	Cálculo da área necessária à armadilha	$A = \frac{Q}{V_s}$
10	4.2.4.2	Estimativa da largura	$L = \frac{A}{b}$
11		Determinação da largura final	$L_{final} = 1,5. L$
12	4.2.4.3	Determinação da profundidade da armadilha	$V = \frac{Q}{A}$
13			$h = \frac{A}{b}$
14	4.2.4.4	Capacidade de armazenamento	$V = \left[ \left( \frac{B + b}{2} \right) \cdot h \right] \cdot L$
15	4.2.5.1	Cálculo da perda de carga h	$h = k. \left( \frac{V^2}{2g} \right)$
16		Cálculo do coeficiente de perda de carga k	$k = \beta. \left( \frac{S}{b} \right)^{1,33} \cdot \text{sen } \alpha$
17	4.2.5.2	Determinação da área transversal interna da tubulação	$A = \pi. r^2$
18		Cálculo da vazão na tubulação	$Q = V. A$

#### 4.2.3 Inclinação interna

Como o principal objetivo do desenvolvimento do projeto da armadilha de sedimentos foi promover a captação e a retenção dos sedimentos antes que os mesmos adentrem ao lago que já se encontra em estágio avançado de assoreamento e com alto risco de extinção, optou-se em considerar uma inclinação interna na armadilha que já direciona os sedimentos para a canalização de descarga dos mesmos para facilitar e induzir a deposição interna. A representação desta inclinação é apresentada na Figura 11. Cabe salientar que esta inclinação é paralela ao canal de captação de água do Rio do Campo e ao vertedor da armadilha.

**Figura 11** - Inclinação interna da armadilha de sedimentos



Fonte: O autor (2020).

#### 4.2.4 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 pelo autor Tsutiya (2006) adequada à NBR 12213 (1992) para dimensionamento de caixas de areia (desarenadores) modificada e adaptada para armadilhas de sedimentos, já que ambas possuem o mesmo princípio que se baseia na captação e retenção de sedimentos de cursos d'água. A seguir será apresentado e explicado o procedimento adotado para determinação das medidas da armadilha, tais como largura, comprimento e profundidade.

Primeiramente são apresentados alguns critérios para dimensionamento de desarenadores, também adotados aqui para o dimensionamento desta armadilha de sedimentos:

- A velocidade crítica de sedimentação das partículas deve ser igual ou inferior a 0,021m/s.
- A velocidade de escoamento longitudinal deve ser igual ou inferior a 0,30 m/s.
- O comprimento do desarenador, obtido ao aplicarem-se os critérios anteriores, deve ser multiplicado por um coeficiente de segurança de pelo menos 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 será 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.

#### 4.2.4.1 Cálculo da área

Para concluir esta etapa é 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 utilizada para determinar a área necessária à armadilha de sedimentos encontra-se na Tabela 2 (Equação (9)).

#### 4.2.4.2 Determinação da largura e do comprimento

Como se trata de um caso de dimensionamento, para suprir a necessidade da área de armadilha determinada em 4.2.4.1, primeiramente é considerada uma largura ( $b$ ) para a armadilha, de modo que o comprimento ( $L$ ) gerado por meio da equação 10 seja maior que ela e garanta que o formato da armadilha seja retangular ( $L > b$ ).

Depois de determinar a largura da armadilha de sedimentos, para compensar a turbulência na entrada e na saída da mesma, aplica-se um coeficiente de segurança de 50% no comprimento  $L$  da armadilha, conforme apresenta a Equação (11).

Assim, depois de definidos largura ( $b$ ) e comprimento ( $L$ ) da armadilha de sedimentos, ajusta-se (somente de forma crescente) estes valores, para facilitar a construção da mesma, para aumentar sua capacidade de armazenamento de sedimentos ou para proporcionar maior segurança caso seja gerado extravasamento da mesma durante o seu período de vida útil.

As equações utilizadas para determinação da largura e do comprimento da armadilha encontram-se na Tabela 2 (Equações (10) e (11)).

#### 4.2.4.3 Profundidade da armadilha

Para determinar a profundidade da armadilha, é necessário conhecer a velocidade de escoamento longitudinal ( $V$ ) e a vazão ( $Q$ ) para determinar a área transversal da armadilha. Como anteriormente já foi definida a largura ( $b$ ) da mesma, define-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, testa-se uma profundidade arbitrária para a armadilha 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 da

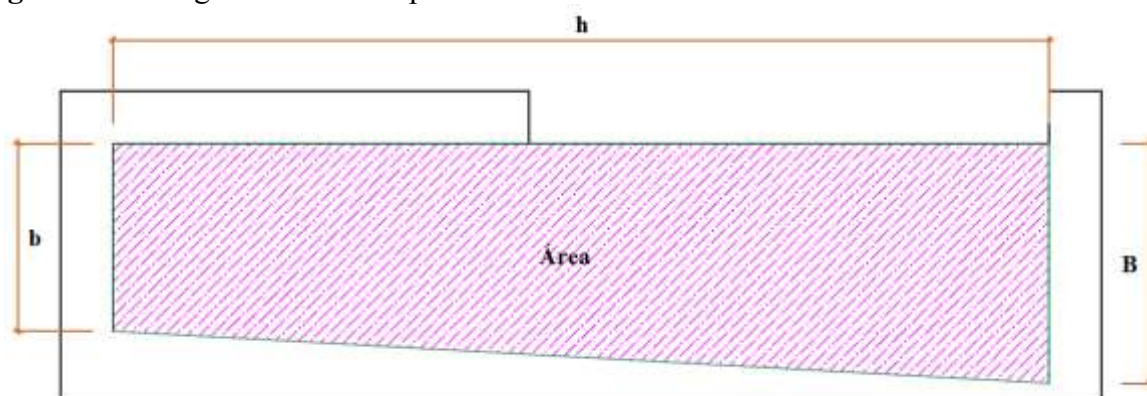
armadilha, determina-se a profundidade ( $h$ ) necessária. As equações necessárias para estes cálculos estão apresentadas na Tabela 2 (Equações (12) e (13)).

#### 4.2.4.4 Capacidade de armazenamento de sedimentos

Finalmente, após determinar as três dimensões da armadilha de sedimentos: largura, comprimento e profundidade, é possível determinar qual o seu volume interno por meio da Equação (14) apresentada na Tabela 2.

As incógnitas utilizadas nesta equação estão representadas na Figura 12. Para determinação do volume foi utilizada a equação para determinação da área do trapézio retângulo multiplicada pelo comprimento interno da armadilha ( $L$  subtraído as espessuras das duas paredes internas) definido em 4.2.4.2.

**Figura 12** - Incógnitas utilizadas para determinar o volume da armadilha



Fonte: O autor (2020).

Depois de determinado o volume interno da armadilha de sedimentos, ou seja, o volume que a armadilha suporta, buscou-se na literatura a quantidade de sedimentos que adentra ao lago do Parque Joaquim Teodoro de Oliveira.

Como o trabalho de Umeki (2012) contempla estudos do transporte de sedimentos na bacia hidrográfica do Rio do Campo, o mesmo também aborda a quantidade de sedimentos que adentra ao lago, objeto deste estudo. Este resultado apresenta-se na unidade de toneladas ao ano, assim, se fez necessário determinar o peso específico destes depósitos. O autor Carvalho et al. (2000) apresenta o peso específico aparente médio dos depósitos de sedimentos, utilizado neste estudo.

#### 4.2.5 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 os mesmos serão lançados.

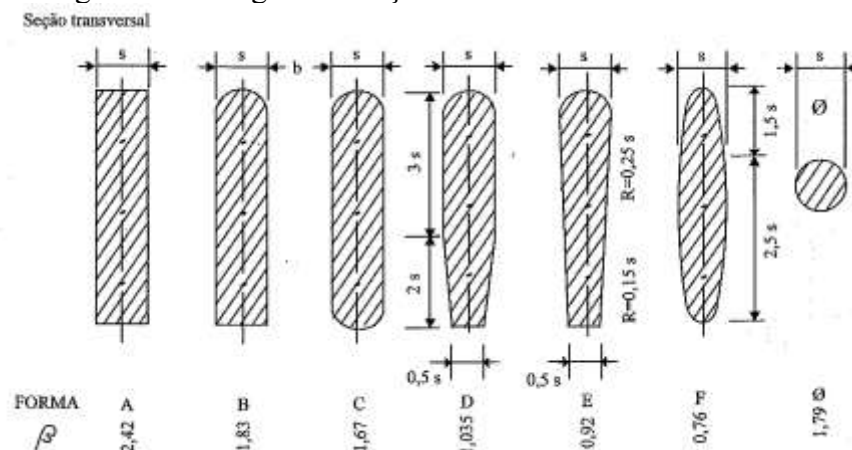
Para esta descarga, a armadilha deverá contar com uma canalização conectada a mesma para retirar e destinar estes sedimentos a um canal que se findará em um local propício, que não acarrete risco em agravar ainda mais o assoreamento do lago. Nesta seção serão definidas as metodologias adotadas para o cálculo dos diâmetros (interno e externo) da tubulação que tem como destino final o canal acima descrito, assim como sugestão de ponto final de descarga de acordo com a capacidade da armadilha.

##### 4.2.5.1 Caixa de transição e gradeamento

Antes dos sedimentos adentrarem a tubulação e ao canal, haverá 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 (8) (Tabela 2), enquanto que o dimensionamento das barras que compõem o gradeamento foi feito com base nas recomendações propostas pela NBR 12213 (1992), que explica que o espaçamento entre barras paralelas deve ser de 7,5 a 15 cm para a grade grosseira e dispõe dos seguintes tipos de barras de gradeamento (Figura 13):

**Figura 13** - Forma geométrica segundo a seção transversal das barras



Fonte: NBR 12213 (1992).

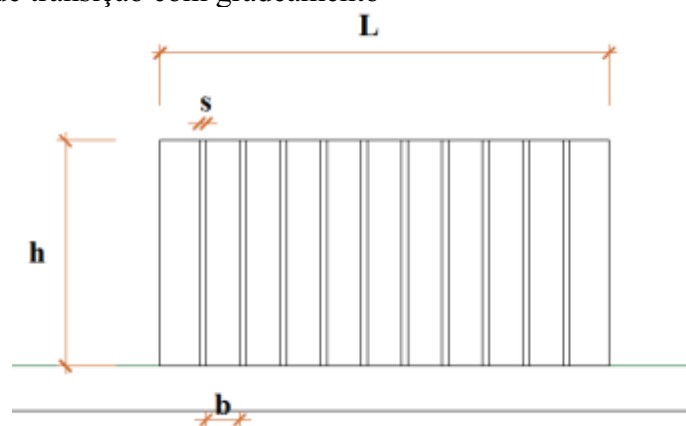


Além disto, como o gradeamento acarreta em perda de carga ( $h$ ). Por meio das Equações (15) e (16) apresentadas na Tabela 2, esta perda pode ser calculada. É importante frisar que a incógnita  $k$  representa o coeficiente de perda de carga que é adimensional e função dos parâmetros geométricos das 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  $\beta$  (coeficiente, função forma da barra, representado na Figura 13),  $s$  (espessura das barras),  $b$  (distância livre entre barras) e  $\alpha$  (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.

Para tornar mais clara a visualização da comporta e do gradeamento que a constituem, estes elementos são representados por meio da Figura 14. Novamente, cabe ressaltar que as incógnitas  $h$  e  $L$  são para dimensionamento da abertura da caixa de transição (Equação (8) - Tabela 2).

**Figura 14** - Caixa de transição com gradeamento



Fonte: O autor (2020).

#### 4.2.5.2 Cálculo dos diâmetros da tubulação

Depois de dimensionar a caixa de transição, inicia-se o dimensionamento da tubulação que tem a função de destinar os sedimentos da caixa de transição para o canal aberto. Para isto, optou-se por utilizar toda a área da seção transversal da caixa de transição para conectar a tubulação. Sendo 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.

Primeiramente, para determinar a área transversal interna da tubulação, é utilizada a Equação (17) (Tabela 2), de determinação da área do círculo e adota-se, neste caso, uma espessura de 10 cm à tubulação.

Depois de determinar a área, foi determinada a capacidade de vazão da tubulação. Para isto foi utilizada a velocidade média de aproximação dos sedimentos ( $V$ ) e a Equação (18) da Tabela 2.

#### 4.2.5.3 Canal aberto de transporte

Para promover o transporte dos sedimentos retidos pela armadilha, o sistema desenvolvido contará com um canal aberto em vala que receberá os sedimentos pela tubulação anteriormente dimensionada. Este canal deverá apresentar diâmetro maior ou igual ao diâmetro da tubulação e os detalhes a respeito de sua locação serão apresentados e detalhados no capítulo de resultados.

#### 4.2.5.4 Destinação final dos sedimentos

Finalmente, é necessário definir a destinação final dos sedimentos captados pela armadilha. Cabe ressaltar que neste caso em específico existem diversas possibilidades conforme o objetivo da implantação da armadilha desenvolvida. A seguir são apresentadas três destas possibilidades, aplicáveis a este caso:

- 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.

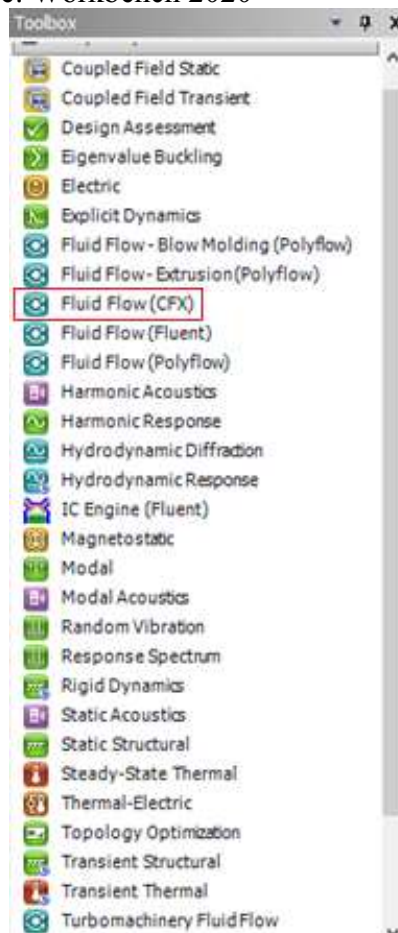
### 4.3 Modelagem Numérica: Primeira Simulação

Com o projeto construtivo da armadilha de sedimentos finalizado, foi possível dar início à etapa de modelagem numérica. Nesta seção serão apresentadas as etapas necessárias à modelagem para atingir os resultados apresentados no capítulo 5 deste trabalho.

#### 4.3.1 Workbench: *Fluid Flow* (CFX)

A técnica empregada para simulação do funcionamento da armadilha de sedimentos projetada faz uso do método dos elementos finitos, por meio do Ansys Workbench. Este método é utilizado para resolver equações diferenciais parciais, ou seja, equações que modelam problemas com funções desconhecidas que possuem várias variáveis, tal como a dinâmica dos fluidos (ou qualquer processo distribuído no espaço ou no espaço e tempo). Além disto, o domínio é dividido em subdomínios (elementos), que mantêm as mesmas propriedades do meio original. Cada elemento é uma variável que depende de um campo de elementos que variam ao longo de todo domínio, são descritos por equações diferenciais e resolvidos por modelos matemáticos.

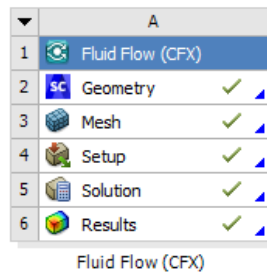
Como o objetivo da modelagem numérica aplicada à armadilha de sedimentos desenvolvida é verificar o comportamento do fluido oriundo do Rio do Campo ao adentrar à armadilha, optou-se em trabalhar com o sistema de análise denominado *Fluid Flow*. A Figura 15 apresenta as opções de sistema de análise disponibilizadas pelo Workbench (versão estudantil 2020), com destaque para o *Fluid Flow*.

**Figura 15** - Sistemas de análise: Workbench 2020

Fonte: O autor (2020).

Após definido o sistema de análise, as etapas de simulação apresentadas por meio da Figura 16 são abertas. São elas: geometria, malha, configuração, solução e resultados. Nestes pontos o *software* Ansys Workbench funciona de forma hierárquica, ou seja, para definir a malha é necessário que a geometria esteja definida; para definir as configurações no CFX-Pre é necessário que a malha esteja definida, e assim sucessivamente. Nesta seção serão apresentadas as configurações utilizadas nas quatro primeiras etapas e os *Results* serão apresentados no capítulo 5.

**Figura 16** - Etapas de simulação: *Fluid Flow*



Fonte: O autor (2020).

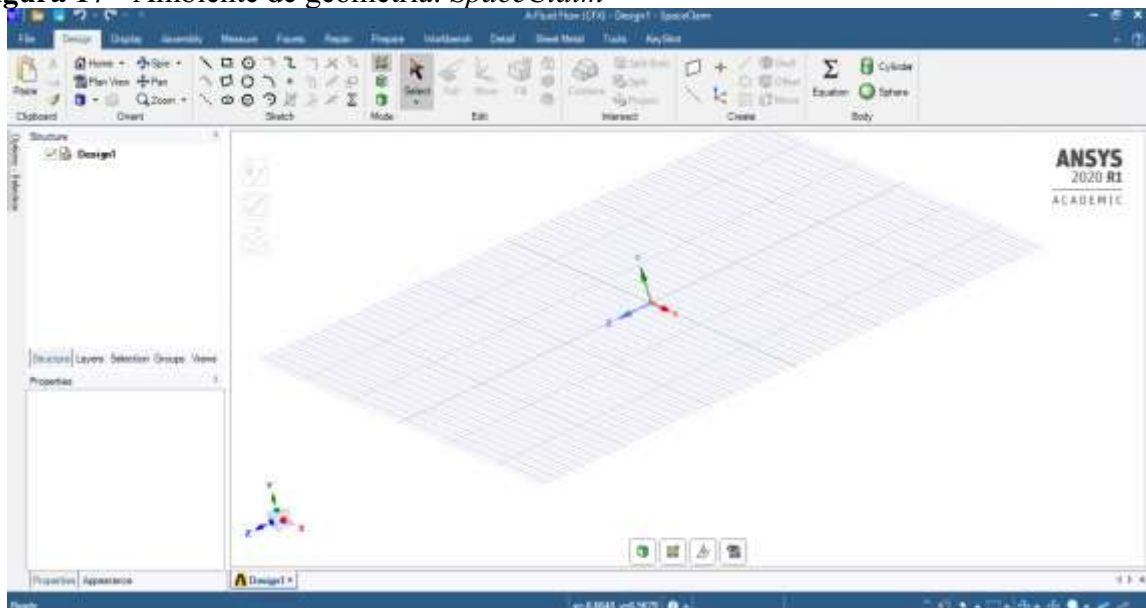
#### 4.3.1.1 Geometria

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, a geometria em três dimensões desconsidera as espessuras das paredes da armadilha e corresponde ao volume interno da mesma.

As ferramentas disponíveis para criação, reparação ou edição de geometria são intuitivas e como o mesmo é feito tridimensionalmente, primeiramente desenha-se em duas dimensões e utiliza-se a ferramenta *pull* para a terceira dimensão. Por meio da Figura 17 observa-se a representação deste ambiente, denominado *SpaceClaim*.

Cabe ressaltar que o *software* Ansys Workbench permite que outras ferramentas de desenho sejam utilizadas (como o AutoCad), já que possui a função denominada “Importação de geometria”.

**Figura 17** - Ambiente de geometria: *SpaceClaim*



Fonte: O autor (2020).

As opções de formatos de arquivos de importação de geometria disponíveis pelo *SpaceClaim* são apresentadas na Figura 18.

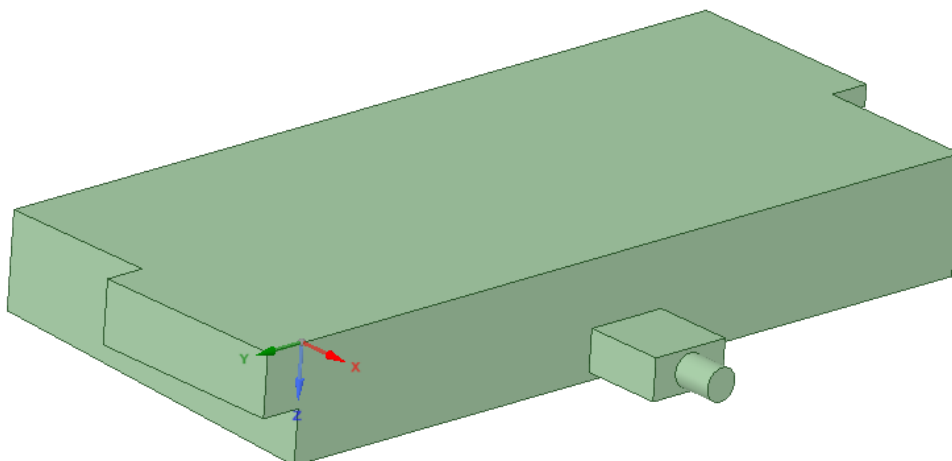
**Figura 18** - Formatos de arquivo de importação de geometria aceitos pelo *SpaceClaim*

ACIS (*.sat;*.sab)
AMF (*.amf)
ANSYS (*.anf;*.pmdb)
AutoCAD (*.dwg;*.dxf)
BladeGen (*.bgd)
Catia [V4] (*.model;*.exp;*.session)
Catia [V5] (*.CATPart;*.CATProduct)
Catia [V6] (*.3dxml)
Creo Elements/Direct Modeling (*.pkg;*.bdl;*.ses;*.sda;*.sdp;*.sdac;*.sdpc)
Creo Parametric (*.prt;*.asm*)
DesignModeler (*.agdb)
FE Modeler (*.fedb)
IGES (*.iges;*.igs)
Inventor (*.ipt;*.iam)
JT (*.jt)
Monte Carlo N-Particle (*.mcpn)
NX (*.prt)
OBJ (*.obj)
Parasolid (*.x_t;*.xmt_txt;*.x_b;*.xmt_bin)
PLY (*.ply)
Rhino (*.3dm)
SketchUp (*.skp)
Solid Edge (*.par;*.asm;*.psm;*.pwd)
SOLIDWORKS (*.SLDPRT;*.SLDASM)
SpaceClaim (*.scdoc)
STEP (*.stp;*.step)
Stereolithography (*.stl)
All Geometry Files (*.sat;*.sab;*.amf;*.anf;*.pmdb;*.dwg;*.dxf;*.bgd;*.agdb;*.model;*.exp;*.session;*.CATPart;*.CATProduct;...)
All Files (*.*)

Fonte: O autor (2020).

Para realizar a simulação desenvolvida neste trabalho, utiliza-se o ambiente de criação de geometria disponibilizado pelo Ansys Workbench, ou seja, o *SpaceClaim*. A Figura 19 apresenta a geometria utilizada na modelagem conforme os resultados obtidos por meio do primeiro projeto construtivo da armadilha de sedimentos.

**Figura 19** - Geometria do volume interno da armadilha criado no *SpaceClaim*



Fonte: O autor (2020).

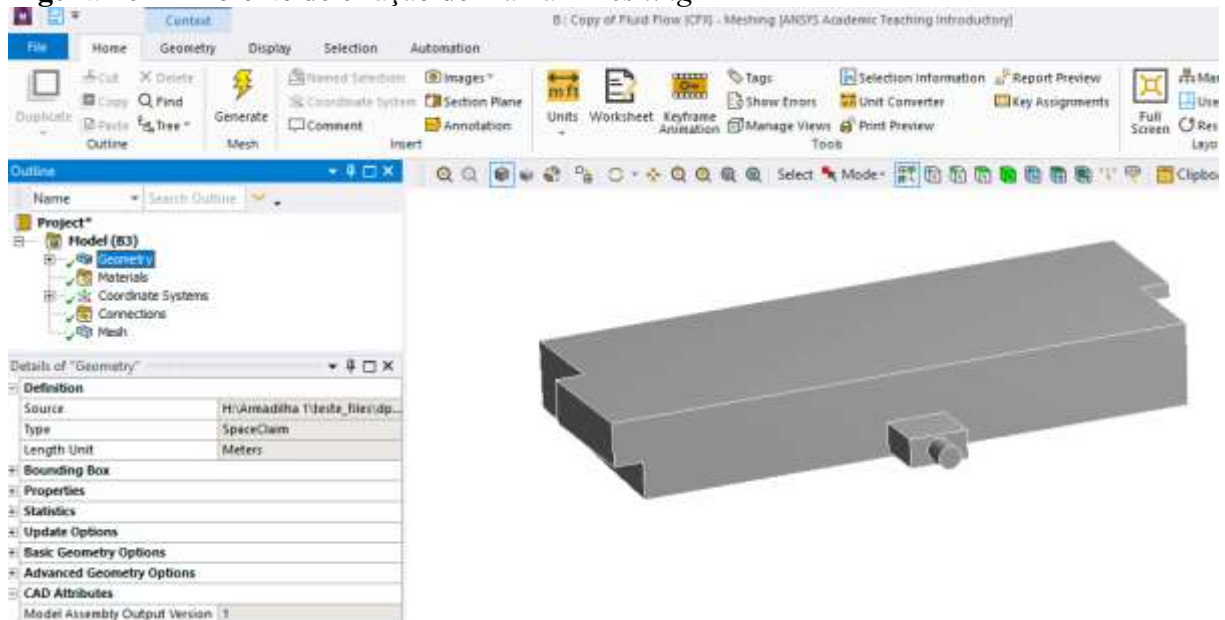
Cabe salientar que na geometria apresentada na Figura 19, tem-se as seguintes medidas, adotando-se  $L$  para largura,  $h$  para altura,  $c$  para comprimento e  $D$  para diâmetro:

- Medidas do volume de captação:  $L = 5$  m;  $h = 1,5$  m;  $c = 1$  m.
- Medidas do volume do vertedor:  $L = 5$  m;  $h = 0,5$  m;  $c = 1$  m.
- Medidas do volume da caixa de transição:  $L = 2$  m;  $h = 1$  m;  $c = 1$  m.
- Medidas do volume da tubulação:  $D = 0,80$  m;  $c = 1$  m.

#### 4.3.1.2 Malha

Finalizada a etapa de criação da geometria, inicia-se a etapa de definição da malha. Como citado, não é possível inicializar esta etapa sem finalizar a geometria, já que a malha consiste, basicamente, na divisão da geometria em elementos com características a serem definidas. A Figura 20 apresenta o ambiente de definição dos parâmetros da malha por meio da geometria já criada em 4.3.1.1.

**Figura 20** - Ambiente de criação de malha - *Meshing*



Fonte: O autor (2020).

Conforme o que é apresentado pela Figura 20, dentro do projeto de malha existem alguns parâmetros que podem ser editados conforme o interesse do usuário do *software*, tal como a dimensão dos elementos que compõem a malha. Salienta-se que quanto menores os

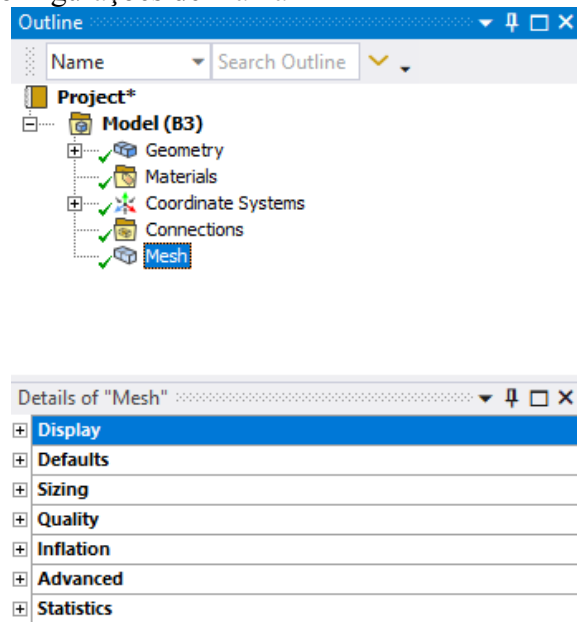
elementos, maior o refinamento da modelagem, e maiores as quantidades de elementos e de nós.

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.

As configurações de malha podem ser acessadas em *Details of Mesh* e são divididas conforme apresentado no box apresentado na Figura 21.

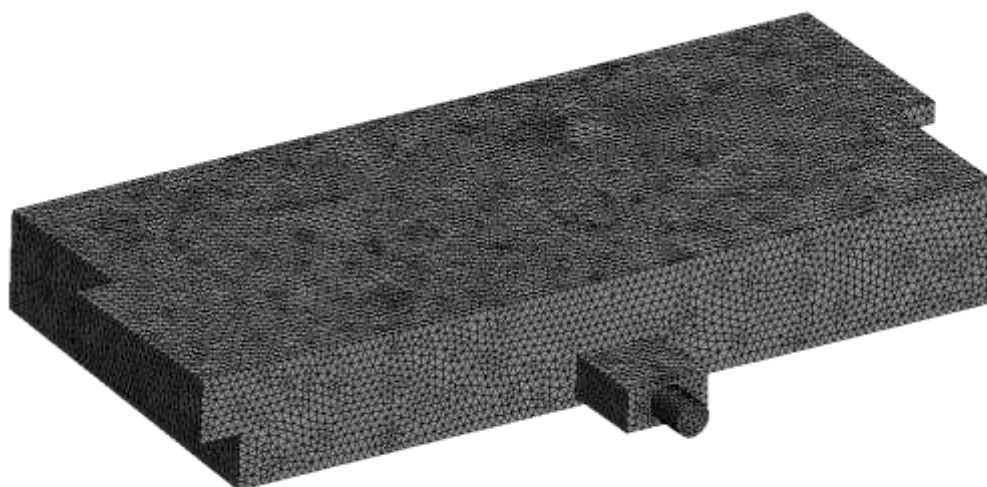
**Figura 21** - Detalhes: configurações de malha



Fonte: O autor (2020).

A malha gerada para a primeira simulação da armadilha de sedimentos é apresentada por meio da Figura 22.



**Figura 22 - Malha**

Fonte: O autor (2020).

Assim, de acordo com o volume da geometria, foram gerados:

- 88.711 elementos.
- 486.558 nós.

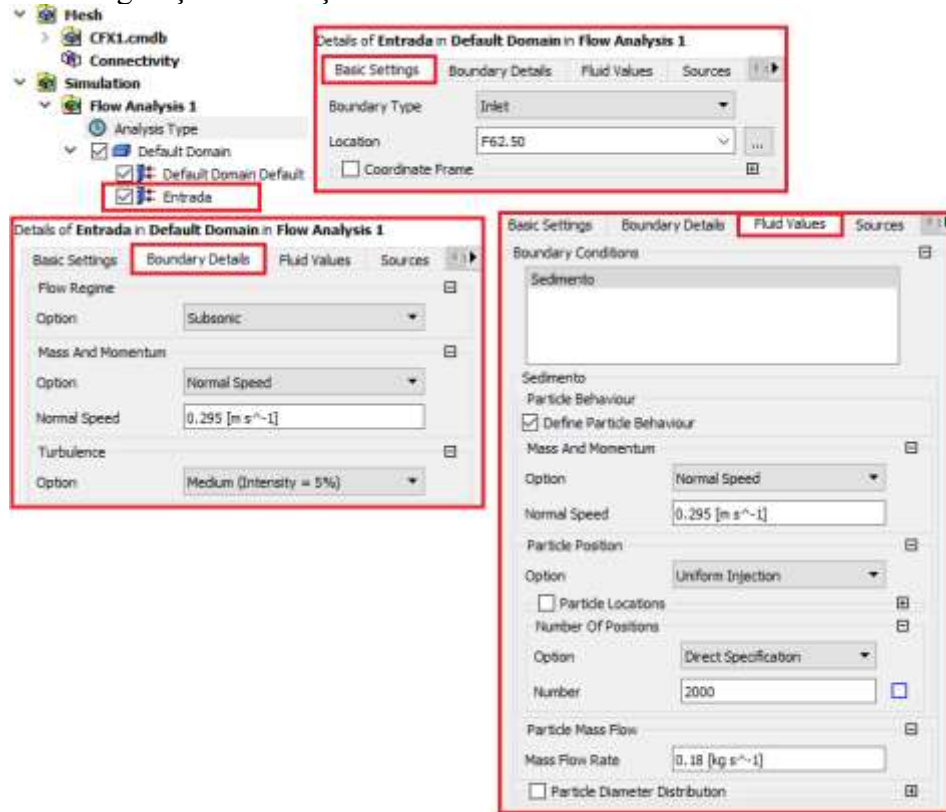
#### 4.3.1.3 Configuração (CFX-Pre)

Após gerar a malha, dá-se início ao processo de configuração da modelagem no CFX-Pre. Primeiramente, definiu-se as condições de “domínio padrão”, ou seja, definiu-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.

Como a vazão média do Rio do Campo é igual a 2,21 m<sup>3</sup>/s e a área da superfície disponível para entrada (tanto de fluido quanto de sedimentos) à armadilha é de 7,5 m<sup>2</sup> ( $L = 5$  metros e  $h = 1,5$  metros), obteve-se velocidade de entrada igual a 0,295 m/s.

Além do fluido de entrada água, foi definida uma nova substância de entrada: o sedimento, já que consiste no objetivo de desenvolvimento deste trabalho, 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 a taxa de fluxo de massa, que, de acordo com o trabalho desenvolvido por Kelniar (2014) é de, aproximadamente, 0,18 kg/s. A Figura 23 apresenta todas as configurações acima descritas.

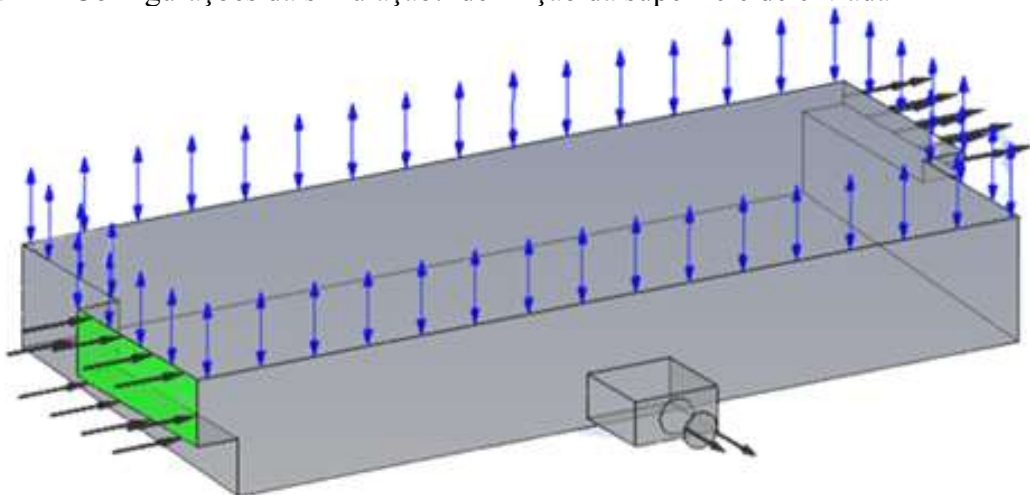
**Figura 23** - Configurações: condições de entrada à armadilha



Fonte: O autor (2020).

Cabe salientar que a localização da superfície de entrada apresentada como “F62.50” apresentada na Figura 23 corresponde às coordenadas da mesma, no entanto o software permite que essa superfície seja determinada por meio do próprio cursor. A parte em verde da Figura 24 apresenta esta definição da superfície de entrada de fluido (água) e de partículas (sedimentos) à armadilha.

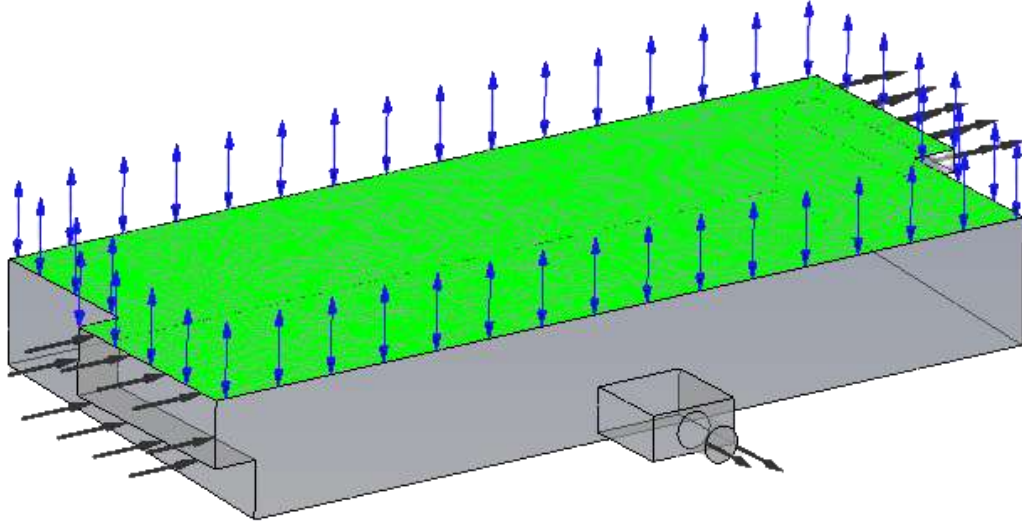
**Figura 24** - Configurações da simulação: definição da superfície de entrada



Fonte: O autor (2020).

Depois de determinada as configurações de entrada à armadilha, definiu-se a localização de abertura (*Opening*) da armadilha, que, conforme o projeto desenvolvido, é a região do topo da mesma, conforme apresenta a parte em verde da Figura 25.

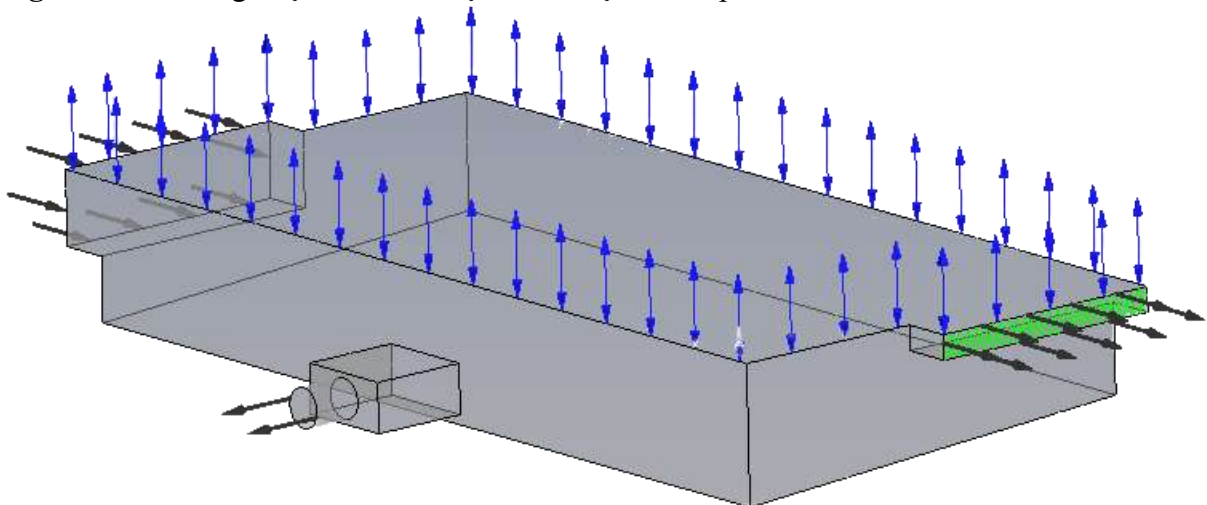
**Figura 25** - Configurações da simulação: definição da superfície de abertura



Fonte: O autor (2020).

Também foi configurada, como superfície de saída, o vertedor, assim denominado no desenvolvimento do projeto inicial da armadilha. Novamente, esta superfície é representada em verde e apresentada na Figura 26.

**Figura 26** - Configuração da simulação: definição da superfície de saída



Fonte: O autor (2020).

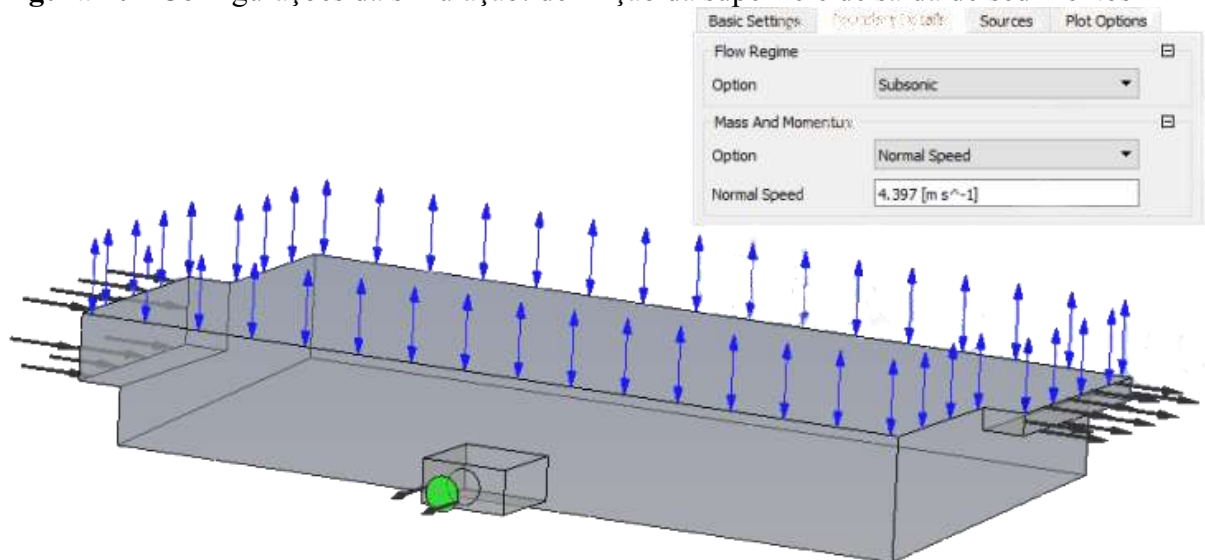
A superfície de saída apresentada na Figura 26 representa o vertedor da armadilha e foi projetada para promover o abastecimento de água do lago. É importante frisar que, como é

considerada eficiência de 70% à armadilha, além de água, é provável que também seja vertida uma parcela de sedimentos ao lago.

Como foi projetada uma comporta de descarga de sedimentos, tem-se mais uma superfície de saída na armadilha, que abrande o volume da tubulação de descarga. Neste caso, assim como definido nas condições de entrada (Figura 23), foi necessário definir a velocidade de saída dos sedimentos da armadilha.

Como a tubulação possui diâmetro interno igual a 0,80 m e a vazão média do rio e consequentemente de captação da armadilha é igual a 2,21 m<sup>3</sup>/s, têm-se velocidade de descarga dos sedimentos igual a 4,397 m/s. Esta configuração e a determinação da superfície de saída são apresentadas na Figura 27.

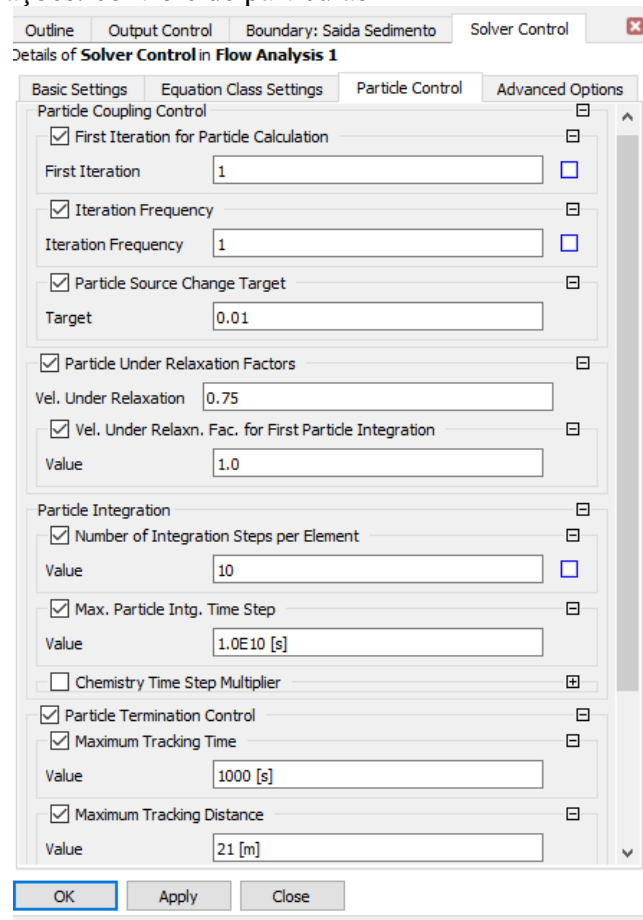
**Figura 27** - Configurações da simulação: definição da superfície de saída de sedimentos



Fonte: O autor (2020).

Além das configurações de simulação acima descritas, também foi necessário realizar algumas configurações no *solver* do CFX-Pre, mais especificamente no *solver control* do mesmo, que abrange configurações a respeito do controle das partículas. Estas configurações estão apresentadas na Figura 28.

**Figura 28 - Configurações: controle de partículas**



Fonte: O autor (2020).

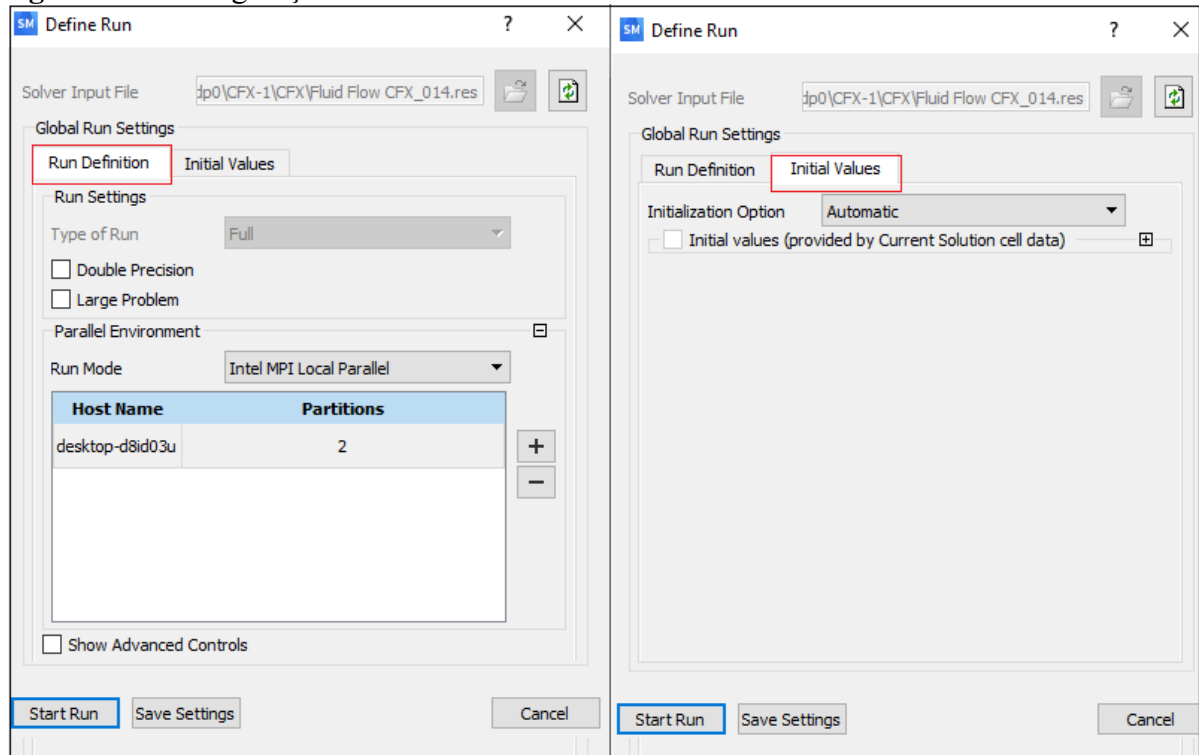
As principais das configurações apresentadas na Figura 28 são os máximos tempo e distância de rastreamento da partícula, pois limitam a apresentação da mesma nos resultados. Ou seja, caso o tempo máximo seja menor que o tempo necessário para a partícula percorrer a armadilha, a mesma será limitada a este tempo máximo. O mesmo ocorre com a distância máxima de rastreamento, que, no caso da presente simulação, não pode ser menor que 21 metros (19 metros de comprimento mais 1 metro de volume de entrada e 1 de saída).

Além das configurações de controle de partícula, também é necessário definir as configurações da simulação. Neste caso foi definido o número de iterações e constatou-se que 100 seriam suficientes para simular o comportamento da armadilha de sedimentos mediante à ação da água e dos sedimentos.

#### 4.3.1.4 Solução: *Start Run*

Finalizada a etapa de configuração no CFX-Pre, é possível dar início ao processo de simulação, que é feito por meio do *Workbench Solution*, conforme apresenta a Figura 29. Não foi definido um valor inicial (optou-se na inicialização automática) e deu-se início ao processo de simulação numérica.

**Figura 29** - Configuração do *solution: Start Run*



Fonte: O autor (2020).

Durante o processo de simulação é possível acompanhá-lo pela tela representada na Figura 30, assim como todas as informações e cálculos apresentados a cada iteração. Neste caso, 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 6284 iterações, no entanto, este número corresponde a terceira iteração de um total de 100 que serão realizadas para a armadilha apresentada neste trabalho.

**Figura 30 - Informações apresentadas em cada iteração**

```

=====
OUTER LOOP ITERATION = 6284 ( 3) CPU SECONDS = 1.084E+05 (1.303E+02)
=====
|      Equation      | Rate | RMS Res | Max Res | Linear Solution |
+-----+-----+-----+-----+-----+
| U-Mom              | 1.01 | 2.6E-04 | 3.3E-03 | 1.5E-03 OK|
| V-Mom              | 1.01 | 3.7E-04 | 4.3E-03 | 1.1E-03 OK|
| W-Mom              | 1.01 | 1.0E-03 | 6.9E-02 | 1.6E-03 OK|
| P-Mass             | 0.97 | 4.1E-07 | 2.7E-05 | 8.5 6.5E-02 OK|
+-----+-----+-----+-----+
|                    |      |         |         |               |
| ***** Notice ***** |      |         |         |               |
| A wall has been placed at portion(s) of an OUTLET |      |         |         |               |
| boundary condition (at 100.0% of the faces, 100.0% of the area) |      |         |         |               |
| to prevent fluid from flowing into the domain. |      |         |         |               |
| The boundary condition name is: Saida. |      |         |         |               |
| The fluid name is: Agua. |      |         |         |               |
| If this situation persists, consider switching |      |         |         |               |
| to an Opening type boundary condition instead. |      |         |         |               |
+-----+-----+-----+-----+
|      Equation      | Rate | RMS Res | Max Res | Linear Solution |
+-----+-----+-----+-----+
| K-TurbKE           | 1.00 | 2.8E-04 | 1.7E-02 | 5.4 2.0E-03 OK|
| E-Diss.K           | 0.97 | 9.1E-06 | 6.6E-04 | 12.6 1.3E-04 OK|
+-----+-----+-----+-----+
=====
Particle Diagnostics
=====
+-----+-----+-----+-----+
| Particle Fate Diagnostics |
+-----+-----+-----+-----+
| Particle type | Fate type | Particles |
+-----+-----+-----+-----+
| Sedimento | Entered domain | : 2000 |
| | Left domain | : 1132 |
+-----+-----+-----+-----+
| Particle Equation | Total source and source change rates |
+-----+-----+-----+-----+
| | Equation | Source | Rate |
+-----+-----+-----+-----+
| Domain: Default Domain |
+-----+-----+-----+-----+
| Sedimento | x-Mom | 3.925E+00 | 0.0028 |
| | y-Mom | 4.181E-01 | 0.0013 |
| | z-Mom | 9.113E+01 | 0.0046 |
+-----+-----+-----+-----+

```

Fonte: O autor (2020).

Além das informações apresentadas por meio da Figura 30, durante o processo de simulação são plotados três gráficos:

- *Momentum and Mass*: momento e massa.
- *Turbulence*: turbulência.
- *Particle Source Change Rates*: taxas de alteração da fonte de partículas.

Cada um destes gráficos é composto pelo “passo de tempo acumulado” no eixo das abcissas ( $x$ ) e pelo “valor variável” (erro) no eixo das ordenadas ( $y$ ).

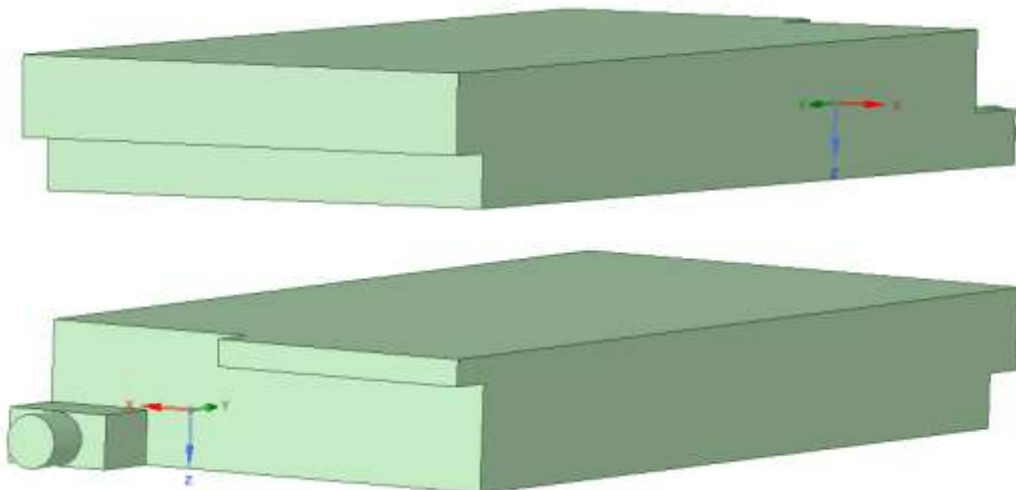
#### 4.4 Modelagem Numérica: Segunda Simulação

Conforme observado, após a simulação do primeiro projeto proposto para a armadilha de sedimentos, surgiu a necessidade de promover algumas alterações na geometria da armadilha. Consequentemente, estas alterações geraram a necessidade de gerar uma nova simulação. Nesta seção serão apresentadas as configurações necessárias à segunda simulação.

##### 4.4.1 Geometria

Todas as alterações realizadas correspondem à geometria da armadilha, no entanto essas alterações também modificam a configuração das demais etapas de simulação. A Figura 31 apresenta a geometria da segunda simulação, de acordo com os resultados das alterações do projeto construtivo da armadilha. São apresentadas duas “vistas”, a primeira na parte superior apresenta a vista frontal e por meio dela é possível observar a parte de captação da armadilha, enquanto que a segunda, na parte inferior, apresenta o “fundo” da mesma onde encontram-se o vertedor e a comporta de esvaziamento de sedimentos. Observa-se que a inclinação interna foi desconsiderada e que o diâmetro interno da tubulação foi aumentado.

**Figura 31** - Nova geometria do volume interno da armadilha de sedimentos



Fonte: O autor (2020).

##### 4.4.2 Malha

As configurações de geração de malha empregadas foram as mesmas apresentadas na seção 4.3.1.2. A malha gerada e aplicada a nova geometria é apresentada na Figura 32.



**Figura 32** - Malha da nova geometria



Fonte: O autor (2020).

A única alteração pertinente corresponde aos novos números de elementos e de nós que compõem a malha da nova geometria e consistem em:

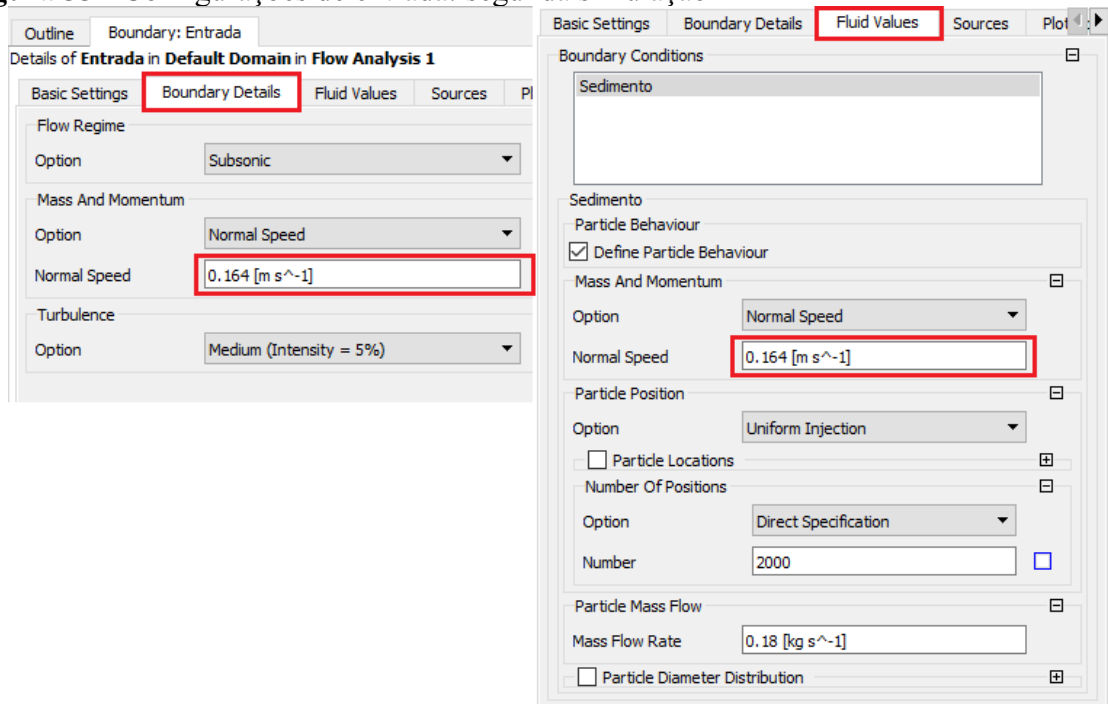
- 482.039 elementos.
- 87.964 nós.

#### 4.4.3 Configuração (CFX-Pre)

Foram necessárias apenas algumas alterações na configuração da simulação apresentada na seção 4.4.1.3 (primeira modelagem), relacionadas a velocidade de entrada da armadilha, localização da comporta de descarga de sedimentos e velocidade de saída da mesma.

Com o aumento da largura da superfície de captação da armadilha, a área da mesma passa a ser igual a  $13,5 \text{ m}^2$  ( $9,00 \text{ m} \times 1,50 \text{ m}$ ), assim, com 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 Figura 33 apresenta estas configurações.

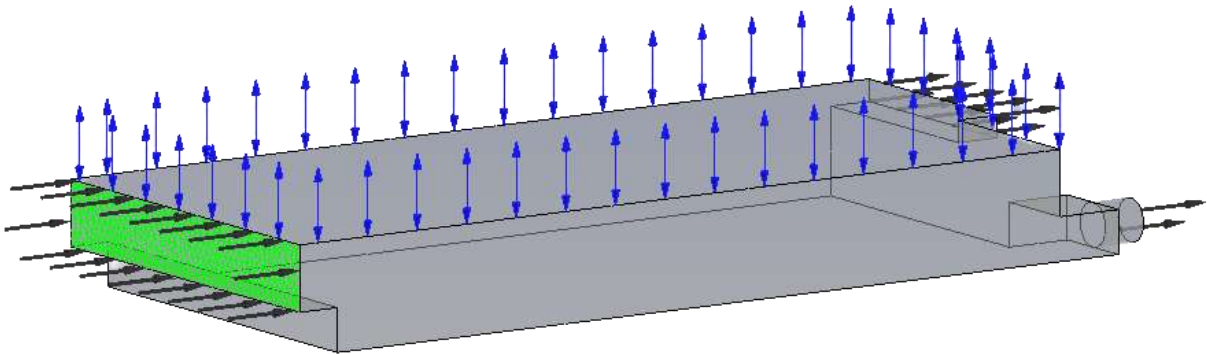
**Figura 33 - Configurações de entrada: segunda simulação**



Fonte: O autor (2020).

A parte em verde da Figura 34 apresenta a definição da superfície de entrada de fluido (água) e de partículas (sedimentos) à armadilha.

**Figura 34 - Configurações da segunda simulação: definição da superfície de entrada**



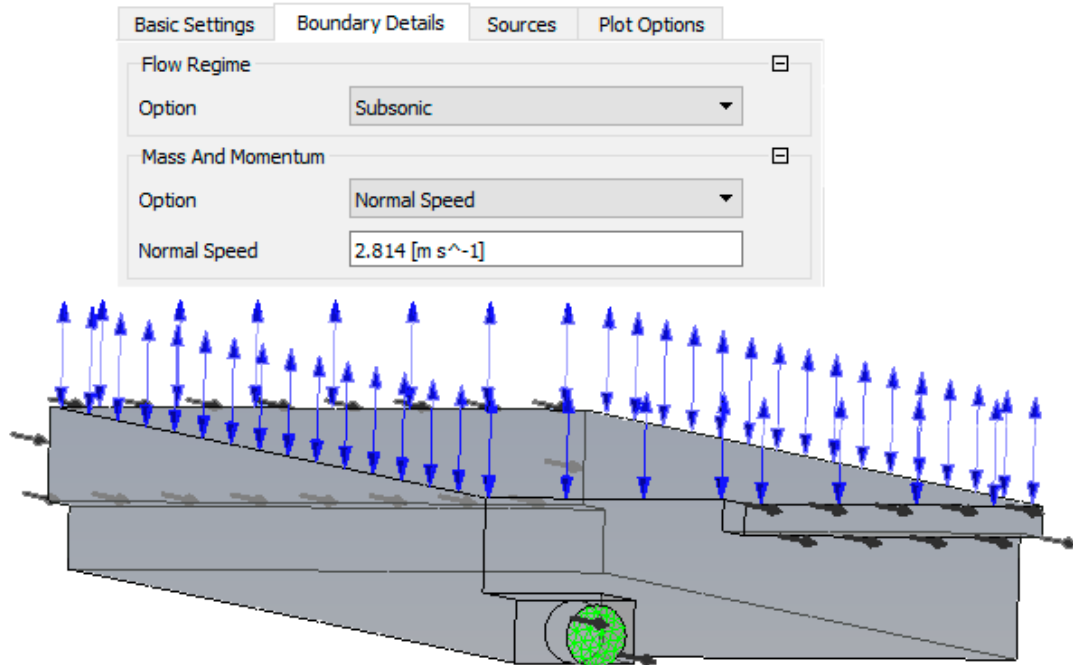
Fonte: O autor (2020).

Como não houveram modificações no local de abertura superior e no vertedouro da armadilha após alterações, considerar as configurações apresentadas em 4.3.1.3.

A Figura 35 apresenta a nova localização e definição da superfície de saída de sedimentos da armadilha, que abrange o volume da tubulação de descarga. Como o diâmetro interno foi aumentado para 1,00 m, a velocidade de descarga de sedimentos por meio desta

superfície foi alterada para 2,814 m/s. Esta configuração e a nova superfície de saída de sedimentos são apresentadas na Figura 35.

**Figura 35** - Configurações da simulação: nova superfície de saída de sedimentos



Fonte: O autor (2020).

A única alteração na configuração do no *solver* do CFX-Pre comparado à primeira simulação consistiu no campo *Maximum Tracking Time*, ou distância de rastreamento que, na segunda simulação precisou ser aumentada para 22 metros, já que esta medida corresponde ao comprimento longitudinal total de transporte de partículas.

#### 4.4.4 Solução: *Start Run*

Deu-se início portanto, ao processo de execução das 100 iterações de forma semelhante à apresentada na seção 4.4.1.4. Durante o segundo processo de simulação, a cada nova iteração as informações e cálculos apresentadas na Figura 36 eram gerados.

**Figura 36 - Segunda simulação: informações apresentadas em cada iteração**

```

=====
OUTER LOOP ITERATION = 6584 ( 3) CPU SECONDS = 1.180E+05 (1.141E+02)
=====
| Equation | Rate | RMS Res | Max Res | Linear Solution |
+-----+-----+-----+-----+-----+
| U-Mom | 0.99 | 3.9E-04 | 7.4E-03 | 4.0E-03 OK|
| V-Mom | 0.98 | 2.6E-03 | 2.6E-02 | 1.5E-03 OK|
| W-Mom | 1.00 | 3.1E-03 | 8.1E-02 | 2.3E-03 OK|
| P-Mass | 0.20 | 2.2E-06 | 9.4E-05 | 12.3 7.0E-02 OK|
+-----+-----+-----+-----+
| ***** Notice ***** |
| A wall has been placed at portion(s) of an OUTLET |
| boundary condition (at 100.0% of the faces, 100.0% of the area) |
| to prevent fluid from flowing into the domain. |
| The boundary condition name is: Saida. |
| The fluid name is: Agua. |
| If this situation persists, consider switching |
| to an Opening type boundary condition instead. |
+-----+-----+-----+-----+
| K-TurbKE | 1.33 | 4.0E-04 | 3.8E-02 | 5.4 2.0E-03 OK|
| E-Diss.K | 1.11 | 2.8E-05 | 5.6E-03 | 12.5 2.5E-06 OK|
+-----+-----+-----+-----+
| Particle Diagnostics |
+-----+-----+-----+-----+
| Particle Fate Diagnostics |
+-----+-----+-----+-----+
| Particle type | Fate type | Particles |
+-----+-----+-----+-----+
| Sedimento | Entered domain | : 2000 |
| | Left domain | : 162 |
| | Exceeded distance limit | : 1832 |
| | Exceeded integration limit | : 6 |
+-----+-----+-----+-----+
| Particle Equation | Total source and source change rates |
+-----+-----+-----+-----+
| | Equation | Source | Rate |
+-----+-----+-----+-----+
| Domain: Default Domain |
+-----+-----+-----+-----+
| Sedimento | x-Mom | 2.908E-01 | 0.0314 |
| | y-Mom | 6.442E-01 | 0.3460 |
| | z-Mom | 1.641E+02 | 0.0079 |
+-----+-----+-----+-----+

```

Fonte: O autor (2020).

## **5 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **5.1 Caracterização da Bacia do Rio do Campo e do Lago**

Para o dimensionamento dos elementos da armadilha de sedimentos, foi necessário calcular o valor da área e das vazões média e máxima da bacia do Rio do Campo, apresentadas a seguir.

#### **5.1.1 Área da Bacia Hidrográfica do Rio do Campo**

De acordo com o que foi apresentado na metodologia deste trabalho, como já existem estudos a respeito do transporte, deposição e caracterização dos sedimentos do lago do parque Joaquim Teodoro de Oliveira, por meio do estudo desenvolvido por Umeki (2012), obteve-se a área da bacia hidrográfica do Rio do Campo igual a 115,9279 Km<sup>2</sup>.

#### **5.1.2 Vazão Média da Bacia do Rio do Campo**

Com a Equação (6) apresentada por Pretzel (2017), obteve-se a vazão média ( $Q_{50}$ ) de 2,21 m<sup>3</sup>/s, já que a área da bacia do Rio do Campo é de 115,93 km<sup>2</sup>.

#### **5.1.2 Vazão Máxima da Bacia do Rio do Campo**

Para determinar a vazão máxima da bacia hidrográfica do Rio do Campo para um período de retorno de 100 anos, foi utilizada a Equação (7). Obteve-se vazão máxima igual a 34,37 m<sup>3</sup>/s.

### **5.2 Primeiro Projeto Construtivo da Armadilha de Sedimentos**

Nesta seção serão apresentados os seguintes resultados:

- Posicionamento da armadilha.
- Determinação da inclinação interna.
- Dimensionamento do captador de água do rio.

- Dimensionamento do vertedor.
- Dimensionamento da armadilha.

### 5.2.1 Posicionamento

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. O posicionamento é apresentado na Figura 37.

**Figura 37** - Posicionamento da armadilha de sedimentos



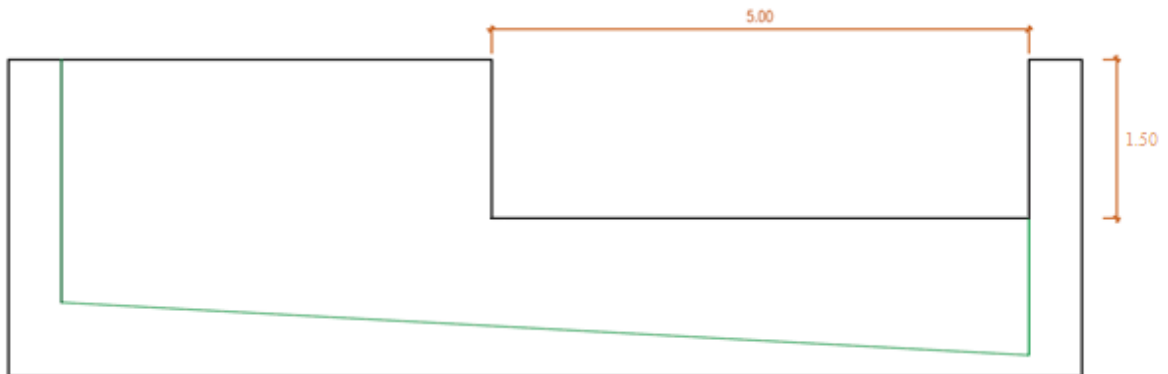
Fonte: Adaptado de Google Maps (2020).

### 5.2.2 Dimensionamento da Captação de Água

Para o dimensionamento da captação estabeleceu-se, inicialmente, largura ( $L$ ) de 3 e altura ( $h$ ) de 0,5 metros e a vazão obtida foi de 1,88 m<sup>3</sup>/s, insuficiente para suprir a vazão média do rio, igual a 2,21 m<sup>3</sup>/s. Assim, aumentou-se  $L$  para 5 metros e manteve-se  $h$ , obteve-se, portanto, vazão ( $Q$ ) igual a 3,18 m<sup>3</sup>/s. No entanto, para obter uma maior margem de segurança em relação à capacidade de vazão da captação da armadilha, aumentou-se a altura ( $h$ ) para 1,5

metros, gerando capacidade de vazão igual a  $15,87 \text{ m}^3/\text{s}$ . Estas medidas estão representadas pela Figura 38.

**Figura 38** - Detalhamento do captador de água

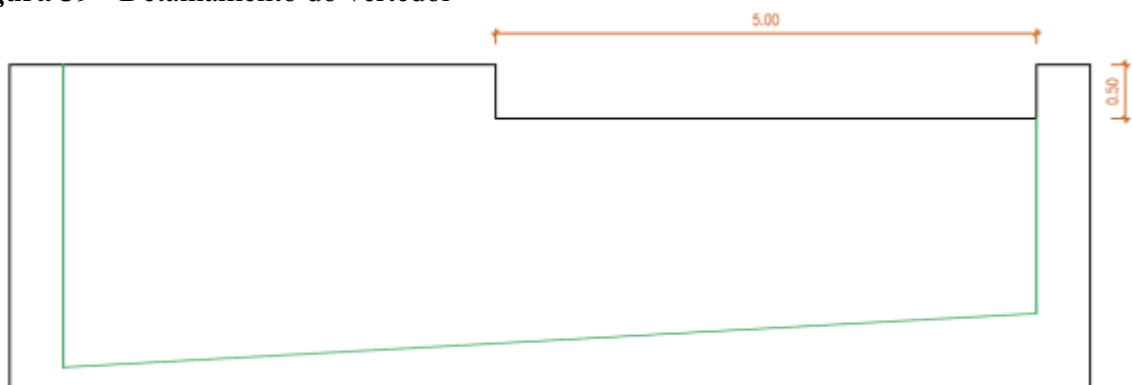


Fonte: O autor (2020).

### 5.2.3 Dimensionamento do Vertedor

Como para o vertedor não há a necessidade de gerar a margem de segurança gerada para a captação, as medidas adotadas para o seu dimensionamento foram de 5 e 0,5 metros para largura ( $L$ ) e altura ( $h$ ), respectivamente, obtendo-se a vazão ( $Q$ ) igual a  $3,18 \text{ m}^3/\text{s}$ . O dimensionamento está representado na Figura 39.

**Figura 39** - Detalhamento do vertedor

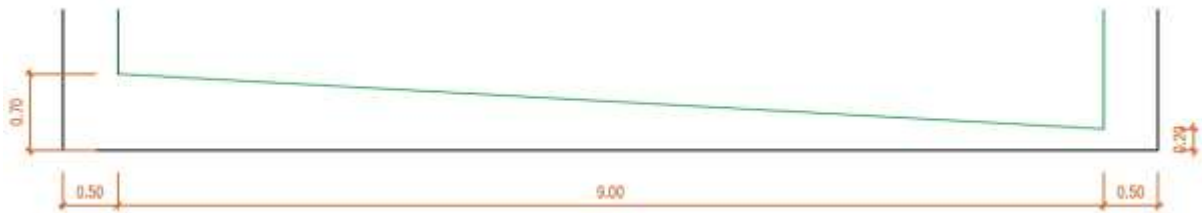


Fonte: O autor (2020).

### 5.2.3 Inclinação Interna

Estabelecer uma inclinação interna à armadilha de sedimentos facilita a deposição dos sedimentos próxima à comporta de descarga. Portanto, foi adotada inclinação de 5,6%, conforme apresenta a Figura 40.

**Figura 40** - Detalhe da inclinação interna da armadilha de sedimentos



Fonte: O autor (2020).

### 5.2.4 Dimensões e Capacidade da Armadilha

Cabe ressaltar que 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 ( $Q = 34,37 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

#### 5.2.4.1 Área

Para o cálculo da área da armadilha de sedimentos foi utilizada a vazão média do Rio do Campo ( $Q_{50}$ ) de  $2,21 \text{ m}^3/\text{s}$  e velocidade crítica de sedimentação ( $V_s$ ) de  $0,021 \text{ m/s}$ . O resultado da área necessária à armadilha foi de  $105,19 \text{ m}^2$ .

#### 5.2.4.2 Determinação da largura e do comprimento

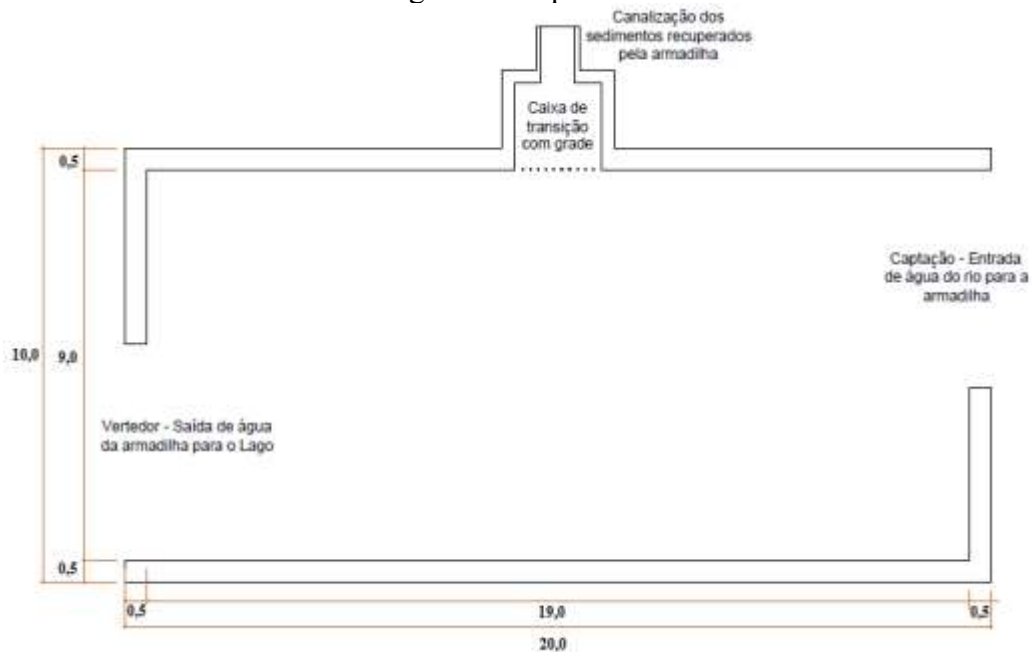
Depois de definida a área necessária à armadilha, considerou-se largura ( $b$ ) de 8 metros e o comprimento pôde ser calculado. Obteve-se comprimento ( $L$ ) igual a 11,69 m.

Conforme já discutido, 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. Ao considerar as espessuras das paredes de 0,5 m tem-se largura total de 10 m e comprimento total de 20 m, conforme apresenta a Figura 41.

**Figura 41** - Medidas da armadilha: largura e comprimento internos e externos



Fonte: O autor (2020).

#### 5.2.4.3 Profundidade

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

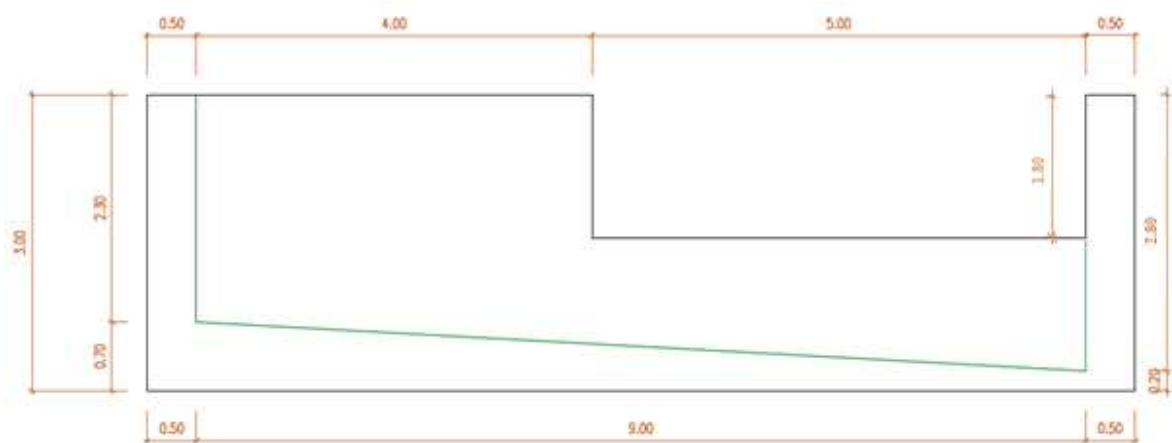
Para isto, é necessário conhecer a velocidade de escoamento longitudinal ( $V$ ) e a vazão  $Q$  (que já temos igual a 2,21 m<sup>3</sup>/s). A NBR 12213 (1992) estabelece que a velocidade de escoamento longitudinal não deva exceder 0,30 m/s, portanto, primeiramente estima-se uma profundidade interna  $h$  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, obtém-se área transversal ( $A$ ) da armadilha igual a 17,96 m<sup>2</sup> e profundidade ( $h$ ) igual a 1,995 m. No entanto, para aumentar a capacidade da armadilha de

sedimentos, conforme se justifica nas próximas seções, adotar-se-á profundidade interna  $h$  de 2,30 metros na parte mais rasa e 2,80 metros na parte mais profunda.

Sendo assim, todas as dimensões da armadilha estão definidas e podem ser claramente visualizadas por meio da Figura 42, que apresenta um corte frontal da mesma com todas as medidas pertinentes.

**Figura 42** - Medidas da armadilha em corte (vista frontal - captação)

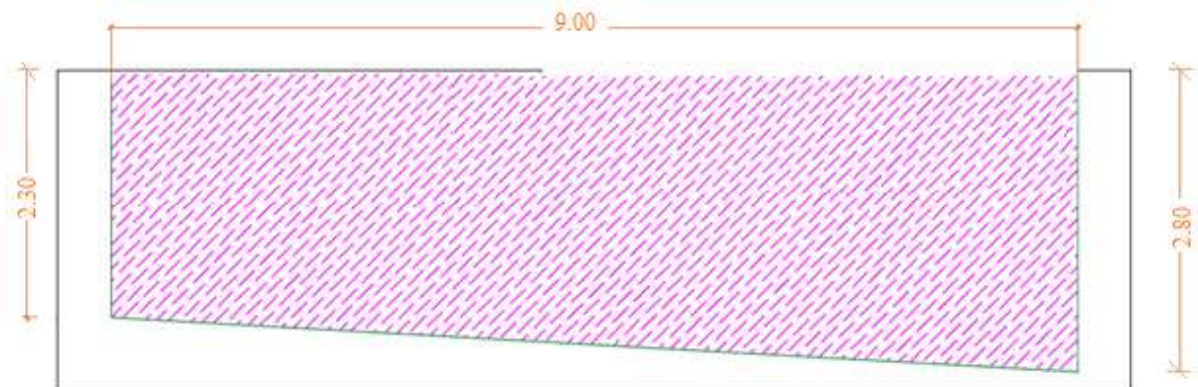


Fonte: O autor (2020).

#### 5.2.4.4 Capacidade de armazenamento de sedimentos

Após determinar as dimensões: largura, comprimento e profundidade, é possível determinar o volume interno da armadilha de sedimentos, mas primeiramente cabe representar em corte o volume interno da armadilha de sedimentos por meio da Figura 43.

**Figura 43** - Valores das incógnitas para determinação do volume interno



Fonte: O autor (2020).

É possível, portanto, calcular a capacidade de armazenamento da armadilha, igual a 436,05 m<sup>3</sup>. Cabe lembrar que o comprimento interno ( $L$ ) da armadilha de sedimentos é de 19 metros.

Umeki (2012) afirma nos resultados de seu estudo a respeito do transporte de sedimentos na bacia hidrográfica do Rio do Campo que adentra ao parque cerca de 3704,80 toneladas de sedimentos ao ano. Para complementar este dado, o autor Carvalho et al. (2000) aborda o peso específico aparente médio de depósitos de sedimentos, igual a 1,5 toneladas por metro cúbico (1,5 ton/m<sup>3</sup>).

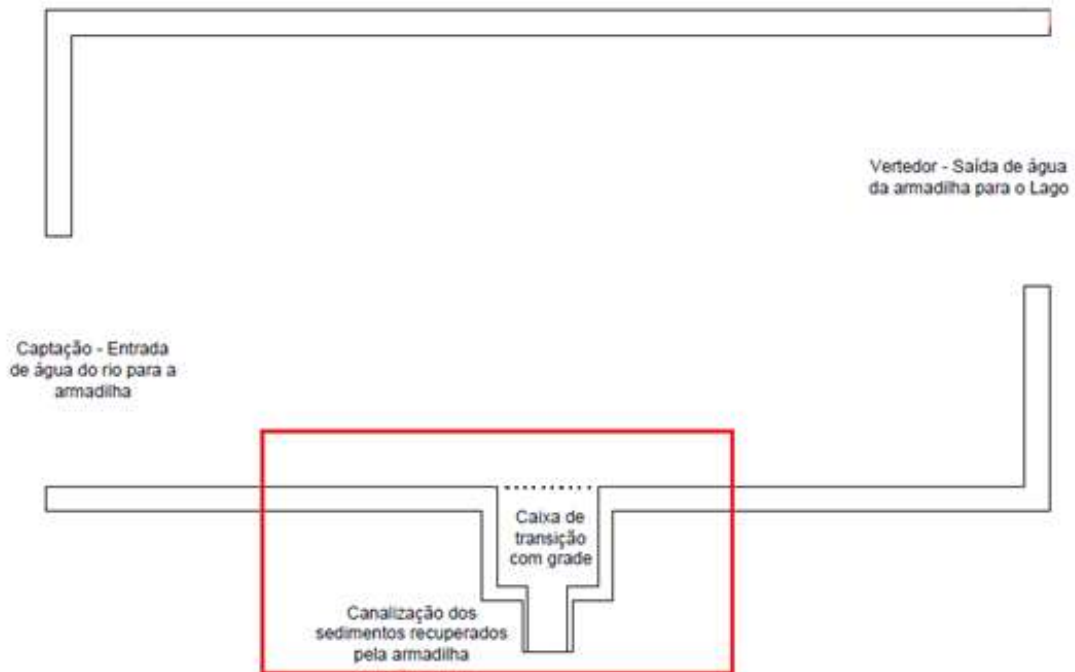
Ao considerar eficiência de captação de 70% a armadilha, a mesma tem capacidade de reter 2593,36 toneladas de sedimentos por ano e impedir que adentrem no lago do parque Joaquim Teodoro de Oliveira.

Dividindo-se a quantidade de sedimentos retidos ao ano (2593,36 ton/ano) pelo peso específico médio dos sedimentos (1,5 ton/m<sup>3</sup>) determina-se esta quantidade em m<sup>3</sup> ao ano, igual a 1729 m<sup>3</sup>/ano.

#### 5.2.5 Elementos que Promovem a Descarga dos Sedimentos Retidos

Os elementos que promovem a descarga dos sedimentos retidos pela armadilha são uma caixa de transição com gradeamento (para impedir a passagem de materiais grosseiros, flutuantes ou em suspensão) 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. Estes elementos podem ser visualizados, em planta, por meio da Figura 44 e serão dimensionados nesta seção.

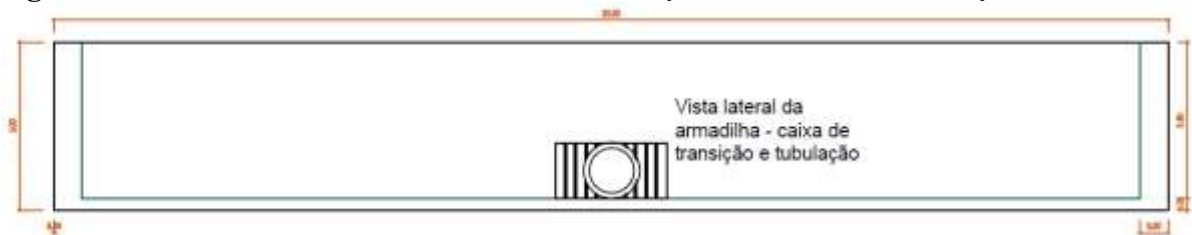
**Figura 44** - Vista em planta da caixa de transição e da tubulação



Fonte: O autor (2020).

Já na Figura 45 é possível visualizar a caixa de transição na lateral da armadilha de sedimentos em corte, assim como a representação do gradeamento e da tubulação conectada a ela.

**Figura 45** - Vista lateral em corte da caixa de transição e do início da tubulação



Fonte: O autor (2020).

A seguir serão apresentados os dimensionamentos dos elementos acima evidenciados.

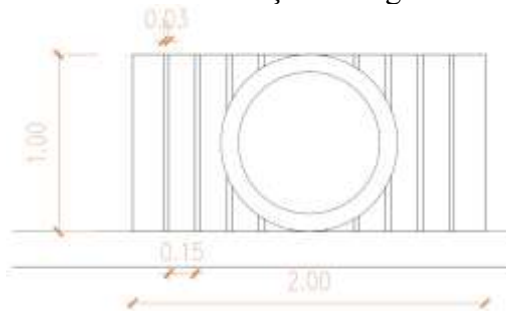
#### 5.2.5.1 Caixa de transição e gradeamento

O resultado do dimensionamento da abertura da caixa de transição para liberação dos sedimentos retidos na armadilha, feito com base na equação 08 (Tabela 1) é apresentado a seguir. Optou-se por uma caixa de transição com as seguintes medidas internas: Largura ( $L$ ) de

2,00 m e altura ( $h$ ) de 1,00 m. Obteve-se, assim, capacidade de vazão igual a 3,31 m<sup>3</sup>/s à caixa de transição. Cabe explicar que a espessura adotada para as paredes da caixa de transição foi de 0,20 m.

Como trata-se de uma caixa de transição composta por gradeamento, também é necessário dimensioná-lo. Como a NBR 12213 (1992) diz que o espaçamento entre as barras que compõem este gradeamento deve ser de 7,5 a 15 cm para grade grosseira, adotou-se espaçamento de 15 cm e barras de seção transversal quadrada conforme as possibilidades apresentadas por meio da Figura 13: (A) 9 cm<sup>2</sup> (3cm x 3cm). Os detalhes da caixa de transição são apresentados na Figura 46.

**Figura 46** - Medidas internas da caixa de transição e do gradeamento



Fonte: O autor (2020).

Como o gradeamento é um elemento que gera perda de carga durante o transporte dos sedimentos, esta perda também foi calculada e é apresentada a seguir.

Primeiramente, para o cálculo da perda de carga  $h$  (Equação (15) - Tabela 1), é necessário conhecer a velocidade média de aproximação ( $V$ ), obtida por meio da relação entre a capacidade de vazão (3,31 m<sup>3</sup>/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, ainda para determinar o valor da perda de carga  $h$ , 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 (16) (Tabela 1) e obteve-se coeficiente  $k = 0,284$  (adimensional). Cabe ainda salientar que o ângulo da grade em relação a horizontal foi  $90^\circ$ . Tem-se, portanto, um coeficiente de perda de carga em função dos parâmetros geométricos das barras ( $\beta$ ) igual a 2,42 - Figura 13 (adimensional).

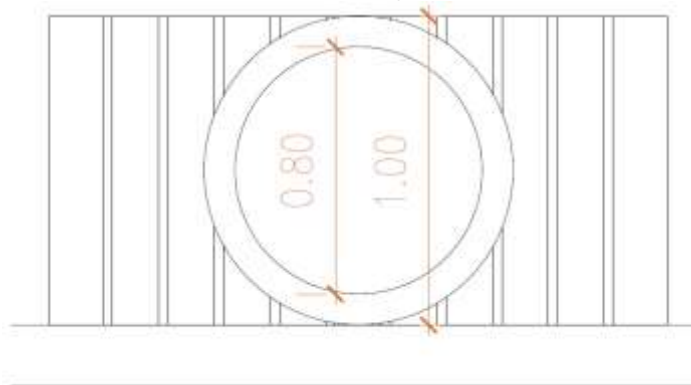
Finalmente, é possível determinar perda de carga  $h$  igual a 0,040 m gerada pela inserção do gradeamento na caixa de transição.

### 5.2.5.2 Determinação dos diâmetros e verificação da capacidade de vazão

Com relação ao dimensionamento da tubulação, a princípio determina-se que o diâmetro externo ocupará toda a seção transversal da caixa de transição (medindo 1,00 m) e o diâmetro interno medirá 0,80m. Depois de pré-estabelecidos estes valores, determinou-se área da seção transversal da tubulação igual a 0,5 m<sup>2</sup> e vazão ( $Q$ ) de 0,83 m<sup>3</sup>/s.

O detalhamento desta etapa de dimensionamento é apresentado na Figura 47.

**Figura 47** - Diâmetros interno e externo da tubulação



Fonte: O autor (2020).

### 5.2.5.3 Transporte e destinação final dos 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, conforme apresentado pela Figura 48. Esta decisão se deve ao fato desta opção ser a mais “autossustentável”, ou seja, não necessitar de nenhuma intervenção humana, com exceção do acionamento das comportas de descarga, caso opte-se que a mesma seja manual. A figura a seguir apresenta a 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.

**Figura 48** - Localização do canal de transporte de sedimentos e ponto final de descarte



Fonte: Adaptado de Google Maps (2020).

### 5.2.6 Apresentação da Armadilha de Sedimentos em Perspectiva

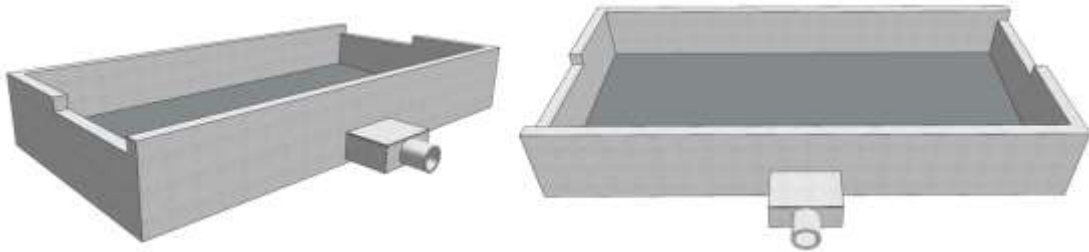
Com o objetivo de tornar mais clara a visualização do projeto da armadilha de sedimentos, serão apresentadas algumas visualizações em três dimensões da mesma. Além disto, como nas seções anteriores já foram apresentadas e discutidas todas as medidas da armadilha de sedimentos por meio de plantas e cortes cotados, agora serão apresentadas somente as perspectivas da mesma.

#### 5.2.6.1 Perspectiva: lateral direita (caixa de transição)

Por meio da Figura 49 apresenta-se o projeto em três dimensões da armadilha de sedimentos com detalhamento de seu lado direito, onde se encontra a caixa de transição e a respectiva tubulação.



**Figura 49** - Projeto em três dimensões da armadilha de sedimentos: lateral direita

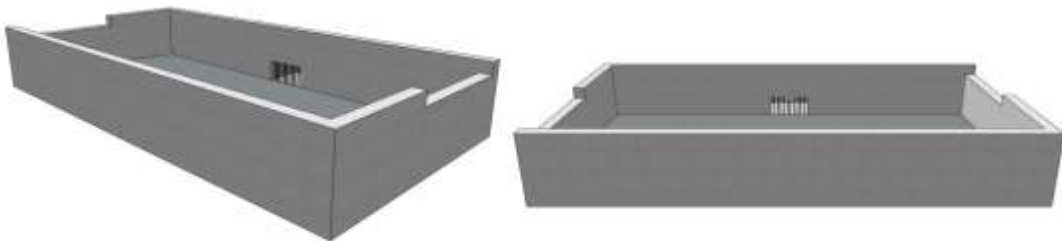


Fonte: O autor (2020).

#### 5.2.6.2 Modelagem em 3D: lateral esquerda

Já por meio da Figura 50 observa-se a perspectiva (em três dimensões) da lateral esquerda da armadilha de sedimentos.

**Figura 50** - Projeto em três dimensões da armadilha de sedimentos: lateral esquerda

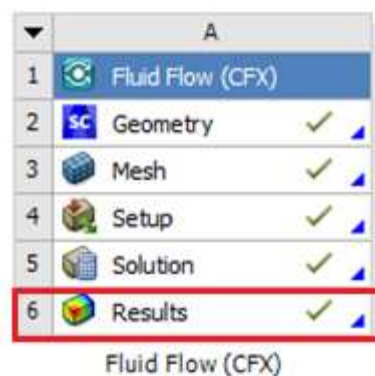


Fonte: O autor (2020).

### 5.3 Modelagem Numérica: Primeira Simulação

Os resultados gerados após toda a configuração da simulação são apresentados em *Results*, conforme destacado na Figura 51.

**Figura 51** - Resultados da simulação



Fonte: O autor (2020).



A apresentação dos resultados gerados será dividida em três partes:

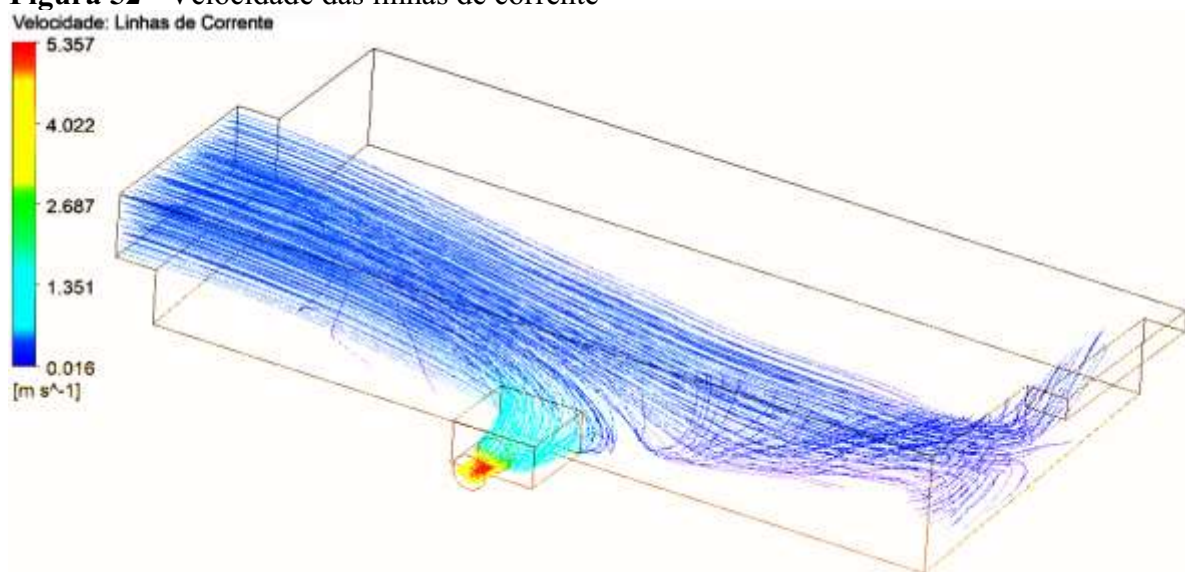
- Linhas de Corrente.
- Partículas.
- Transporte de Partículas.

A Figura 52 apresenta o resultado das linhas de corrente obtidas. A apresentação gráfica e a legenda destas linhas podem ser configuradas com o objetivo de otimizar a representação da simulação do fluxo de corrente no interior da armadilha de sedimentos. Observa-se, conforme esperado, que a maior velocidade das linhas de corrente ocorre na tubulação da armadilha de sedimentos, já que esta apresenta volume com menor seção transversal.

Este primeiro resultado permite observar que existe uma “zona morta” na armadilha de sedimentos devido a captação não ocupar toda a largura frontal da armadilha, assim como observa-se que a substituição da localização da caixa de transição e tubulação na lateral pela face onde encontra-se o vertedor facilitaria a descarga dos sedimentos, já que a comporta passaria a estar localizada em uma área favorecida pelo sentido das linhas de corrente.

Sendo assim, o primeiro resultado gerado pela simulação já sugere a necessidade de alterações no projeto construtivo inicial da armadilha de sedimentos, que serão apresentadas na próxima seção.

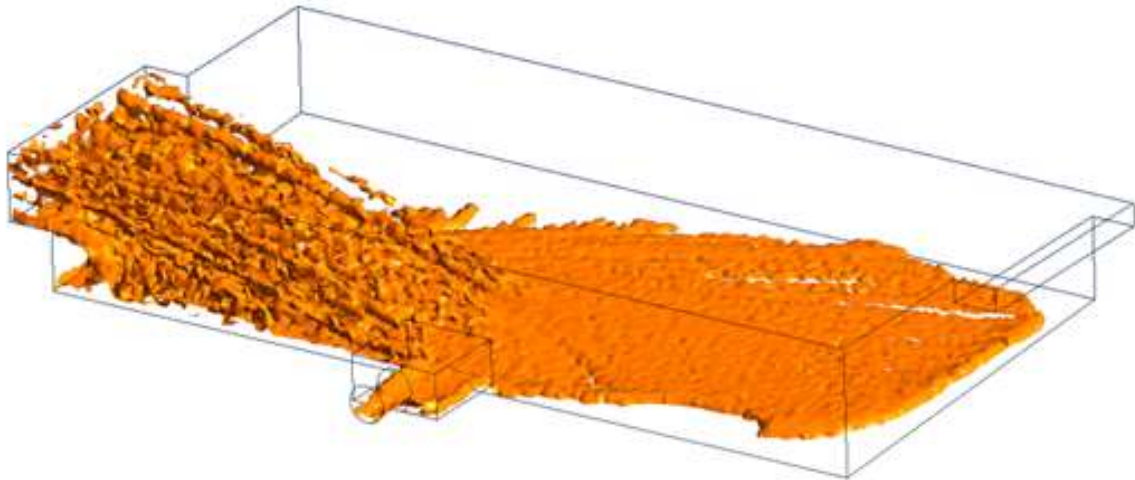
**Figura 52 - Velocidade das linhas de corrente**



Fonte: O autor (2020).

A Figura 53 apresenta a simulação das partículas (sedimentos) no interior da armadilha.

**Figura 53** - Simulação do preenchimento com sedimentos

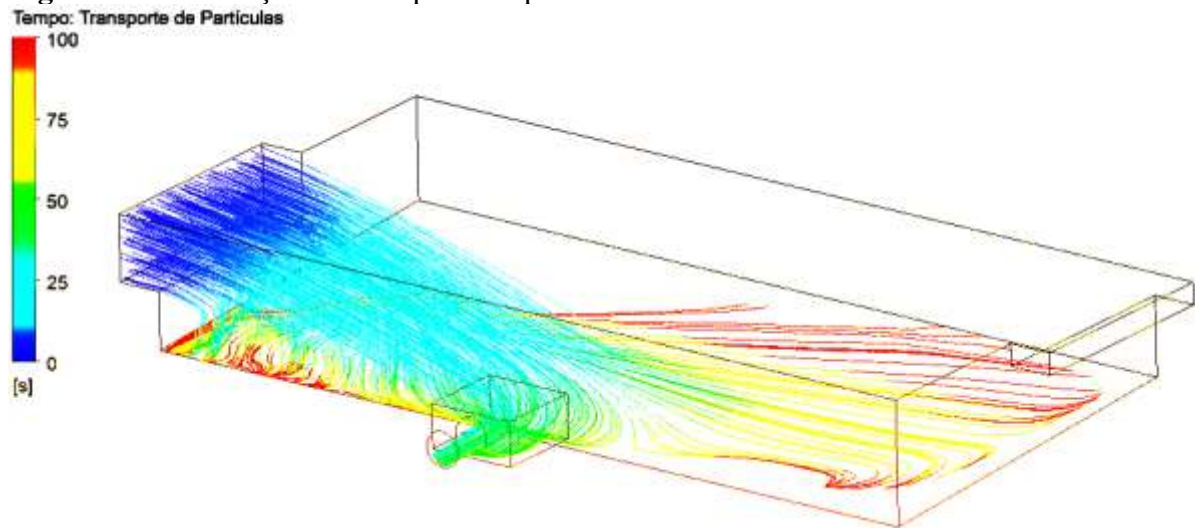


Fonte: O autor (2020).

Novamente é possível observar a “zona morta”, assim denominada anteriormente, caracterizada pela região da armadilha que, neste caso, inicialmente não é preenchida com sedimentos. Ressalta-se, portanto, a importância do aumento das dimensões da captação da armadilha, que além de eliminar a “zona morta”, aumenta a capacidade de vazão da entrada da mesma.

Finalmente, a Figura 54 apresenta a representação do transporte de partículas no interior da armadilha de sedimentos. Foram utilizadas 400 linhas para esta apresentação, que representam o percurso das partículas no decorrer do tempo, ou seja, no início da contagem do tempo as partículas se encontram representadas pela parte em azul escuro, já no tempo de 100 segundos estas partículas estão localizadas nas partes em que as linhas aparecem em vermelho. Observa-se, portanto, que as partículas se depositam praticamente ao longo de toda a armadilha.

**Figura 54** - Simulação do transporte de partículas



Fonte: O autor (2020).

Esta simulação permitiu observar a necessidade de algumas alterações a serem feitas na armadilha de sedimentos projetada e que alteraram tanto o projeto construtivo inicial, quando a sua simulação, já que serão necessárias algumas alterações na geometria:

- Aumento das dimensões da captação.
- Alteração da localização da comporta de descarga de sedimentos (caixa de transição e tubulação).
- Aumento da seção da tubulação de descarga.
- Retirada da inclinação interna.

O aumento das dimensões da captação da armadilha, mais especificamente da largura da mesma se justifica devido a esta alteração eliminar a “zona morta” gerada, observada por meio da primeira simulação nas Figuras 52, 53 e 54. Além disto, esta alteração aumenta a capacidade de vazão da captação e garante maior margem de segurança para condições de extravasamento da armadilha.

A alteração da localização da comporta de descarga para a face paralela à entrada da armadilha facilitará a descarga dos sedimentos, pois quando o esvaziamento for necessário, a face da comporta estará localizada perpendicularmente ao sentido das linhas de corrente.

Observou-se, pelo cálculo da velocidade do fluxo na seção transversal da tubulação, que a velocidade na mesma seria de, aproximadamente 5 metros por segundo. Para melhorar o

aspecto geométrico e diminuir a velocidade, optou-se por aumentar a seção do volume interno da tubulação de 0,80 m para 1,00 m.

Finalmente, com a alteração da localização da comporta de descarga de sedimentos, verifica-se que a inclinação interna não é mais necessária, já que o esvaziamento da armadilha é facilitado pelo sentido do fluxo das linhas de corrente.

Todas as alterações apontadas estão descritas na próxima seção.

#### 5.4 Alterações no Projeto Após Primeira Simulação

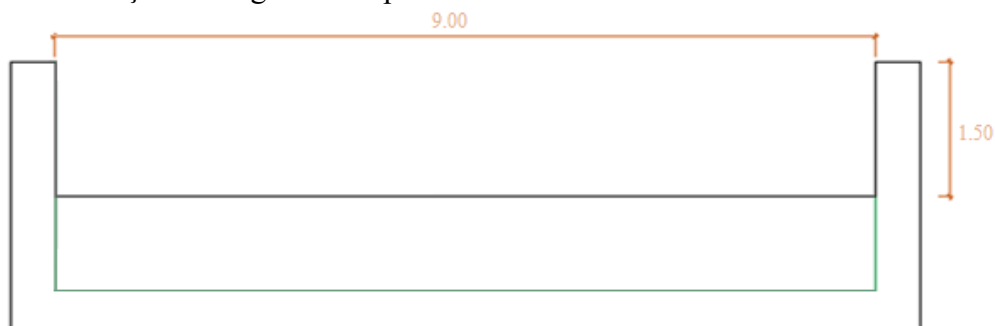
Nesta seção serão realizadas as alterações no projeto construtivo da armadilha de sedimentos sugeridas na seção anterior. Para estas alterações se partirá dos resultados do projeto gerados na seção 5.2.

##### 5.4.1 Aumento das Dimensões da Captação

No primeiro projeto construtivo da armadilha de sedimentos foi apresentado o dimensionamento da captação de água, que aqui serão modificados.

Para eliminar a “zona morta”, a captação deve ocupar toda a largura frontal da armadilha, ou seja,  $L$  que anteriormente foi definido como 5 metros medirá 9 metros. A altura  $h = 1,50$  metros será mantida. Esta alteração é apresentada na Figura 55.

**Figura 55** - Alteração da largura do captador

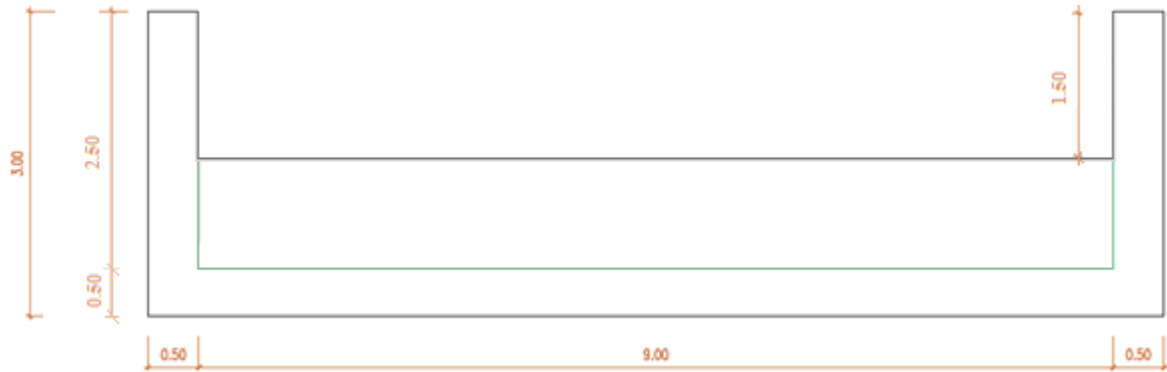


Fonte: O autor (2020).

Com a alteração das dimensões do captador, a capacidade de vazão do mesmo precisa ser recalculada. Para isto, é utilizada a Equação (8) da Tabela 1. Obtém-se, assim, capacidade de vazão ( $Q$ ) igual a 29,38 m<sup>3</sup>/s.

A visualização frontal da armadilha de sedimentos após alteração da captação é apresentada na Figura 56.

**Figura 56** - Vista frontal em corte da armadilha de sedimentos após alterações



Fonte: O autor (2020).

#### 5.4.2 Alteração da Localização da Comporta de Descarga de Sedimentos

A localização inicial da comporta de descarga de sedimentos composta por uma caixa de transição e a tubulação foi apresentada na seção 5.2.5. A alteração desta localização é apresentada por meio da Figura 57.

**Figura 57** - Nova localização da comporta de descarga dos sedimentos

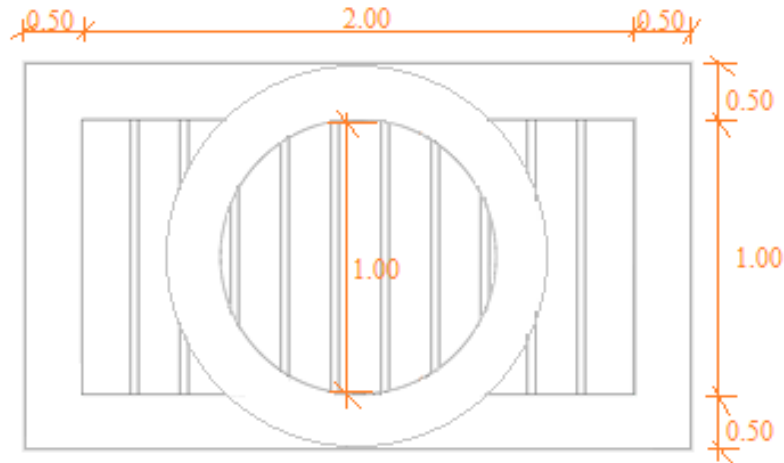


Fonte: O autor (2020).

#### 5.4.3 Aumento do Diâmetro da Tubulação de Descarga de Sedimentos

Também se optou por aumentar o diâmetro interno (e conseqüentemente o externo) da tubulação de descarga de sedimentos com o objetivo de diminuir a velocidade de descarga. Este aumento pode ser observado por meio da Figura 58.

**Figura 58** - Alteração no diâmetro da tubulação de descarga de sedimentos



Fonte: O autor (2020).

Com o diâmetro interno da tubulação igual a 1 metro, obtém-se área da seção transversal 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 têm-se volume interno igual a  $427,5 \text{ m}^3$ .

#### 5.4.4 Eliminação da Inclinação Interna

Como após as alterações (eliminação da inclinação interna) a profundidade interna determinada foi de 2,50 metros, fez-se necessário verificar a velocidade de escoamento  $V$  (no primeiro projeto calculada na seção 5.2.4.3), que, de acordo com a NBR 12213 (1992) não pode exceder  $0,30 \text{ m/s}$ . Ao verificar  $V$  para a profundidade de 2,50 metros (Equação (12) - Tabela 1), obtém-se  $V = 0,098 \text{ m/s}$ , que satisfaz a condição estabelecida por Tsutiya (2006).

Conforme já apresentado em 5.4.3 a capacidade de armazenamento de sedimentos da armadilha após as modificações pertinentes é de  $427,5 \text{ m}^3$ . Ao considerar eficiência de 70% de retenção de sedimentos, a mesma deve impedir que  $1729 \text{ m}^3$  de sedimentos adentrem ao lago por ano.

### 5.5 Tabela Comparativa: Alterações 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

Fonte: O autor (2020).

### 5.6 Modelagem Numérica: Simulação Final

A apresentação dos resultados da segunda simulação será feita de forma semelhante à primeira, ou seja: linhas de corrente, partículas e transporte de partículas.

A Figura 59 apresenta um comparativo entre os resultados das linhas de corrente obtidos na primeira (Figura 59 - a) e segunda simulação (Figura 59 - b).

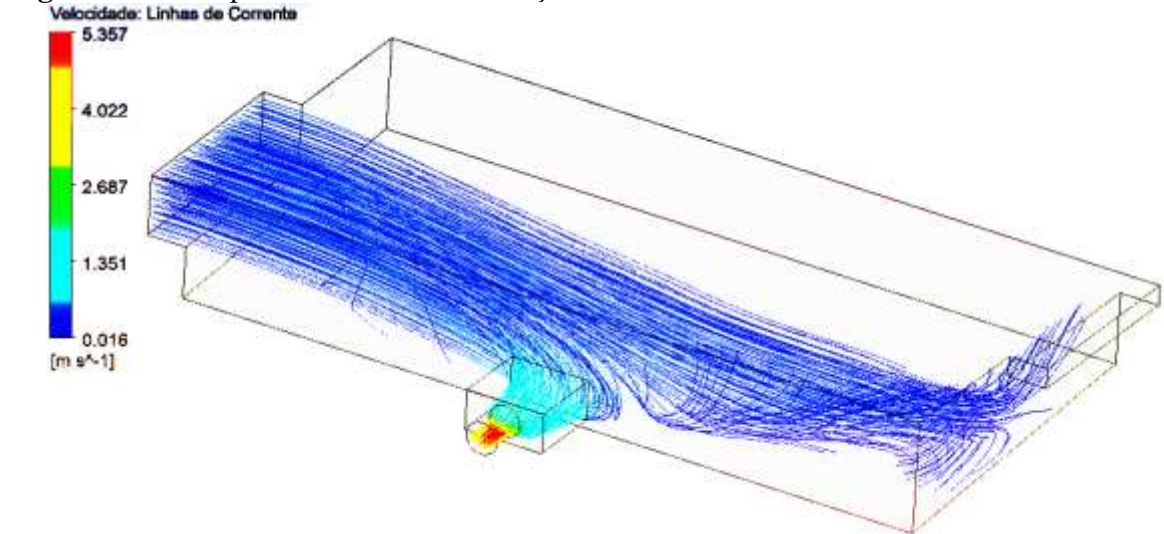
Novamente, conforme esperado, observa-se maior velocidade das linhas de corrente na tubulação de descarga de sedimentos, já que esta ainda apresenta volume com menor seção transversal. No entanto, na segunda simulação (Figura 59 - b) esta velocidade é menor, já a velocidade de entrada é menor e o diâmetro da tubulação de descarga é maior quando comparados com o resultado de linhas de corrente da primeira simulação (Figura 59 - a).



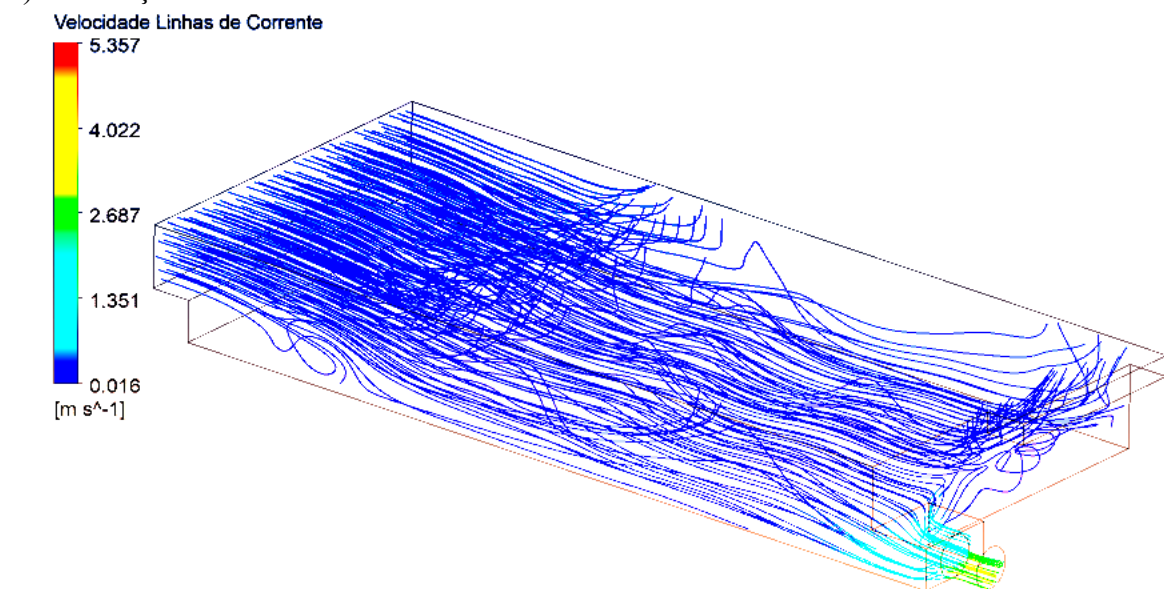
Observa-se que a “zona morta” gerada nos resultados da primeira simulação foi eliminada na segunda, devido a superfície de captação de fluido do rio passar a ocupar toda a largura do volume interno frontal da armadilha.

A substituição da localização da caixa de transição facilita a descarga dos sedimentos, pois passa a ser favorecida pelo sentido das linhas de corrente.

**Figura 59** - Comparativo entre as simulações de linhas de corrente



a) Simulação 1



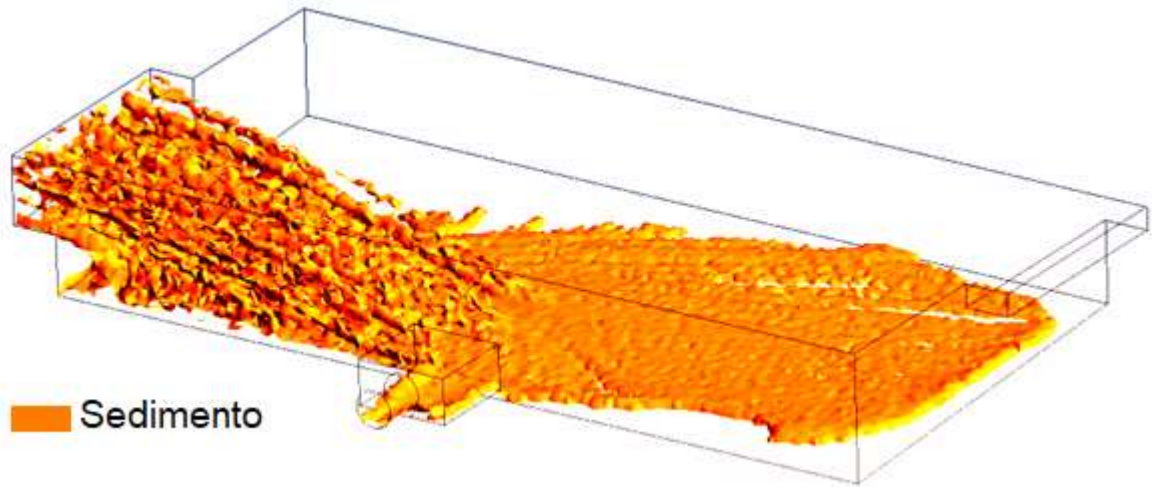
b) Simulação 2

Fonte: O autor (2020).

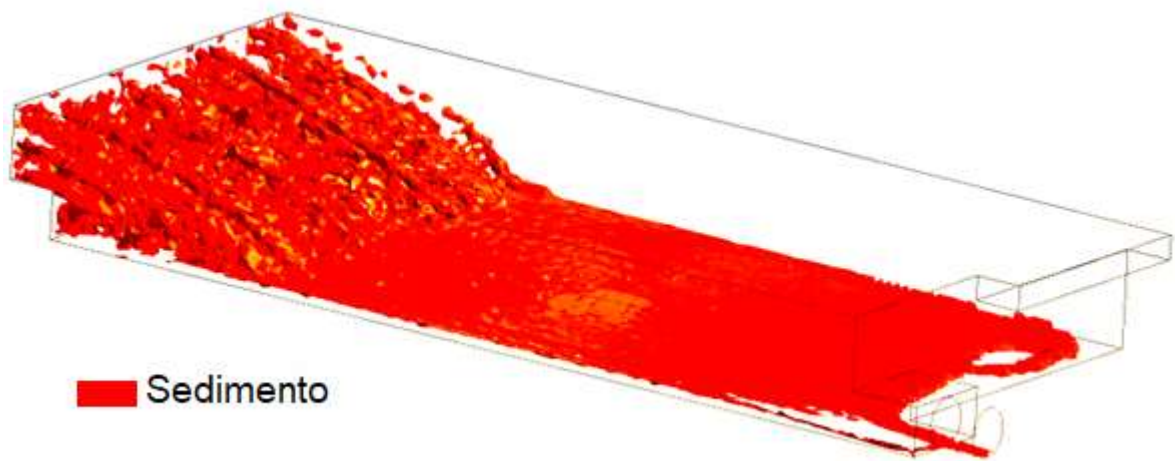
A Figura 60 apresenta o comparativo dos resultados das partículas (deposição dos sedimentos no interior da armadilha), obtidos nas duas simulações realizadas.



**Figura 60** - Comparativo entre as simulações de preenchimento com sedimentos



a) Simulação 1



b) Simulação 2

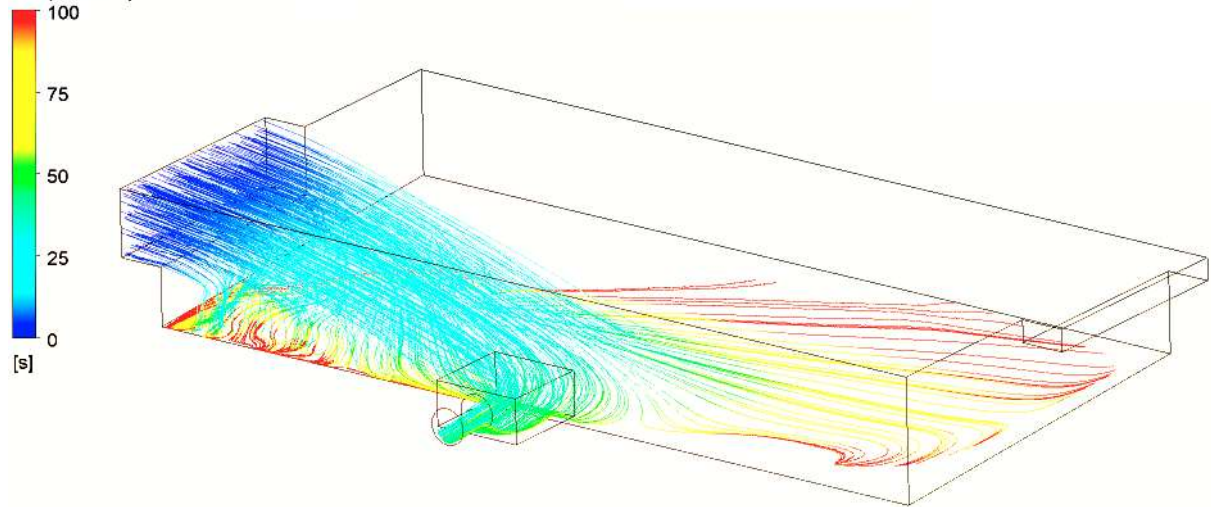
Fonte: O autor (2020).

Neste comparativo também é evidente a eliminação da “zona morta” (Figura 60 – b) após as alterações pertinentes promovidas na armadilha

Finalmente, a Figura 61 apresenta o comparativo dos resultados de transporte de partículas no interior da armadilha. Foram utilizadas as mesmas configurações apresentadas na seção 5.3 para facilitar a análise comparativa das linhas que representam o transporte e deposição das partículas no decorrer do tempo (100 segundos).

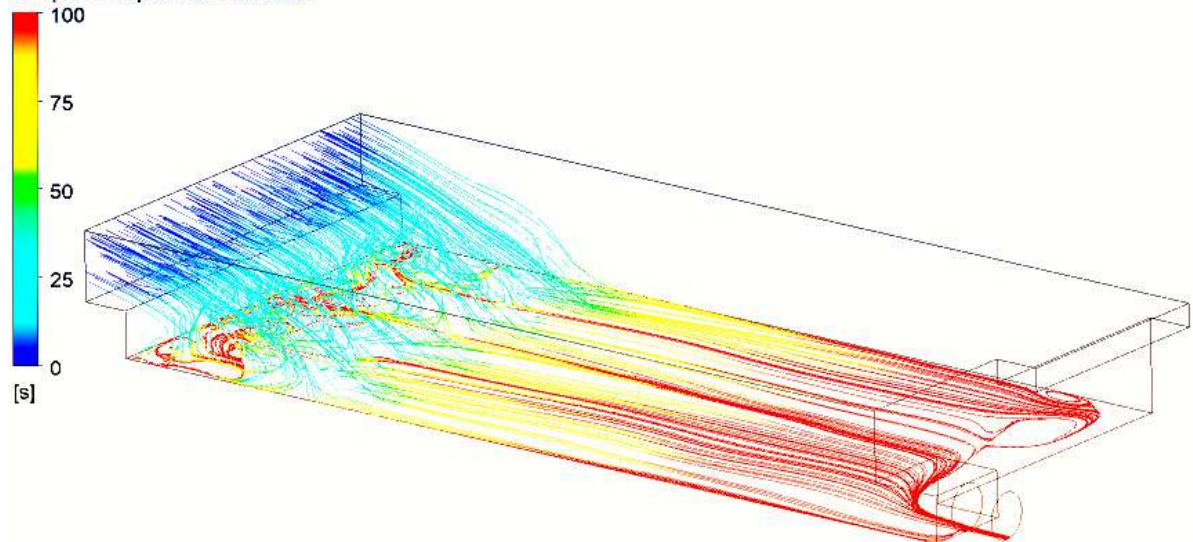
**Figura 61** - Comparativo das simulações do transporte de partículas

Tempo: Transporte de Partículas



a) Simulação 1

Tempo: Transporte de Partículas



b) Simulação 2

Fonte: O autor (2020).

Assim como no comparativo da Figura 59, observa-se que a deposição das partículas no interior da armadilha na simulação 2 (Figura 61 – b) acontece antes do observado no resultado da primeira simulação (Figura 61 – a). Isto ocorre devido ao aumento da área de captação e consequente redução da velocidade de entrada de fluido à armadilha. No entanto, como os sedimentos estão “diluídos” na água, seu fluxo (representado pelas linhas de corrente na Figura 59 – a e b) acaba por “empurrar” estes sedimentos para fora da armadilha quando a comporta de esvaziamento é acionada.

### 5.7 Eficiência da Armadilha de Sedimentos

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: 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.

No entanto, 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.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

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, por meio de estudos a respeito da bacia hidrográfica que envolve o Rio do Campo e o lago em questão, 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 (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 projeto inicial, o que comprova a importância da utilização desta ferramenta na concepção de projetos construtivos. Além disto, depois de otimizar o projeto inicial, por meio de uma nova simulação numérica os benefícios puderam ser comprovados.

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 (Figura 61). 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, ou seja, que pode ser submetido a alterações para ser executado e implantado em outros lagos/ reservatórios, isto o transforma em uma ferramenta de controle e combate ao assoreamento, processo natural que atinge praticamente todos os reservatórios existentes.

A inovação tecnológica está presente na utilização da modelagem numérica associada à fluidodinâmica computacional. A vantagem e os benefícios de sua utilização são enormes, já que a mesma permite analisar, precisamente, o funcionamento da armadilha antes que ela seja

executada. Isto garante eficiência e conseqüente economia de recursos, caso o projeto venha a ser executado.

Finalmente, foram apresentadas algumas possíveis formas de descarte dos sedimentos capturados pela armadilha. A indicada, neste caso, foi o lançamento dos mesmos no Rio do Campo, por transporte em canal aberto até o ponto final de descarga localizado logo após a barragem do lago, como medida impeditiva de que estes adentrem ao reservatório em questão. No entanto, a forma de descarte pode ser determinada de acordo com as características e disponibilidades de cada local. Apenas neste caso verificou-se que, para que a armadilha se “auto sustente”, ou seja, não necessite de intervenção humana periódica, esta forma é a mais viável.

### **6.1 Sugestões para Trabalhos Futuros**

Com relação ao projeto construtivo da armadilha de sedimentos, sugere-se realizar o dimensionamento do canal aberto de descarga de modo a descrever e detalhar inclinações, extensões, desenvolver o projeto de escavação de valas, etc. Além de se providenciar a solicitação de toda a documentação necessária para implantação deste projeto, que inclui as licenças ambientais necessárias.

Como ao decorrer do texto foram apresentadas outras opções para destinação final dos sedimentos capturados pela armadilha, cabe sugerir que estas opções sejam estudadas e projetadas. Por exemplo, caso seja mais viável adotar um sistema de doação ou venda dos sedimentos, também é necessário providenciar as licenças acima descritas, já que é necessária uma deposição prévia do material de descarte antes do carregamento. Ambientalmente esta seria a opção mais viável, já que a reutilização dos sedimentos gera menor impacto ambiental pelo fato de possivelmente os sedimentos conterem por poluentes em sua composição.

Caso o sistema acima seja adotado, sugere-se que a localização da destinação final dos sedimentos seja de fácil acesso para as retiradas por caminhões e que os depósitos não fiquem armazenados neste local por muito tempo e se tornem um fator de risco para o aumento da poluição. As inclinações e extensões do canal aberto também precisam ser dimensionadas e isto se adequa a uma possível continuação deste trabalho.

Finalmente, para refinar e otimizar os resultados obtidos pelas simulações e atribuir uma eficiência mais realista à armadilha de sedimentos, sugere-se inserir nas características do material sedimento (no CFX – Pre), a sua classificação granulométrica.

## REFERÊNCIAS

- ALVES, M. C.; SUZUKI, L. G. A. S.; SUZUKI, L. E. A. S. Densidade do solo e infiltração de água como indicadores da qualidade física de um Latossolo Vermelho distrófico em recuperação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa (MG), v. 31, n. 4, p. 617-625, ago. 2007. Disponível em: <https://www.redalyc.org/pdf/1802/180214056002.pdf>. Acesso em: 15 jul. 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12213: **Projeto de captação de água de superfície para abastecimento público - procedimento**. Rio de Janeiro, 5 p. 1992.
- BARBOSA, A. A. **Correntes de densidade em reservatórios**. 1999. 278 p. (Tese de doutorado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-04042006-145417/publico/TESE.pdf>. Acesso em: 27 jul. 2019.
- BARROSO, D. G.; SILVA, M. L. N. (1992). Poluição e conservação dos recursos naturais: solo e água. **Informe agropecuário**, Belo Horizonte (MG), v. 176, n. 16, p. 17-24, mar. 1992.
- BEASLEY, R. P. **Erosion and sediment pollution control**. 1.ed. Ames – EUA: Iowa State Pr, abr. 1972.
- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. São Paulo: Editora Ícone, 1990.
- BILHALVA, A. G. **Batimetria de pequenos reservatórios através de metodologia convencional e alternativa**. 2013. 73 f. (Dissertação de Mestrado em Geomática) - Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria - RS, 2013. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/9575/BILHALVA%2C%20WAGNER%20DANTON%20DE%20BITTECOURT.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 08 ago. 2019.
- BRANCO, S.M.; ROCHA, A.A. **Poluição, proteção e usos múltiplos de represas**. São Paulo: Edgard Blucher, 1977.
- CABRAL, J. B. P. Estudo do processo de assoreamento em reservatórios. **Revista Eletrônica Caminhos da Geografia**, Uberlândia (MG), v. 6, n. 14, p. 62-69, fev. 2005. Disponível em: <http://www.seer.ufu.br/index.php/caminhosdegeografia/article/view/15371/8670>. Acesso em: 12 ago. 2019.
- CARVALHO, N. O. et al. **Guia de avaliação de assoreamento de reservatórios**. Brasília - DF: ANEEL, 2000. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/biblioteca/downloads/livros/guiaasso.pdf>. Acesso em: 18 ago. 2019.
- CARVALHO, N. O. et al. **Guia de práticas sedimentométricas**. Brasília - DF: ANEEL, 2000. Disponível em: [http://www2.aneel.gov.br/biblioteca/downloads/livros/Guia\\_prat\\_port.pdf](http://www2.aneel.gov.br/biblioteca/downloads/livros/Guia_prat_port.pdf). Acesso em: 18 ago. 2019.

CARVALHO, N. O. **Hidrossedimentologia prática**. Rio de Janeiro: CPRM Eletrobras, 1994.

ELIAS, A. R. **Assoreamento de represas: estimativa por meio da integração batimetria - GPS**. 2003. 75 p. (Hidrologia) – Unioeste, Cascavel – PR, 2003.

ENGEVIX, S. A. **Assoreamento da tomada d'água: análise do problema e indicação de soluções imediatas**. Rio de Janeiro: UHE Mascarenhas, 1980.

ICOLD, International Commission on Large Dams. **Sedimentation control of reservoirs/Maîtrise de l'alluvionnement des retenues**. 1989. Committee on Sedimentation of Reservoirs. Paris.

JUNIOR, R. S. R. **Determinação da vazão máxima da bacia hidrográfica do Rio do Campo utilizando o software HEC-HMS**. 2019. 76 p. (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Ambiental) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão - PR, 2019. Disponível em: <http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/15944/1/vazaobaciahidrograficahechms.pdf>. Acesso em: 21 ago. 2019.

KELNIAR, A. R. **Estudo da descarga de sedimentos transportados em três rios da bacia hidrográfica do Rio Mourão**. 2014. 69 p. (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Ambiental) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão - PR, 2014. Disponível em: [http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/5820/1/CM\\_COEAM\\_2014\\_1\\_01.pdf](http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/5820/1/CM_COEAM_2014_1_01.pdf). Acesso em: 21 ago. 2019.

MCCULLY, P. **Ríos silenciados: ecología y política de las grandes represas**. Argentina: Proteger Ediciones, 2001. Disponível em: [https://www.academia.edu/40613353/Rios\\_silenciados\\_Ecolog%C3%ADa\\_y\\_pol%C3%ADtica\\_de\\_las\\_grandes\\_represas\\_Patrick\\_McCully](https://www.academia.edu/40613353/Rios_silenciados_Ecolog%C3%ADa_y_pol%C3%ADtica_de_las_grandes_represas_Patrick_McCully). Acesso em: 22 ago. 2019.

MIRANDA, R. B. **A influência do assoreamento na geração de energia hidrelétrica: Estudo de caso na usina hidrelétrica de Três Irmãos - SP**. 2011. 132 f. (Dissertação de Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental) - Universidade de São Paulo: Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos, SP, 2011.

MITRE, J. F. **Introdução a fluidodinâmica computacional**. Universidade Federal Fluminense (UFF), 2018. Disponível em: <http://www.professores.uff.br/mitre/wp-content/uploads/sites/146/2017/09/CFD.pdf>. Acesso em: 19 set. 2019.

MORRIS, G. L; FAN, J. **Reservoir sedimentation handbook: design and management of dams, reservoirs, and watersheds for sustainable use**. Nova Iorque: McGraw-Hill Book Co, 1997.

MULLER, A.C. **Hidrelétricas, meio ambiente e desenvolvimento**. São Paulo: Makron Books do Brasil Editora Ltda, 1995.

NAGLE, G. N.; FAHEY, T. J.; LASSOIE, P. J. Management of sedimentation in tropical watersheds. **Biblioteca Nacional de Medicina – Centro Nacional de Informações sobre Biotecnologia**, Nova Iorque - EUA. v. 23, n. 4, p. 441-452, maio. 1999.

NETO, P. H. W.; ROSA, A. L. T.; GOMES, J. A. Suscetibilidade de dois tipos de solo à compactação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**, Ponta Grossa - PR, v. 6, n. 2, p. 349-352, 2002. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/250985144\\_Suscetibilidade\\_de\\_dois\\_tipos\\_de\\_solo\\_a\\_compactacao](https://www.researchgate.net/publication/250985144_Suscetibilidade_de_dois_tipos_de_solo_a_compactacao). Acesso em: 21 set. 2019.

PAIVA, J. B. D.; PAIVA, E. M. C. D. **Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas**. 1.ed. Porto Alegre: ABRH, 2003.

PATANKAR, S.V. **Numerical heat transfer and fluid flow**. 1.ed. Nova Iorque: CRC Press, 1980.

REICHARDT, K. **A água em sistemas agrícolas**. São Paulo: Manole, 1987.

REINERT, J. D.; REICHERT, M. J. **Propriedades físicas do solo**. Centro de Ciências Rurais da Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria - RS, 18 p, set. 2006.

ROBAINA, A. D. **Hidráulica agrícola**. Santa Maria - RS: Departamento de Engenharia Rural, 96 p, 2007.

SABARÁ, M. G.; BARBOSA, F. A. R. Taxas de sedimentação e assoreamento de dois lagos naturais em áreas de floresta tropical secundária e plantios de *Eucalyptus* spp. **Revista Eletrônica Geo.br**, Ouro Preto (MG), v. 5, n. 5, p. 11-14, 2007.

SALOMÃO, F. X. T. **Erosão e a ocupação rural e urbana**. In: Curso de Geologia Aplicada a Problemas Ambientais, v. 1, p. 44-71, 1991.

SCAPIN, J. **Caracterização do transporte de sedimentos em um pequeno rio urbano em Santa Maria-RS**, 2005. 116 p. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil - Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria - RS, 2005. Disponível em: (<https://repositorio.ufsm.br/handle/1/7738>). Acesso em: 23 set. 2019.

SHEN, H. W.; LAI, J. S. Sustain reservoir useful life by flushing sediment. **International Journal of Sediment Research**, Pequim - China, v. 11, n. 3, p. 11-17, 1996.

SHUCHUN, Y.; BIN, X.; WEILAN, X.; YUXING, S. Z. L. Lead pollution recorded in sediments of three lakes located at the middle and lower Yangtze River basin. **Quaternary International**, China, v. 208, p. 145-150, 2009.

SILVA, A. M.; SCHULZ, H. E.; CAMARGO, P. B. **Erosão e hidrossedimentologia em bacias hidrográficas**. São Carlos: Editora RIMA, 2004.

SILVA, C. V. **Introdução ao Ansys CFX**. Apostila de aula. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Erechim - RS. GEAPI: Grupo de Engenharia Aplicada a Processos Industriais: LABSIM (Laboratório de Simulação Numérica). 44 p. 2019. Disponível em: [http://www.uricer.edu.br/cursos/arq\\_trabalhos\\_usuario/3782.pdf](http://www.uricer.edu.br/cursos/arq_trabalhos_usuario/3782.pdf). Acesso em: 13 fev. 2020.



- SILVA, S. A. **Avaliação do assoreamento do lago Bonsucesso Jataí - GO.** 2007. 110 f. (Dissertação de Mestrado em Geologia Ambiental) - Universidade Federal do Paraná - UFPR, Curitiba - PR, 2007. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/12037/Avalia%E7%E3o%20do%20assoreamento%20do%20lago%20Bonsucesso.pdf;jsessionid=051DAC99106909C9373067CE6099F50A?sequence=1>. Acesso em: 14 fev. 2020.
- SILVA, S. V. **Características de escoamentos decorrentes de diferenças de densidades.** 2002. 284 p. (Tese de Doutorado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos - SP, 2002.
- SOUZA, L. B. S. **Estudo experimental e modelagem numérica do escoamento e do assoreamento em uma armadilha de sedimentos.** 2006. 165 p. (Tese de Doutorado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos - SP. 2006. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-04042006-145417/publico/TESE.pdf>. Acesso em: 15 fev. 2020.
- TSUTIYA, M. T. **Abastecimento de água.** 3.ed. São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006.
- VERSTEEG, H. K; MALALASEKERA. **An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method.** 2. ed. Inglaterra: Editora Prentice Hall, 2007.
- ZACHAR, D. **Soil erosion: developments in soil science.** 1.ed. Bratislava - Eslováquia: Editora Elsevier Science, 1982.