



MARCIO MESQUITA

**DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO DE UM FILTRO DE
AREIA PARA IRRIGAÇÃO LOCALIZADA**

CAMPINAS
2014



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**

MARCIO MESQUITA

***DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO DE UM FILTRO
DE AREIA PARA IRRIGAÇÃO LOCALIZADA***

Orientador: Prof. Dr. Roberto Testezlaf

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Agrícola da Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas para obtenção do título de Doutor em Engenharia Agrícola com ênfase na área de concentração de Água e Solo.

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE DA TESE DEFENDIDA PELO ALUNO
MARCIO MESQUITA, E ORIENTADA PELO PROF. DR. ROBERTO TESTEZLAF.

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Roberto Testezlaf", is written in a cursive style.

**CAMPINAS
2014**

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Rose Meire da Silva – CRB 8/5974

Mesquita, Marcio, 1980-
M562d Desenvolvimento tecnológico de um filtro de areia para irrigação localizada /
Marcio Mesquita. – Campinas, SP: [s.n], 2014.

Orientador: Roberto Testezlaf.
Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de
Engenharia Agrícola.

1. Fluidodinâmica computacional. 2. Simulação (Computadores) -
Modelos matemáticos. 3. Irrigação. 4. Irrigação - Técnica. I. Testezlaf, Roberto,
1956 - II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia
Agrícola. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Technological design of a sand filter for localized irrigation

Palavras-chave em inglês:

Computational fluid dynamics
Simulation (Computers) - Mathematical models
Irrigation
Irrigation – Technical

Área de concentração: Água e Solo

Titulação: Doutor em Engenharia Agrícola

Banca examinadora:

Roberto Testezlaf [Orientador]
Alberto Colombo
Leonardo Machado da Rosa
José Euclides Stipp Paterniani
Ariovaldo José da Silva

Data de defesa: 21-02-2014

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Agrícola

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO DE UM FILTRO DE AREIA PARA
IRRIGAÇÃO LOCALIZADA**

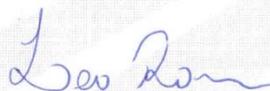
Este exemplar corresponde à redação final da **Tese de Doutorado** defendida por **Marcio Mesquita**, aprovada pela Comissão Julgadora em 21 de fevereiro de 2014, na Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas.



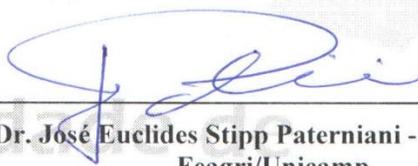
**Prof. Dr. Roberto Testezlaf – Presidente e Orientador
Feagri/Unicamp**



**Prof. Dr. Alberto Colombo - Membro Titular
UFLA**



**Prof. Dr. Leonardo Machado da Rosa – Membro Titular
UCS**



**Prof. Dr. José Euclides Stipp Paterniani - Membro Titular
Feagri/Unicamp**



**Prof. Dr. Ariovaldo José da Silva - Membro Titular
Feagri/Unicamp**

DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO DE UM FILTRO DE AREIA PARA IRRIGAÇÃO LOCALIZADA

RESUMO

A falta de desenvolvimento técnico de projetos para filtros de areia utilizando ferramentas tecnológicas de engenharia limita a otimização das suas configurações e restringe o seu funcionamento eficiente, trazendo prejuízos energéticos, econômicos, e tornando mais longo o caminho para o aparecimento de inovações no processo de filtração da água para a irrigação. Buscando contribuir para o desenvolvimento tecnológico e científico de um modelo de filtro de areia o objetivo geral dessa pesquisa foi contribuir para o aprimoramento do projeto estrutural desses equipamentos, colaborando com a padronização dos seus parâmetros de operação e gerando informações que auxiliem fabricantes no aperfeiçoamento de seus modelos de filtros. A metodologia dessa pesquisa foi dividida em quatro etapas: (1) validação do uso da fluidodinâmica computacional em análises hidráulicas para filtros de areia; (2) análise do comportamento hidrodinâmico de modelos comerciais de placas difusoras e drenos no escoamento interno de filtros de areia; (3) projeto e dimensionamento de modelos originais de placa difusora e de dreno; e (4) construção e avaliação hidráulica de um protótipo de filtro de areia. Os resultados indicaram que, para as condições experimentais ensaiadas, a modelagem numérica parametrizada simulou com precisão o comportamento do escoamento de filtros de areia. O modelo de placa difusora projetada reduziu significativamente a velocidade do fluxo de entrada no filtro e aumentou a homogeneidade da distribuição das linhas de escoamento sobre a superfície do leito poroso. O protótipo de dreno proposto possibilitou a formação de linhas de fluxo radial e perpendicular na região de atuação do acessório, reduzindo o aparecimento de pontos de estagnação e vórtices e diminuindo a turbulência na entrada das suas aberturas. Adicionalmente, a proposição de um arranjo espacial para o sistema de drenagem aumentou a área efetiva de atuação de cada dreno, possibilitando uma expansão mais uniforme e homogênea do leito filtrante durante o fluxo ascendente e requerendo menores velocidades de fluidização para efetivação da retrolavagem. O protótipo de filtro de areia, desenvolvido a partir da aplicação das ferramentas de CFD, apresentou menor perda de pressão em relação aos equipamentos comerciais e para as condições de ensaios a que foram submetidos. Sobretudo, esse estudo permitiu validar a hipótese do

emprego de ferramentas de CFD no projeto das dimensões, formato e o arranjo estrutural da placa difusora e de drenos em filtros de areia visando à melhor distribuição das linhas de fluxo, redução da perda de pressão durante os processos de filtração e retrolavagem, diminuição das deformações superficiais da camada filtrante e maior homogeneidade de fluidização do leito durante a retrolavagem. Dessa forma, a técnica de fluidodinâmica computacional (CFD) mostrou-se adequada para projetos de novos componentes estruturais de filtros de areia, assim como para estudos sobre a sua dinâmica de funcionamento e operação.

Palavras-Chave: fluidodinâmica computacional, simulação numérica, leito filtrante, perda de pressão, filtração, retrolavagem.

TECHNOLOGICAL DESIGN OF A SAND FILTER FOR LOCALIZED IRRIGATION

ABSTRACT

The deficiency of technological development on sand filters design using engineering technological tools restricts its structure optimization and operation effectiveness, causing energy and economic losses. This condition contributes to make the upgrades in the irrigation filtration science a longer path. Searching to help the technological and scientific development of a sand filter model the objective of this research was to contribute to the structural design improvement of these equipment, collaborating with the standardization of its operating parameters and generating information to help manufacturers to improve their filter models. The research methodology was divided into four steps: (1) validation of the use of computational fluid dynamics in sand filters hydraulic analyzes; (2) analyses of the hydrodynamic behavior of commercial model of diffuser plates and drains in the sand filters inner flow; (3) design of innovative models of diffuser plate and drain; and (4) construction and hydraulic evaluation of a prototype of a sand filter. The results indicated that for the defined assessment conditions, the parameterized numerical model simulated the flow process with significant accuracy the sand filter hydrodynamic. The designed diffuser plate reduced significantly the filter inflow, increasing the uniformity the flow lines distribution on the porous media surface. The proposed underdrain model allowed the establishment of radial and perpendicular flow lines in the operating area near the drain, reducing the occurrence of stagnation points and vortexes and the turbulence close to the slots. The projected spatial arrangement of the drainage system increased the effective operation area of each drain, resulting in uniform and homogeneous expansion of the filter bed during the upward flow and requiring lower fluidization velocities values to accomplish the backwash process. The sand filter prototype, developed from the application of CFD tools, reduced the pressure loss in the trials conditions comparing to evaluated commercials equipment. Mainly, this research validated the hypothesis of CFD's tools application in the design of the dimensions, shape and the structural arrangement of the diffuser plate and drains for sand filters. This methodology allowed accomplishing the homogenization of flow lines, reducing the pressure loss during the filtering and backwash processes, decreasing the media superficial deformations and increase the homogeneity of the bed fluidization during the backwash.

Consequently, the computational fluid dynamics technique (CFD) showed suitable for design applications on new structural components' of sand filters, as well to study its functioning and operation's dynamics.

Keywords: Computational fluid dynamics, numerical simulation, media filter, head loss, filtering, backwash.

SUMÁRIO

| | | |
|----------|--|------------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 1 |
| 2 | REVISÃO BIBLIOGRAFICA..... | 5 |
| 2.1 | FILTROS DE AREIA | 5 |
| 2.1.1 | <i>Componentes estruturais de filtros de areia</i> | <i>8</i> |
| 2.1.2 | <i>Princípios de funcionamento dos filtros de areia</i> | <i>13</i> |
| 2.1.3 | <i>Características do leito filtrante.....</i> | <i>16</i> |
| 2.2 | FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL..... | 19 |
| 2.2.1 | <i>Etapas do processo de simulação</i> | <i>21</i> |
| 2.2.2 | <i>Equações regentes (governantes) da fluidodinâmica computacional</i> | <i>25</i> |
| 2.2.3 | <i>Modelos de turbulência</i> | <i>27</i> |
| 2.2.4 | <i>Propriedades e validade das técnicas CFD.....</i> | <i>31</i> |
| 2.2.5 | <i>Aplicações da fluidodinâmica computacional na engenharia agrícola.....</i> | <i>33</i> |
| 3 | MATERIAL E MÉTODOS..... | 37 |
| 3.1 | VALIDAÇÃO DA FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL EM ANÁLISES HIDRÁULICAS PARA FILTROS DE AREIA..... | 37 |
| 3.1.1 | <i>Ensaio laboratoriais.....</i> | <i>38</i> |
| 3.1.2 | <i>Simulações computacionais dos ensaios experimentais</i> | <i>40</i> |
| 3.1.3 | <i>Análise de sensibilidade da modelagem numérica</i> | <i>47</i> |
| 3.2 | ESTUDO DO COMPORTAMENTO HIDRODINÂMICO EM PLACAS DIFUSORAS E DRENOS COMERCIAIS..... | 48 |
| 3.2.1 | <i>Simulações computacionais.....</i> | <i>48</i> |
| 3.2.2 | <i>Caracterização da deformação da superfície do leito filtrante.....</i> | <i>52</i> |
| 3.3 | PROJETO E DIMENSIONAMENTO DE NOVOS ACESSÓRIOS | 54 |
| 3.4 | PROJETO E AVALIAÇÃO HIDRÁULICA DE UM PROTÓTIPO DE FILTRO DE AREIA..... | 56 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 59 |
| 4.1 | VALIDAÇÃO DA FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL EM ANÁLISES HIDRÁULICAS PARA FILTROS DE AREIA..... | 59 |
| 4.2 | ESTUDO DO COMPORTAMENTO HIDRODINÂMICO EM PLACAS DIFUSORAS E DRENOS COMERCIAIS..... | 63 |
| 4.2.1 | <i>Estudo do comportamento hidrodinâmico para placas difusoras comerciais</i> | <i>64</i> |
| 4.2.2 | <i>Estudo do comportamento hidrodinâmico para drenos comerciais</i> | <i>80</i> |
| 4.3 | PROJETO E DIMENSIONAMENTO DE NOVOS ACESSÓRIOS | 85 |
| 4.3.1 | <i>Projeto da placa difusora.....</i> | <i>85</i> |
| 4.3.2 | <i>Projeto e dimensionamento do dreno.....</i> | <i>92</i> |
| 4.4 | PROJETO E AVALIAÇÃO HIDRÁULICA DE UM PROTÓTIPO DE FILTRO | 97 |
| 4.4.1 | <i>Partes e montagem do protótipo de filtros.....</i> | <i>97</i> |
| 4.4.2 | <i>Avaliação hidráulica do protótipo de filtro</i> | <i>102</i> |
| 5 | CONCLUSÕES..... | 113 |
| 6 | RECOMENDAÇÕES..... | 115 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 7 | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 117 |
| 8 | ANEXOS | 125 |
| 8.1 | VALORES EXPERIMENTAIS E SIMULADOS DE PERDA DE PRESSÃO, DO MÓDULO EXPERIMENTAL, USADOS NAS ANÁLISES DE VALIDAÇÃO DA FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL. | 125 |
| 8.2 | ANÁLISE DE VARIÂNCIA DOS AJUSTES CARACTERÍSTICOS DOS ENSAIOS DE COMPARAÇÃO ENTRE A PERDA DE PRESSÃO EXPERIMENTAL E SIMULADA PARA O MÓDULO EXPERIMENTAL ENSAIADO EM DIFERENTES CONFIGURAÇÕES. | 126 |
| 8.3 | MAPAS DE DISTRIBUIÇÃO DOS VETORES DE VELOCIDADE E DAS LINHAS DE CORRENTE RESULTANTES DO ESCOAMENTO DO FLUIDO NAS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE ENSAIOS. | 128 |
| 8.4 | VALORES EXPERIMENTAIS DE PERDA DE PRESSÃO DO PROTÓTIPO DE FILTRO, USADOS NAS AVALIAÇÕES HIDRÁULICAS DO EQUIPAMENTO DESENVOLVIDO. | 133 |
| 8.5 | ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA AS DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE ENSAIO DO PROTÓTIPO. | 135 |
| 8.6 | EQUAÇÕES DE PERDA DE PRESSÃO DOS AJUSTES EXPONENCIAIS DOS DADOS EXPERIMENTAIS DO PROTÓTIPO. | 138 |

AGRADECIMENTOS

Meu doutoramento chega ao fim, e durante esse período de estudo várias pessoas e instituições foram importantes para sua conclusão, dentre elas gostaria de agradecer:

A Deus, pelo dom da vida, pela nutrição diária de força e sabedoria;

Aos meus pais, José Maria de Mesquita e Maria das Graças Mesquita, que na sua simplicidade e sabedoria de vida sempre me apoiaram e mantiveram-se ao meu lado nos diferentes momentos;

Aos meus irmãos Adriano, Flaviana, Fernando, Rogerio e Nayara, por serem à base da minha estrutura pessoal e por me ter dados os meus sobrinhos, que me alegram durante as minhas visitas;

A minha esposa Aline C. Pimenta, pelo companheirismo, paciência e por me ajudar a suportar o fardo das dificuldades e desafios que surgiram durante esses longos quatro anos;

Ao meu “mestre” e orientador professor Dr. Roberto Testezlaf, pelo qual tenho uma imensa admiração, carinho e respeito, pelo que representa na ciência e pesquisa em irrigação no Brasil, e mais ainda, pelo ser humano, pessoa de uma seriedade, respeito e ética inabaláveis. Meu muito obrigado por toda a ajuda e ensinamentos oferecidos nessa caminhada;

A Universidade Estadual de Campinas por toda infraestrutura de ensino e cultura disponibilizada. Em particular agradeço a Faculdade de Engenharia Agrícola (FEAGRI) pelo espaço de trabalho. A Faculdade de Engenharia Química (FEQ), em especial o Laboratório de Pesquisa em Processos Químicos e Gestão Empresarial (PQGe) sob a responsabilidade do Prof. Dr. Milton Mori, pela infraestrutura que possibilitou a realização das simulações numéricas. A Faculdade de Educação Física (FEF) pelas práticas esportivas realizadas durante esse período;

A Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pela concessão de bolsa, no referido projeto 2010/01910-2, sem a qual não poderia ter realizado meus estudos e contribuído para a fomentação do conhecimento no uso de filtros de areia;

A Universidad Politécnica de Valencia, em específico ao Departamento de Ingeniería Rural y Agroalimentaria, pela oportunidade do intercâmbio que me possibilitou realizar trocas culturais, profissional e a conquistar amigos que levarei por toda minha vida, Juan Manzano, Guillermo Palau, Juan Ignacio Córcoles, José Maria Tarjuelo, Victor Espinosa Perez, Maria Inês Martins, Rubens Camaratta, Daniella Buzzi, Thamires Barreto, Christian Viezzer, Álvaro

Niedersberg, Carolina Moscardi, Jelle Boekema, pessoas que fizeram a minha estada na Espanha mais agradável;

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de intercâmbio;

A empresa Hidrossolo Indústria e Comercio pelo apoio na construção do módulo experimental e pelas diversas trocas de conhecimentos;

Aos colegas e amigos conquistados durante esse período de estudo, Douglas Bizari, Rhuanita Soranz, Fábio Ponciano, Maycon Ribeiro, Gabriela Kurokawa, Natalia Flores, Conan Ayade, Antonio Ferreira, Thomaz Pentead, Arnaldo Rodrigues, e todos os outros com quem convivi por esse tempo, meu muito obrigado;

Aos Professores Edson Eiji Matsura, Zigomar Menezes, Jose Euclides Stipp Paterniani, Antônio Carlos de Oliveira Ferraz, Júlio Soriano, pelas orientações e palavras amigas;

Aos professores Mauro Jose Andrade Tereso e Roberto Funes Abrahão, pelo apoio e confiança, com o empréstimo do equipamento escâner 3D, que auxiliou no desenvolvimento dessa pesquisa;

Ao Doutor Leonardo Machado da Rosa por toda ajuda e ensinamentos disponibilizados durante o uso da ferramenta de simulação, CFD, na minha pesquisa;

A comunidade de funcionários da FEAGRI nas pessoas do Tulio Ribeiro, Gelson Espindola da Silva, Gisleide Aparecida Garibaldi Otávio, Sidnei Trombeta, Luiz Carlos dos Santos Silva, Celia Panzararin Gonçalves, Rita de Cassia Cuesta Ferreira, Maria Aparecida Silaman de Freitas, André Aparecido Nogueira, Edgar Aparecido Lombardi, Fábio Esteves Duarte Augusto, Fernando Jacinto da Silva, Francisco Ferreira dos Santos Filho, Jose Maria da Silva, Jurandi Fagundes de Carvalho, Marta Aparecida R. Vechi, Valdir Augustinho Vialta, pelo apoio nas diversas atividades que realizei na FEAGRI;

Aos meus amigos/irmãos de infância, Marcos Elísios, Diego Souza, Rodrigo Evangelista, Murilo Ribeiro, pessoas que levarei por toda a minha vida no coração e pelas quais tenho muito orgulho de conhecê-los;

À Comissão de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Agrícola, pela acolhida, profissionalismo, apoio e amizade.

A todos,

Muito Obrigado!

“Todos nós sabemos alguma coisa. Todos nós ignoramos alguma coisa. Por isso, aprendemos sempre”. Paulo Freire

Todos nós temos algo a ensinar e a aprender. Ninguém é tão ignorante que não tenha algo a ensinar, e ninguém é tão sábio que não tenha algo a aprender. Blaise Pascal

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1: Esquema estrutural do filtro de areia utilizado na irrigação (Fonte: SALCEDO, 2010). | 5 |
| Figura 2: Detalhes de modelos comerciais de placa difusora de filtros nacionais avaliados por MESQUITA (2010). | 9 |
| Figura 3: Modelos de drenos utilizados em filtros comerciais de areia fabricados no Brasil. | 11 |
| Figura 4: Esquema de dois sistemas de drenagem utilizando braços coletores (Fonte: Lakos, 2009). | 11 |
| Figura 5: Esquema de dois sistemas de drenagem utilizando drenos ou crepinas (Fonte: Lakos, 2009). | 11 |
| Figura 6: Detalhe do escoamento da água durante o processo de filtragem nos filtros de areia (Fonte: SALCEDO, 2010). | 13 |
| Figura 7: Detalhe do escoamento durante o processo de retrolavagem nos filtros de areia (Fonte: SALCEDO et al. 2011). | 15 |
| Figura 8: Fluxograma simplificado da rotina de simulações de fluidodinâmica computacional (Fonte: Adaptação de CÁRDENAS, 2012). | 22 |
| Figura 9: Esquema dos tipos de malha. | 24 |
| Figura 10: Projeto estrutural do módulo experimental. ^[A] detalhe do corpo, ^[B] detalhe do tampo superior e, ^[C] detalhe do tampo inferior, ^[D] imagem do módulo experimental construído (Dimensões em cm). | 38 |
| Figura 11: Módulo experimental instalado no circuito hidráulico. (Foto: Marcio Mesquita) | 39 |
| Figura 12: Acessórios internos utilizados nos ensaios para validação. ^[A] Placa difusora plana sem borda. ^[B] Placa difusora plana com borda. ^[C] Crepina cônica. Nota: Dimensões em mm. | 40 |
| Figura 13: Geometrias desenvolvidas para serem utilizadas nas simulações. ^[A] Detalhe do módulo experimental e do domínio de estudo. ^[B] Detalhe da placa difusora. ^[C] Detalhe do dreno. | 41 |
| Figura 14: Detalhe dos volumes de controle utilizados na geometria estrutural do corpo do filtro ensaiado. | 42 |
| Figura 15: Gráfico de perda de pressão em função da concentração da malha numérica obtido no teste de independência de malha. | 42 |

| | |
|---|----|
| Figura 16: Desenho estrutural do modelo de placa difusora usado nas simulações, placa difusora plana com anel superior. (Dimensões em mm). | 49 |
| Figura 17: Módulo virtual criado para simulação de drenos (crepinas)..... | 51 |
| Figura 18: Detalhe dos volumes de controle na região virtual próxima ao dreno. | 51 |
| Figura 19: Modelos de drenos usados na fundamentação do desenvolvimento. ^[A] dreno cilíndrico, ^[B] fundo falso perfurado. (Dimensões em mm). | 52 |
| Figura 20: Fotografia do escâner empregado na caracterização da deformação da superfície do leito filtrante. | 53 |
| Figura 21: Mapeamento esquemático do georreferenciamento da superfície do leito filtrante por tags refletores. (Foto: Marcio Mesquita) | 53 |
| Figura 22: Esquema mostrando o posicionamento das diagonais na secção circular da área superficial da camada porosa utilizadas na coleta das cotas da superfície do leito filtrante. | 54 |
| Figura 23: Comparação entre a perda de pressão simulada e experimental para módulo experimental configurado na condição sem placa difusora e sem dreno. | 60 |
| Figura 24: Comparação entre a perda de pressão simulada e experimental para módulo experimental configurado na condição sem dreno e com ^[A] placa difusora plana, e ^[B] plana com borda. | 60 |
| Figura 25: Comparação entre a perda de pressão simulada e experimental para módulo experimental configurado na condição com dreno e com placa difusora ^[A] plana, e ^[B] plana com borda. | 61 |
| Figura 26: Perfis de velocidade e linhas de fluxo para escoamento característico no módulo experimental sem placa difusora com fluxo de água no sentido descendente. Onde: ^[V*] velocidade inicial utilizada na simulação em $m s^{-1}$ | 65 |
| Figura 27: Perfis de velocidade e linhas de fluxo para escoamento característico no módulo experimental com placa difusora plana e fluxo de água no sentido descendente. Onde: ^[V*] velocidade inicial utilizada na simulação em $m s^{-1}$ | 68 |
| Figura 28: Perfis de velocidade e linhas de fluxo para escoamento característico no módulo experimental com placa difusora plana com anel superior e fluxo de água no sentido descendente. Onde: ^[V*] velocidade inicial utilizada na simulação em $m s^{-1}$ | 73 |

| | |
|--|----|
| Figura 29: Perfis de velocidade e linhas de fluxo para escoamento característico no módulo experimental com placa difusora plana com bordas e fluxo de água no sentido descendente. Onde: ^[V*] velocidade inicial utilizada na simulação em $m s^{-1}$ | 77 |
| Figura 30: Perfil de escoamento característico na região delimitada por um dreno com o fluxo descendente (filtragem) encontrado nas simulações para os modelos de drenos ensaiados. Onde: ^[V*] velocidade inicial utilizada na simulação em $m s^{-1}$ | 82 |
| Figura 31: Perfil do escoamento característico na região delimitada por um dreno com o fluxo ascendente (retrolavagem) encontrado nas simulações para os modelos de drenos ensaiados. Nota: ^[V*] velocidade inicial utilizada na simulação em $m s^{-1}$ | 84 |
| Figura 32: Esquema estrutural da placa difusora proposta. Onde: ^[A] Vista frontal, ^[B] Vista superior, ^[C] Perspectiva lateral, ^[D] Imagem da placa difusora construída. | 86 |
| Figura 33: Perfis de velocidade e linhas de fluxo para escoamento característico no módulo experimental com placa difusora projetada e fluxo de água no sentido descendente. Onde: ^[V*] velocidade inicial utilizado na simulação em $m s^{-1}$ | 88 |
| Figura 34: Projeto estrutural do dreno proposto. Onde: ^[A] vista frontal, ^[B] corte xy em perspectiva, ^[C] vista superior, ^[D] Imagem do dreno construído. | 92 |
| Figura 35: Escoamento característico na região delimitada pelo dreno projetado com o fluxo no sentido descendente (filtragem). | 93 |
| Figura 36: Escoamento característico na região delimitada pelo dreno projetado com o fluxo no sentido ascendente (retrolavagem). | 94 |
| Figura 37: Detalhe dos regimes de escoamento, ^[A] leito fixo e ^[B] início da fluidização. (Foto: Marcio Mesquita) | 94 |
| Figura 38: Detalhe dos regimes de escoamento, ^[A] leito particulado e ^[B] borbulhante. (Foto: Marcio Mesquita) | 95 |
| Figura 39: Detalhe dos regimes de escoamento, ^[A] leito fluidizado e ^[B] expandido a 25%. Nota: H1 altura inicial e H2 altura final atingida após atingir a expansão de 25% de leito fluidizado. (Foto: Marcio Mesquita) | 96 |
| Figura 40: Esquema estrutural do protótipo. Nota: ^[A] Vista frontal, ^[B] Vista lateral, ^[C] Vista superior, ^[D] Corte xy, ^[E] Imagem do protótipo construído. | 98 |
| Figura 41: Placa difusora projetada. Nota: ^[A] Perspectiva superior, ^[B] Vista frontal. (Foto: Marcio Mesquita) | 98 |

| | |
|---|-----|
| Figura 42: Detalhe da instalação da placa difusora. (Foto: Marcio Mesquita) | 99 |
| Figura 43: Dreno projetado. Nota: ^[A] vista frontal, ^[B] corte interno detalhe da união dos anéis, ^[C] perspectiva vista inferior, ^[D] detalhe da distinção do banho químico visto pelo plano inferior. (Foto: Marcio Mesquita)..... | 100 |
| Figura 44: Arranjo da instalação dos drenos no fundo falso do protótipo. Nota: ^[A] arranjo destacado, com os polígonos de Thiessen, a área de atuação de cada dreno; ^[B] correção da área de atuação de cada dreno..... | 101 |
| Figura 45: Detalhe do fundo falso com drenos rosqueados e instalados de acordo com o arranjo espacial proposto. (Foto: Marcio Mesquita)..... | 101 |
| Figura 46: ^[A] Variação de perda de pressão (kPa) para o protótipo vazio em função da velocidade ($m\ s^{-1}$) para o escoamento coincidente aos processos de filtração e retrolavagem. ^[B] Intervalo de confiança a 95% para os dois processos de escoamento. Nota: ^[F] escoamento no sentido coincidente ao processo da filtração e ^[R] da retrolavagem..... | 104 |
| Figura 47: Variação de perda de pressão (kPa) em função da velocidade ($m\ s^{-1}$) para os ensaios com escoamento no sentido descendente, coincidente ao processo de filtração para duas camadas filtrante e três granulometrias de areia (gráfico a esquerda), e, a direita, intervalo de confiança a 95% comparando o efeito da variação de altura do leito filtrante na perda de pressão..... | 107 |
| Figura 48: Variação de perda de pressão (kPa) em função da velocidade ($m\ s^{-1}$) para ensaios com escoamento no sentido ascendente, coincidente ao processo de retrolavagem, para três granulometrias de areia e duas alturas da camada filtrante (esquerda), e, a direita, intervalo de confiança a 95% comparado o efeito da variação de altura do leito filtrante na perda de pressão. ... | 109 |
| Figura 49: Comparação entre a variação de perda de pressão (kPa) em função da velocidade ($m\ s^{-1}$) para os dois sentidos de escoamento coincidente aos processos de filtração e retrolavagem, para as três granulometrias de areia e duas alturas da camada filtrante. Nota: ^[FH1e FH2] escoamento no sentido coincidente filtração com leito filtrante à altura, respectivamente, de H1 e H2; ^[RH1 e RH2] escoamento no sentido coincidente retrolavagem com leito filtrante à altura, respectivamente, de H1 e H2..... | 111 |
| Figura 50: Perfis de velocidade e linhas de fluxo para escoamento característico no módulo experimental sem placa difusora e fluxo de água no sentido descendente. Onde: ^[V*] velocidade inicial utilizada na simulação em $m\ s^{-1}$ | 128 |

Figura 51: Perfis de velocidade e linhas de fluxo para escoamento característico no módulo experimental com placa difusora plana sem bordas e fluxo de água no sentido descendente. Onde: $[V^*]$ velocidade inicial utilizada na simulação em $m s^{-1}$ 129

Figura 52: Perfis de velocidade e linhas de fluxo para escoamento característico no módulo experimental com placa difusora plana com anel superior e fluxo de água no sentido descendente. Onde: $[V^*]$ velocidade inicial utilizada na simulação em $m s^{-1}$ 130

Figura 53: Perfis de velocidade e linhas de fluxo para escoamento característico no módulo experimental com placa difusora plana com bordas e fluxo de água no sentido descendente. Onde: $[V^*]$ velocidade inicial utilizada na simulação em $m s^{-1}$ 131

Figura 54: Perfis de velocidade e linhas de fluxo para escoamento característico no módulo experimental com placa difusora projetada e fluxo de água no sentido descendente. Onde: $[V^*]$ velocidade inicial utilizada na simulação em $m s^{-1}$ 132

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1: Propriedades físicas das condições de contorno e os respectivos valores iniciais utilizadas nas simulações numéricas. | 43 |
| Tabela 2: Especificações gerais do fluido e das condições numéricas utilizadas no pré-processamento das simulações. | 43 |
| Tabela 3: Propriedades físicas das areias utilizados nos ensaios experimentais. | 57 |
| Tabela 4: Análise estatística comparando as médias de perda de pressão (kPa) para módulo experimental configurado na condição sem placa difusora e sem dreno, e as respectivas porcentagens da diferença (<i>%Dif</i>). | 61 |
| Tabela 5: Análise estatística comparando as médias de Hf (kPa) para módulo experimental configurado na condição sem dreno e com placa difusora plana e plana com borda, e as respectivas porcentagens da diferença (<i>%Dif</i>). | 62 |
| Tabela 6: Análise estatística comparando as médias de Hf (kPa) para módulo experimental configurado na condição com dreno e com placa difusora plana e plana com borda, e as respectivas porcentagens da diferença (<i>%Dif</i>). | 62 |
| Tabela 7: Análise da deformação superficial do leito filtrante resultante do escoamento de água no sentido descendente sob a interação da placa difusora plana sem borda e com o leito filtrante a 10 cm de distancia do acessório. | 69 |
| Tabela 8: Análise da deformação superficial do leito filtrante resultante do escoamento de água no sentido descendente sob a interação da placa difusora plana sem borda e com o leito filtrante a 20 cm de distância do acessório. | 70 |
| Tabela 9: Análise da deformação superficial do leito filtrante resultante do escoamento de água no sentido descendente sob a interação da placa difusora plana sem borda e com anel superior e com o leito filtrante a 10 cm de distância do acessório. | 74 |
| Tabela 10: Análise da deformação superficial do leito filtrante resultante do escoamento de água no sentido descendente sob a interação da placa difusora plana sem borda e com anel superior e com o leito filtrante a 20 cm de distância do acessório. | 75 |
| Tabela 11: Análise da deformação superficial do leito filtrante resultante do escoamento de água no sentido descendente sob a interação da placa difusora plana com borda e com o leito filtrante a 10 cm de distância do acessório. | 78 |

| | |
|--|-----|
| Tabela 12: Análise da deformação superficial do leito filtrante resultante do escoamento de água no sentido descendente sob a interação da placa difusora plana com borda e com o leito filtrante a 20 cm de distância do acessório. | 79 |
| Tabela 13: Variação da velocidade na posição em L2 obtida nas simulações dos modelos de placa difusora avaliados..... | 89 |
| Tabela 14: Análise da deformação superficial do leito filtrante resultante do escoamento de água no sentido descendente sob a interação da placa difusora projetada e com o leito filtrante a 10 cm de distância do acessório. | 90 |
| Tabela 15: Análise da deformação superficial do leito filtrante resultante do escoamento de água no sentido descendente sob a interação da placa difusora projetada e com o leito filtrante a 20 cm de distância do acessório. | 91 |
| Tabela 16: Valores de velocidade superficial (Vel.) em $m s^{-1}$ para os diferentes regimes de expansão do leito filtrante e a correspondente perda de pressão (kPa) para o módulo experimental configurado com os drenos projetados instalados. | 96 |
| Tabela 17: Características dimensionais dos drenos projetados. | 100 |
| Tabela 18: Características dimensionais do sistema de drenagem do protótipo de filtro | 102 |
| Tabela 19: Valores médios de perda de pressão (kPa) em função da velocidade de escoamento ($m s^{-1}$) para protótipo de filtro vazio (sem leito filtrante) para os escoamentos nas direções coincidentes à filtragem e retrolavagem. | 102 |
| Tabela 20: Valores médios de perda de pressão (kPa) em função da velocidade de escoamento ($m s^{-1}$) para protótipo de filtro com leito filtrante nas alturas H1 e H2, respectivamente, 30 e 45 cm, e formado com granulometria 0,5 a 1,0mm, para os escoamentos nas direções coincidentes à filtragem e retrolavagem. | 103 |
| Tabela 21: Valores médios de perda de pressão (kPa) em função da velocidade de escoamento ($m s^{-1}$) para protótipo de filtro com leito filtrante nas alturas H1 e H2, respectivamente, 30 e 45 cm, e formado com granulometria 0,8 a 1,2mm, para os escoamentos nas direções coincidentes à filtragem e retrolavagem..... | 103 |
| Tabela 22: Valores médios de perda de pressão (kPa) em função da velocidade de escoamento ($m s^{-1}$) para protótipo de filtro com leito filtrante nas alturas H1 e H2, respectivamente, 30 e 45 cm, e formado com granulometria 1,0 a 1,5mm, para os escoamentos nas direções coincidentes à filtragem e retrolavagem..... | 103 |

| | |
|--|-----|
| Tabela 23: Relação de perdas de pressão para diferentes filtros ensaiados vazios com o escoamento descendente, coincidente ao processo de Filtragem. | 105 |
| Tabela 24: Relação de perdas de pressão para diferentes filtros ensaiados vazios com o escoamento ascendente, coincidente ao processo de Retrolavagem. | 105 |
| Tabela 25: Porcentagens de contribuição do leito filtrante na perda de pressão de filtros de areia durante o escoamento no sentido descendente (filtragem) em relação à taxa de filtração e a diferentes granulometrias. | 108 |
| Tabela 26: Valores de perda de pressão (kPa) em função da velocidade de escoamento ($m s^{-1}$) para módulo experimental simulado nas diferentes configurações. | 125 |
| Tabela 27: Valores de perda de pressão (kPa) em função da velocidade de escoamento ($m s^{-1}$) para módulo experimental vazio (sem material filtrante) configurado na condição sem placa difusora e sem dreno. | 125 |
| Tabela 28: Valores de perda de pressão (kPa) em função da velocidade de escoamento ($m s^{-1}$) para módulo experimental vazio (sem material filtrante) configurado na condição com placa difusora e sem dreno. | 125 |
| Tabela 29: Valores de perda de pressão (kPa) em função da velocidade de escoamento ($m s^{-1}$) para módulo experimental vazio (sem material filtrante) configurado na condição com placa difusora e com dreno cônico. | 126 |
| Tabela 30: Análise de variância dos ajustes característicos dos ensaios de comparação entre a perda de pressão experimental e simulada para o módulo experimental configurado na condição sem placa difusora e sem dreno. | 126 |
| Tabela 31: Análise de variância dos ajustes característicos dos ensaios de comparação entre a perda de pressão experimental e simulada para o módulo experimental configurado na condição com placa difusora plana e sem dreno. | 126 |
| Tabela 32: Análise de variância dos ajustes característicos dos ensaios de comparação entre a perda de pressão experimental e simulada para o módulo experimental configurado na condição com placa difusora plana com bordas e sem dreno. | 126 |
| Tabela 33: Análise de variância dos ajustes característicos dos ensaios de comparação entre a perda de pressão experimental e simulada para o módulo experimental configurado na condição com placa difusora plana e com dreno cônico. | 127 |

| | |
|---|-----|
| Tabela 34: Análise de variância dos ajustes característicos dos ensaios de comparação entre a perda de pressão experimental e simulada para o módulo experimental configurado na condição com placa difusora plana com bordas e com dreno cônico. | 127 |
| Tabela 35: Valores de perda de pressão (kPa) em função da velocidade de escoamento ($m s^{-1}$) para o protótipo vazio (sem material filtrante) nos sentido de escoamento descendente e ascendente (filtragem e retrolavagem). | 133 |
| Tabela 36: Valores médios de perda de pressão (kPa) em função da velocidade de escoamento ($m s^{-1}$), nos sentido de escoamento descendente e ascendente (filtragem e retrolavagem), com leito filtrante nas alturas H1 e H2, respectivamente, 30 e 45 cm, e formado com granulometria 0,5 a 1,0mm. | 133 |
| Tabela 37: Valores médios de perda de pressão (kPa) em função da velocidade de escoamento ($m s^{-1}$), nos sentido de escoamento descendente e ascendente (filtragem e retrolavagem), com leito filtrante nas alturas H1 e H2, respectivamente, 30 e 45 cm, e formado com granulometria 0,8 a 1,2mm. | 134 |
| Tabela 38: Valores médios de perda de pressão (kPa) em função da velocidade de escoamento ($m s^{-1}$), nos sentido de escoamento descendente e ascendente (filtragem e retrolavagem), com leito filtrante nas alturas H1 e H2, respectivamente, 30 e 45 cm, e formado com granulometria 1,0 a 1,5mm. | 134 |
| Tabela 39: Análise de variância da função exponencial característica do protótipo durante os ensaios com escoamento no sentido descendente, coincidente ao processo de filtragem, com o equipamento vazio. | 135 |
| Tabela 40: Análise de variância da função exponencial característica do protótipo durante os ensaios com escoamento no sentido descendente, coincidente ao processo de filtragem, com camada filtrante H1 e intervalo granulométrico de areia G1. | 135 |
| Tabela 41: Análise de variância da função exponencial característica do protótipo durante os ensaios com escoamento no sentido descendente, coincidente ao processo de filtragem, com camada filtrante H2 e intervalo granulométrico de areia G1. | 135 |
| Tabela 42: Análise de variância da função exponencial característica do protótipo durante os ensaios com escoamento no sentido descendente, coincidente ao processo de filtragem, com camada filtrante H1 e intervalo granulométrico de areia G2. | 135 |

| | |
|--|-----|
| Tabela 43: Análise de variância da função exponencial característica do protótipo durante os ensaios com escoamento no sentido descendente, coincidente ao processo de filtragem, com camada filtrante H2 e intervalo granulométrico de areia G2..... | 135 |
| Tabela 44: Análise de variância da função exponencial característica do protótipo durante os ensaios com escoamento no sentido descendente, coincidente ao processo de filtragem, com camada filtrante H1 e intervalo granulométrico de areia G3..... | 136 |
| Tabela 45: Análise de variância da função exponencial característica do protótipo durante os ensaios com escoamento no sentido descendente, coincidente ao processo de filtragem, com camada filtrante H2 e intervalo granulométrico de areia G3..... | 136 |
| Tabela 46: Análise de variância da função exponencial característica do protótipo durante os ensaios com escoamento no sentido ascendente, coincidente ao processo de retrolavagem, com o equipamento vazio..... | 136 |
| Tabela 47: Análise de variância da função exponencial característica do protótipo durante os ensaios com escoamento no sentido ascendente, coincidente ao processo de retrolavagem, com camada filtrante H1 e intervalo granulométrico de areia G1..... | 136 |
| Tabela 48: Análise de variância da função exponencial característica do protótipo durante os ensaios com escoamento no sentido ascendente, coincidente ao processo de retrolavagem, com camada filtrante H2 e intervalo granulométrico de areia G1..... | 136 |
| Tabela 49: Análise de variância da função exponencial característica do protótipo durante os ensaios com escoamento no sentido ascendente, coincidente ao processo de retrolavagem, com camada filtrante H1 e intervalo granulométrico de areia G2..... | 137 |
| Tabela 50: Análise de variância da função exponencial característica do protótipo durante os ensaios com escoamento no sentido ascendente, coincidente ao processo de retrolavagem, com camada filtrante H2 e intervalo granulométrico de areia G2..... | 137 |
| Tabela 51: Análise de variância da função exponencial característica do protótipo durante os ensaios com escoamento no sentido ascendente, coincidente ao processo de retrolavagem, com camada filtrante H1 e intervalo granulométrico de areia G3..... | 137 |
| Tabela 52: Análise de variância da função exponencial característica do protótipo durante os ensaios com escoamento no sentido ascendente, coincidente ao processo de retrolavagem, com camada filtrante H2 e intervalo granulométrico de areia G3..... | 137 |

Tabela 53: Equações de perda pressão (kPa) resultantes dos ajustes exponenciais para o protótipo em função da velocidade na tubulação e com sentido de escoamento descendente (Filtragem). 138

Tabela 54: Equações de perda pressão (kPa) resultantes dos ajustes exponenciais para o protótipo em função da velocidade na tubulação e com sentido de escoamento ascendente (Retrolavagem).

..... 138

LISTA DE SIGLAS

CAD: Computer Aided Design

CFD: Computational Fluid Dynamics ou Fluidodinâmica Computacional

DNS: Direct Numerical Simulation

PQGe: Laboratório de Pesquisa em Processos Químicos e Gestão Empresarial

LES: Large Eddy Simulation

RANS: Reynolds-Averaged Navier Stokes

RMS: Root Mean Square

LISTA DE SÍMBOLOS

g : aceleração da gravidade ($L T^{-2}$)

H_1 e H_2 : alturas de camada porosa (L)

C_p : calor específico à pressão constante do fluido ($L^2 T^{-2} \theta^{-1}$)

R^2 : coeficiente de determinação

K_{perm} : coeficiente de perda de pressão causado pela permeabilidade

K_{Loss} : coeficiente de perda de pressão causado pela resistência inercial

u : componente do vetor velocidade na direção x ($L T^{-1}$)

v : componente do vetor velocidade na direção y ($L T^{-1}$)

w : componente do vetor velocidade na direção z ($L T^{-1}$)

σ_k , σ_ε , C_μ , C_1 , C_2 : constantes empíricas

C : constante dependente da rugosidade da superfície

CU : coeficiente de uniformidade

Deq : diâmetro equivalente (L)

d_{10} : diâmetro efetivo da partícula de areia (L)

ε : dissipador de energia cinética turbulenta

k : energia cinética turbulenta

Ψ : esfericidade

Φ : função dissipação viscosa

G_1 , G_2 e G_3 : intervalos granulométricos (L)

$MaxH_f$: maior valor absoluto da perda de pressão

ρ : massa específica do fluido ($M L^{-3}$)

ρ_s : massa específica da partícula de areia ($M L^{-3}$)

$MinH_f$: menor valor absoluto da perda de pressão

k - ε : modelo numérico de turbulência

k - ω : modelo numérico de turbulência

SST/k- ω : modelo numérico de turbulência

y^+ : número adimensional que denomina a distância de parede

N_i : número de interação

H_f : perda de pressão (L)

$H_{f_{Exp.}}$: perda de pressão experimental (L)

$H_{f_{Sim.}}$: perda de pressão da simulado (L)

$\%dif$: porcentagem da diferença

ϵ_l : porosidade (volume de vazios)

p : pressão em uma superfície elementar ($M L^{-1} T^{-2}$)

ℓ : tamanho de vórtices

\dot{q} : taxa de aquecimento volumétrico por unidade de massa ($L^2 T^{-2} \theta^{-1} M^{-1}$)

T : temperatura (θ)

t : tempo (T)

τ_w : tensão de cisalhamento na parede ($F L^{-2}$)

τ : tensão de cisalhamento ($F L^{-2}$)

S_i : termo matemático da equação de Navier-Stokes

Δy : variação da distância da parede (L)

$V_{Sim.}$: velocidade inicial de simulação ($L T^{-1}$)

u_i : velocidade de atrito ($L T^{-1}$)

V : velocidade de escoamento de fluido ($L T^{-1}$)

$\overline{u_p}$: velocidade média paralela à parede ($L T^{-1}$)

$\overline{V_{Res.}}$: velocidade media resultante do processo de simulação ($L T^{-1}$)

\vec{U} : vetor velocidade do elemento diferencial;

μ : viscosidade absoluta ($M T^{-1} L^{-1}$)

ν : viscosidade cinemática ($L^2 T^{-1}$)

μ_T : viscosidade turbulenta

1 INTRODUÇÃO

A garantia de uma elevada eficiência de aplicação e uma adequada uniformidade da distribuição de água em sistemas de irrigação localizada está diretamente relacionada ao controle efetivo e confiável da qualidade dos recursos hídricos disponíveis na propriedade agrícola. A instalação de unidades de tratamento e a melhoria da qualidade da água de irrigação garantem maior vida útil aos equipamentos e melhor desempenho (uniformidade de distribuição) do sistema, constituindo-se, assim, uma estratégia fundamental para a redução dos custos de manutenção, de troca de equipamentos, e para o aumento de produtividade e de receita do produtor.

A necessidade de tratamentos físico e/ou químico da água de irrigação, em menor ou maior intensidade, depende das características e concentrações de partículas presentes na água e nas especificidades requeridas pelos sistemas de distribuição da água como, por exemplo, o diâmetro do orifício de saída dos emissores. A filtração é o tratamento físico mais indicado para a remoção de partículas sólidas em suspensão, orgânicas ou inorgânicas, podendo ser realizada por diferentes tipos de filtros (areia, disco, tela e manta sintética não tecida) que podem operar de forma isolada ou agrupada.

Os filtros de areia diferenciam-se dos filtros utilizados na irrigação localizada, de tela e de disco, por apresentar um desempenho superior na retenção de partículas orgânicas e de algas, devido a sua capacidade de coletar essas impurezas durante a passagem do afluyente ao longo de seu leito filtrante. Em contrapartida, a dinâmica de operação desses filtros afeta o comportamento hidráulico dos sistemas de irrigação, pois durante o processo de retenção de impurezas há uma redução significativa do espaço poroso do leito filtrante que, conseqüentemente, aumenta a resistência ao escoamento do fluido (água de irrigação), culminando na elevação da perda de pressão do equipamento e na alteração da altura manométrica total do sistema. Dessa forma, a escolha e a operação desses filtros devem ser planejadas, levando em consideração os princípios físicos que fundamentam os processos de remoção de impurezas e de limpeza do leito, denominados, filtração e retrolavagem, respectivamente.

O termo filtração é usado, nesse caso, para descrever a deposição e/ou fixação das partículas sólidas em suspensão na água provenientes do escoamento do fluido no interior da camada porosa. Como, durante o processo de filtração na irrigação, o fluxo é predominantemente descendente, pode-se afirmar que a retenção de partículas ocorre tanto pela

ação de profundidade como pela ação superficial do leito. O arranjo (tortuosidade) criado pelas partículas de areia do leito poroso é o principal fator responsável por este fenômeno, pois permite a retenção de impurezas nos poros, e a adesão de impurezas sobre a superfície dos grãos de areia. Com o acúmulo gradativo de impurezas no leito filtrante, faz-se necessário a sua limpeza (retrolavagem), pela inversão do fluxo da água no interior do filtro (ascendente).

A pouca disponibilidade de conhecimentos quanto à concepção do projeto e/ou planejamento do uso, associados à falta de informações técnicas e de conhecimentos específicos de filtros de areia na irrigação brasileira, determinam uma precária assistência ao produtor sobre a sua instalação, operação e manutenção, reduzindo o potencial de filtragem do equipamento. Essas questões ficam mais evidentes, pela inexistência de uma base tecnológica nacional no desenvolvimento desses equipamentos, confirmada pelo fato que os modelos comercializados no Brasil correspondem a cópias de tecnologias de outros países, que não receberam aperfeiçoamentos significativos ou passaram por ensaios de desempenho ou verificações técnicas quanto as suas características funcionais.

Estudos desenvolvidos na Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas detectaram diferenças nos projetos estruturais de filtros de areia comercializados no Brasil, especificamente nas dimensões, formato e número ou arranjo dos drenos e da placa difusora, e os efeitos diferenciados causados nos comportamentos hidráulicos durante o escoamento de água nos sentidos coincidentes às operações de filtragem e retrolavagem. Adicionalmente, se verificou que esses equipamentos apresentaram desempenhos idênticos no que se refere à distribuição desuniforme das linhas de fluxo de água sobre o leito filtrante, resultando na formação zonas de turbulência próximas às paredes do filtro e, conseqüentemente, na movimentação da areia na superfície da camada porosa, gerando deformações, como cumes e depressões e, também, causando heterogeneidade na distribuição do fluxo durante a retrolavagem com expansão desuniforme do leito filtrante.

A deformação superficial da camada porosa durante o processo de filtragem gera caminhos preferenciais, promovendo carreiras de filtragem com menor duração, aumentando a frequência de retrolavagem e, conseqüentemente, ampliando as interferências na operação da irrigação devido às constantes mudanças na direção do fluxo da água, reduzindo a vazão disponível ao sistema. Da mesma forma, a distribuição desuniforme do fluxo através dos drenos durante o processo de retrolavagem promove uma expansão insuficiente do leito filtrante para

efetivação da fluidização, resultando em uma limpeza deficiente da camada e, assim, gerando diferentes problemas na filtração subsequente, como exemplo: oscilações hidráulicas, redução da eficiência de remoção, formação de agregados que, conseqüentemente, criam caminhos preferenciais à filtração.

O desempenho hidráulico e o comportamento operacional encontrado nos modelos de filtros de areia nacionais são resultados, principalmente, do processo de desenvolvimento tecnológico, que é baseado, sobretudo, em tentativas para solucionar problemas e dificuldades que surgiram na operação dos equipamentos em campo ao longo do tempo, isto é, na busca por soluções empíricas de projeto. A falta de desenvolvimento técnico de projetos específicos para filtros de areia utilizando ferramentas tecnológicas de engenharia limita a otimização da configuração dos equipamentos e restringe o seu funcionamento eficiente, trazendo prejuízos energéticos, econômicos, e tornando mais longo o caminho para o aparecimento de inovações no processo de filtração da água para a irrigação.

A fluidodinâmica computacional, ou Computer Fluid Dynamics (CFD), é uma ferramenta aplicada à área da mecânica dos fluidos que utiliza métodos numéricos e algoritmos para resolver e analisar problemas hidrodinâmicos em escoamentos de fluidos. A técnica de CFD faz uso de aplicativos de simulação para análise da interação de líquidos e gases com superfícies definidas por condições de contorno. Essa técnica vem sendo utilizada frequentemente em problemas de engenharia, trazendo como vantagens a redução de custos e de tempo em pesquisas de desenvolvimento e/ou otimização de equipamentos, ajudando na interpretação do comportamento físico e da dinâmica do escoamento do fluido.

Dessa forma, essa pesquisa assume a hipótese que o emprego da ferramenta de CFD no projeto das dimensões, formato e o arranjo estrutural da placa difusora e de drenos em filtros de areia visando a homogeneização das linhas de fluxo, determinará a redução da perda de pressão durante os processos de filtração e retrolavagem, da deformação superficial da camada filtrante e garantirá a homogeneidade da fluidização do leito durante a retrolavagem. Simultaneamente, pretende-se dentro desse estudo analisar a adequação do uso das técnicas de fluidodinâmica computacional (CFD) no projeto de novos componentes estruturais, assim como, validar a simulação de escoamento de água no interior de um módulo experimental de filtros de areia.

Buscando contribuir para o desenvolvimento tecnológico e científico de um filtro de areia que atenda as especificações hidráulicas, e que propicie maior eficiência e eficácia do leito

filtrante para as condições de afluente encontrado pelos irrigantes, o objetivo geral dessa pesquisa foi aprimorar o projeto estrutural desses equipamentos, colaborando com a padronização dos parâmetros de operação dos filtros e contribuindo para que fabricantes aprimorem o projeto estrutural dos equipamentos. Para isso a pesquisa se fundamenta nos seguintes objetivos específicos: a) validar o uso da técnica de fluidodinâmica computacional em estudos hidráulicos de filtros de areia; b) estudar diferentes tipos de placa difusora e de drenos, avaliando a fluidodinâmica durante o escoamento da água nas direções coincidentes aos processos de filtração e retrolavagem, via CFD e módulo experimental; c) construir um protótipo de filtro de areia com componentes internos que apresentaram hidraulicamente as melhores características ao escoamento e d) avaliar e caracterizar em laboratório o desempenho hidráulico do protótipo desenvolvido.

2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA

2.1 Filtros de areia

Com o rápido desenvolvimento da agricultura irrigada, impulsionada a atender a crescente demanda por alimentos e a necessidade de maximizar o uso eficiente nos diversos setores consumidores dos recursos hídricos, a irrigação localizada se mostra como uma tecnologia recomendada para atender esse cenário. No entanto, Ravina et al. (1992) salientam que o uso de água de baixa qualidade com o consequente entupimento de emissores, vem desmotivando o uso da técnica pelos agricultores. Para Trooien & Hills (2007), a proteção dos emissores se faz comumente com o uso de filtros de tela, disco e areia, sendo o filtro de areia mais indicado para a remoção de impurezas da água em sistemas de irrigação localizada.

Mesquita (2010) define filtros de areia como equipamentos de tratamento físico da água que utiliza uma ou mais camadas de materiais granulares como elemento filtrante, principalmente areia, pedregulhos e zeólitas. Esses equipamentos consistem basicamente de tanques ou reservatórios cilíndricos metálicos, com diâmetros internos variando entre 30 a 120 cm, no qual se coloca, em seu interior, a(s) camada (s) de material filtrante (BURT & STYLES, 2007; TESTEZLAF, 2008). A Figura 1 apresenta um esquema estrutural desse equipamento e seus respectivos componentes. Nota-se que o corpo ou tanque possui uma abertura na parte superior e outra na inferior, para observação das condições internas, assim como, para o preenchimento e esvaziamento do material filtrante areia no tanque.

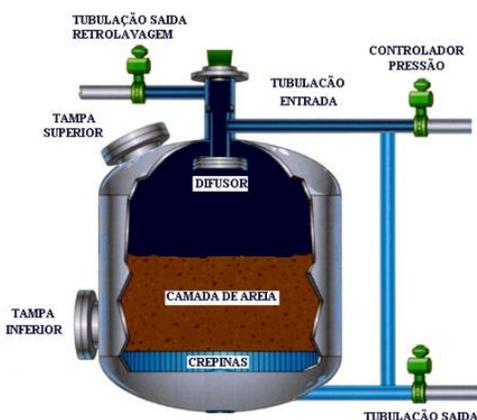


Figura 1: Esquema estrutural do filtro de areia para a irrigação (Fonte: SALCEDO, 2010).

Esses equipamentos, geralmente, são instalados no cabeçal de controle do sistema de irrigação e possuem dois processos fundamentais de funcionamento; a filtração propriamente dita e a retrolavagem ou lavagem do leito filtrante após um período de filtração.

A dinâmica de operação do processo de filtração baseia-se na entrada de água pela parte superior do filtro, a qual é distribuída por um sistema de difusão (placa difusora) sobre o leito filtrante. Durante o escoamento no interior do leito, as partículas de impurezas presentes na água ficam aderidas a esse material. Após a passagem pelo meio filtrante e remoção das partículas suspensas, a água é coletada na parte inferior pelo sistema de drenagem, que direciona a água já filtrada para a tubulação de saída. Com o aumento do volume de água filtrada (carreira de filtração), as impurezas aderidas aos grãos do material filtrante causam o entupimento dos poros do leito filtrante, sendo necessária a realização da limpeza do filtro, processo conhecido como retrolavagem.

Mesquita et al. (2012) destacam que a dinâmica de operação, filtração/retrolavagem afeta o desempenho hidráulico dos sistemas de irrigação. A obstrução contínua dos poros do leito filtrante por contaminantes da água aumenta a perda de pressão do sistema e altera a dinâmica total da bomba, com conseqüentes mudanças na pressão de trabalho e no fluxo de água do sistema de irrigação, devido à necessidade de desviar parte da vazão total do sistema para a retrolavagem do filtro. Os autores concluíram que a perda de pressão do equipamento é afetada pelo aumento da altura da camada filtrante, da vazão de filtração e da redução do tamanho dos grãos de areia do leito poroso. Arbat et al. (2011) destacam, porém, que a perda de pressão é também afetada pelas estruturas físicas do equipamento, como por exemplo, tubulações de entrada e saída, e acessórios internos do filtro (placa difusora e dreno). Burt (2010), durante ensaios experimentais com filtros de areia, salienta que as válvulas de retrolavagem também contribuem significativamente para a perda de pressão total do equipamento. Salcedo (2010), analisando resultados do comportamento hidráulico de filtros de areia para o escoamento coincidente ao processo de retrolavagem, verificou que os efeitos causados pelos componentes internos dos filtros (placa difusora e dreno) foram mais significativos do que os proporcionados pela granulometria e a altura da camada, confirmando a contribuição significativa desses acessórios no processo de perda de pressão desses equipamentos.

Mesquita et al. (2012) salientam que os modelos de componentes internos de filtros comerciais contribuem diferentemente para o comportamento da variação da perda de pressão em

função da taxa de filtração durante o processo de filtração. Arbat et al. (2011), analisando resultados de simulação utilizando fluidodinâmica computacional, observaram que 84,6% da perda de pressão total em filtros de areia são originados pela camada de areia e o restante, 15,4%, contribuições das tubulações de entrada e saída (4,4%) e placa difusora e crepinas (11%). Concordando com os resultados encontrados por Arbat et al. (2011), Ponciano de Deus et al. (2013) identificaram uma contribuição de 11,2% para a estrutura física do filtro (placa difusora plana sem bordas e drenos cilíndricos) e 88,8% para leito filtrante. Porém, esses autores observaram um aumento para 16% para a parte estrutural em função da troca da placa difusora plana para o modelo plano com bordas. Esses resultados enfatizam a importância em projetar adequadamente os acessórios internos de filtros de areia pela modificação causada no comportamento hidrodinâmico do equipamento. Arbat et al. (2013) enfatiza que a predição da perda de pressão produzida pelos filtros de areia em condições de camada limpa tem interesse prático e ajuda na seleção da bomba que deverá superar essa perda e mais a acumulada devido a retenção de impurezas. No entanto, os autores destacam a importância de caracterizar a contribuição dos acessórios nesse consumo de energia.

Arbat et al. (2013) estimaram, em seu estudo que analisa o comportamento hidráulico do tipo de dreno no escoamento em filtros de areia, que o leito filtrante (camada de areia) é responsável pela maior perda de pressão, cerca de 90%, dos quais 40 % desse total é perda produzida desde o topo da superfície de areia até uma região próximo ao dreno (região I) e 60% numa curta distância do fundo da coluna de areia até próximo ao dreno (região II). Os autores identificaram que a região II é menor que 2,5 mm acima do dreno, e justifica essa maior contribuição na perda de pressão devido ao regime de escoamento ser uniforme em I e não-uniforme em II, consequência da influência do dreno. Explicando, ainda, que como a área de abertura do dreno é menor em relação à área da secção transversal do filtro, a velocidade do fluido no leito filtrante aumenta com a aproximação do dreno, elevando a perda de pressão próxima a esses acessórios.

O desempenho hidráulico de filtros de areia é função das características físicas de seu projeto estrutural, principalmente, do tipo de sistema de distribuição de efluente sobre a camada filtrante (placa difusora), e do sistema de coleta de afluente (drenos) sob o leito poroso. Mesquita et al. (2012) recomendam a adequação dos projetos estruturais desses componentes como forma de aprimorar o seus comportamentos hidrodinâmicos. Burt (2010) reforça essa constatação

indicando que diferentes drenos (área de passagem, formato geométrico, área efetiva e arranjo do sistema de drenagem) promovem distintos valores de perda de pressão. Arbat et al. (2011) salientam que as perdas de pressão causadas pelas estruturas internas de filtros de areia devem ser minimizadas, principalmente com a aplicação de critérios de projeto de engenharia no desenvolvimento de novas propostas ou modificações dos equipamentos.

Testezlaf et al. (2013) destacam que as principais dificuldades encontradas pelos agricultores no uso de filtros de areia e que interferem na qualidade dos dois processos (filtragem e retrolavagem) referem-se à: definição da duração da filtração, do momento do início e do término da limpeza da camada filtrante. Os autores ressaltam que, a falta de critérios de projeto por parte dos fabricantes pode levar a seleção incorreta da granulometria e do volume da areia a ser colocada dentro do filtro, assim como, a escolha errada dos parâmetros de taxa de filtração e retrolavagem associados às características físicas dessa areia, e, principalmente, do desconhecimento sobre a eficiência de remoção do equipamento e das dificuldades de avaliação dos dois processos.

A compreensão do funcionamento hidráulico de filtros de areia, com ênfase na interação dos componentes estruturais, placa difusora e dreno, durante o escoamento coincidente aos processos de filtragem e retrolavagem, na dinâmica de entupimento e na limpeza dos poros, são pontos essenciais para garantir a eficácia de operação desses equipamentos em campo.

2.1.1 Componentes estruturais de filtros de areia

Os filtros de areia comumente usados na filtragem de água para a irrigação possuem dois elementos estruturais internos, responsáveis por auxiliar a hidrodinâmica de escoamento do afluente durante os processos de filtragem e retrolavagem. Essas estruturas são denominadas como placa difusora e o dreno, que serão caracterizadas a seguir.

2.1.1.1 Placa difusora

Mesquita (2010) define a placa difusora como uma estrutura metálica, instalada abaixo da tubulação de entrada da água e posicionada na extremidade superior interna do filtro, com a função de distribuir uniformemente o afluente sobre a superfície filtrante. Segundo Mesquita et al. (2012) o objetivo desse acessório é preparar o afluente para ser filtrado pela camada porosa, direcionando as linhas de fluxo do fluido perpendicularmente a superfície do leito, diminuindo a

velocidade do escoamento da água, transformando-a em energia pressão, evitando assim a movimentação do leito filtrante ou a deformação de sua superfície com a criação de canais ou elevações.

O direcionamento incorreto do fluxo de entrada de água para as paredes do filtro aumenta a criação e intensificação da turbulência do fluido sobre a superfície filtrante, promovendo o movimento das partículas de areia dessas regiões para o centro do leito. Destaca-se que a formação de irregularidades sobre a superfície da camada filtrante, com áreas menos espessas, intensificará o escoamento de fluido nessas regiões de menor resistência (caminhos preferenciais) e irá, conseqüentemente, aumentar a velocidade intersticial, propiciando o arraste de impurezas, previamente retidas, para o sistema de irrigação. Dessa forma, o projeto e a configuração da placa difusora devem ser adequados para mitigar esse fenômeno e possibilitando maiores índices de eficiência de remoção.

Mesquita (2010), avaliando modelos de filtros de areia nacionais, constatou a existência de três modelos de placa difusora com distintas geometrias e propostas de instalação (Figura 2).

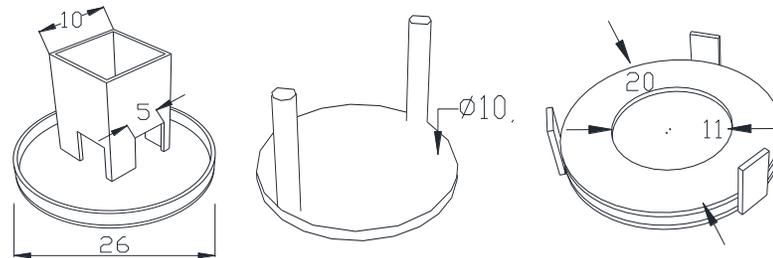


Figura 2: Detalhes de modelos comerciais de placa difusora de filtros nacionais avaliados por Mesquita (2010). (Dimensões em cm)

A pesquisa desenvolvida por Mesquita (2010) detectou que as empresas nacionais não fazem uso de critérios específicos de desenvolvimento tecnológico para esse componente, identificando que as geometrias utilizadas são adaptações de modelos de filtros internacionais e que as dimensões são definidas a partir de reaproveitamento de material. Essas constatações do mau dimensionamento e das inadequações do projeto estrutural desse acessório confirmam as causas dos movimentos de partículas filtrantes na superfície do leito poroso verificados em filtros de areia e que acabam prejudicando os seus desempenhos hidráulicos.

Burt (1994) sugere que os principais modelos de placas difusoras não são recomendados para dissipar a energia de altas vazões, limitando o valor de $61 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1} \text{ m}^{-2}$, como a máxima taxa de filtração, e afirma que valores acima do sugerido determinam escavações da camada filtrante,

formando cones ou montes no centro do filtro durante a filtração e promovendo uma camada de menor espessura próxima a parede do filtro. Mesquita et al. (2012), ao avaliar a operação de filtros em propriedades agrícolas e em laboratório, também observaram a ocorrência da deformação da camada superficial da areia, mostrando pontos de acumulação do material na parte central e de retirada nas regiões próximas às paredes do filtro, concordando com as observações feitas por Burt (1994). Ambos os autores enfatizam que os tipos (estrutura física) desse acessório contribuíram diferentemente com o efeito e a intensidade de deformação da superfície filtrante.

Ponciano de Deus et al. (2013) avaliando os efeitos do fluxo característico do escoamento de dois modelos de placas difusora, plana sem borda e plana com borda, sobre a superfície do leito filtrante com o escoamento coincidente ao processo de filtração (descendente), observaram que o acessório com bordas causou uma menor movimentação da superfície filtrante. Esse estudo mostrou que há interação entre o modelo de placa difusora utilizada em filtros de areia e o perfil de escoamento e distribuição interna do fluido, resultando na movimentação do material filtrante.

Em função da superfície irregular do leito filtrante e da criação de caminhos preferenciais de menor resistência ao movimento descendente durante a filtração, ocorre uma diminuição da área efetiva e da altura da camada filtrante, fazendo que a contaminação do leito ocorra rapidamente, reduzindo a eficiência de remoção do filtro e, conseqüentemente, aumentando a frequência de retrolavagem dos filtros. Esses fatores possibilitam a passagem de impurezas, em função do aumento da velocidade intersticial nas regiões onde o fluxo de afluente é intensificado, para o sistema de irrigação aumentando a recorrência do entupimento dos emissores de água.

2.1.1.2 Sistemas de drenagem (drenos)

O sistema de drenagem em filtros de areia é responsável por permitir a passagem do fluxo de água filtrada, impedindo a entrada de grãos de areia da camada filtrante para o sistema de irrigação, e também por distribuir uniformemente o fluxo reverso água, ascendente, no leito durante o processo de retrolavagem (MESQUITA et al., 2012).

Esses sistemas podem ser constituídos por braços coletores ou drenos (comercialmente chamados de crepinas), esquematizados nas Figura 3, cuja distribuição espacial e número na parte inferior do filtro, define o sistema de drenagem. Os drenos podem ter diferentes formatos e

dimensões, sendo a sua escolha e critérios de projeto (posicionamento ou arranjo e número de elementos) definidos pelos fabricantes.

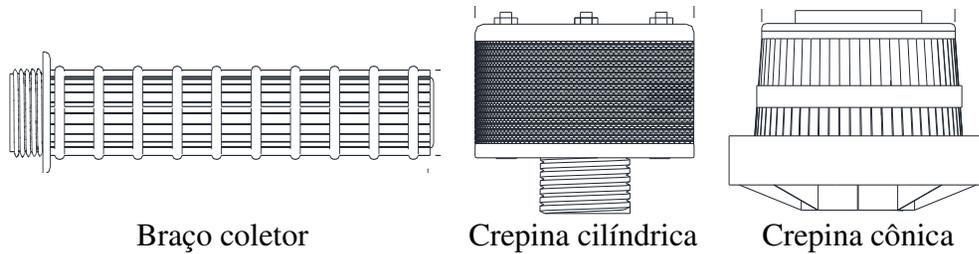


Figura 3: Modelos de drenos utilizados em filtros comerciais de areia fabricados no Brasil.

A montagem de um sistema que utiliza braços coletores é constituída de uma tubulação principal, geralmente centralizada na saída do filtro, onde são instalados os coletores que se ramificam em várias direções com o objetivo de recolher e direcionar o efluente para a tubulação do sistema de irrigação (Figura 4).

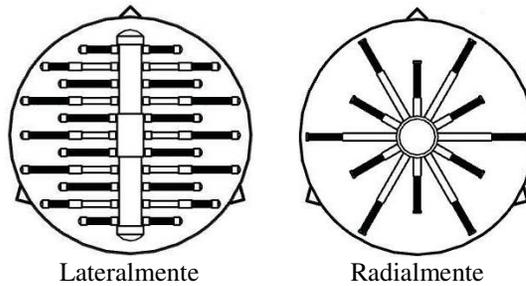


Figura 4: Esquema de dois sistemas de drenagem utilizando braços coletores (Fonte: LAKOS, 2009).

Por outro lado, em filtros que utilizam drenos ou crepinas é necessário dimensionar uma base interna (fundo falso) para a fixação desses acessórios, que devem suportar a pressão interna do filtro (Figura 5).

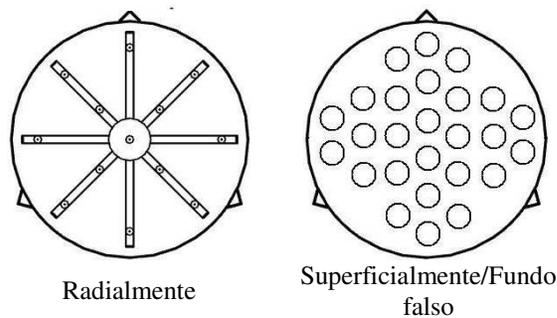


Figura 5: Esquema de dois sistemas de drenagem utilizando drenos ou crepinas (Fonte: LAKOS, 2009).

Burt (1994), analisando diferentes sistemas de drenagem utilizados em filtros de areia, afirmou que esses componentes apresentam diferenças na eficácia e durabilidade em função do modelo e do seu material constituinte. Di Bernardo & Dantas (2005), avaliando filtros de areia lentos utilizados em Estações de Tratamento de Água (ETA), identificou desarranjos da camada suporte e a formação de bolas de lodo como os principais problemas decorrentes do mau funcionamento do sistema de drenagem por ocasião da lavagem. Essas ocorrências também são visualizadas nos filtros rápidos, causados principalmente com a filtração de afluentes provenientes de águas residuárias. Burt (1994) destaca que o acréscimo de uma camada suporte de pedregulho sobre os drenos ajudaria na distribuição das linhas de fluxo geradas pelo sistema de drenagem, aumentando a eficiência do processo de retrolavagem.

Santos et al. (2013) caracterizaram as variações das linhas de fluxo geradas durante o escoamento ascendente e descendente, coincidente ao processo de retrolavagem e filtragem respectivamente, para um modelo comercial de dreno com formato cilíndrico utilizando túnel de vento como metodologia. Os autores observaram que a geometria do dreno afetou a trajetória e causou distorções das linhas de fluxo, destacando que a parte superior plana do acessório causava uma dispersão do fluido durante o escoamento descendente, desviando a trajetória da fumaça para a região de contorno do dreno. Esse comportamento das linhas de fluxo, além de proporcionar um aumento na perda de pressão durante o processo coincidente a filtragem, implicava em uma não uniformidade de escoamento ao longo do corpo da crepina, tornando sua parte inferior a área preferencial ao fluxo e reduzindo a área de efetividade do acessório. No fluxo com sentido coincidente a retrolavagem, os autores encontraram que, em função da geometria da crepina avaliada, a região lateral do acessório é a primeira a apresentar concentração ou fluxo preferencial das linhas de fluxo, o que, para a retrolavagem, implicaria maior perda de pressão do sistema devido à trajetória mais longa, em relação a linhas com movimentação unicamente vertical.

Dessa forma, o aprofundamento técnico sobre o comportamento causado pela interação fluido e geometria do dreno durante o escoamento de água em filtros de areia, tanto durante o processo ascendente quanto descendente, permitirá a identificação da hidrodinâmica específica gerada pelos modelos de dreno utilizados, possibilitando o aprimoramento das suas eficiências, em filtros de areia.

2.1.2 Princípios de funcionamento dos filtros de areia

Pode-se dividir tecnicamente a operação de filtros de areia em dois processos básicos: filtragem e retrolavagem, ambos com características de funcionamento distintas e que são afetadas diferentemente pela estrutura interna do equipamento e pelas características físicas do material filtrante.

Os filtros de areia utilizados na irrigação possuem fluxo predominantemente vertical descendente durante o processo de filtragem, sendo que a água ao entrar no filtro é interceptada pela placa difusora, que a distribui sobre a camada filtrante, possibilitando a retenção das impurezas presentes na água de irrigação, ao longo dessa camada filtrante. A Figura 6 apresenta de forma simplificada um esquema do fluxo de água que ocorre dentro dos filtros de areia durante o processo de filtragem.

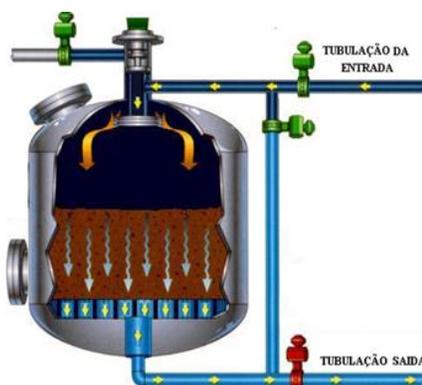


Figura 6: Detalhe do escoamento da água durante o processo de filtragem nos filtros de areia (Fonte: SALCEDO, 2010).

Kim & Whittle (2006) sugerem que a filtragem seja um termo usado para descrever a deposição e/ou fixação das partículas sólidas em suspensão proveniente do transporte de um fluido através de uma camada porosa. Esses autores identificam dois modos distintos de filtração em filtros de areia: (1) retenção nos poros ou capilares do leito filtrante, e (2) a adesão de partículas sobre as superfícies do grão do leito.

Di Bernado & Dantas (2005), afirmam que os filtros granulares apresentam mecanismos de filtração extremamente complexos, influenciados, principalmente, por características físicas e químicas das partículas da água e do meio filtrante, da taxa de filtração e do método de operação dos filtros. Segundo esses autores, a interação entre estas características resulta na ação de três mecanismos distintos: transporte, aderência e desprendimento. Para Pizarro Cabelo (1996) as

ações predominantes durante a filtração seriam: peneiramento ou coamento, sedimentação, adesão e coesão. Vermerein & Jobling (1984), esclarecem que durante a passagem da água pela areia, as partículas podem ser aderidas aos grãos, aglomerar-se em partículas maiores e se depositar por processo idêntico à decantação.

Assim, pode se afirmar que a retenção de partículas em filtros de areia ocorre tanto pela ação de profundidade como pela ação superficial do leito. No caso da ação de profundidade, a retenção das impurezas ocorre em todo meio filtrante. Já com ação superficial, a retenção das impurezas ocorre somente na superfície (ou seja, nas primeiras camadas do meio filtrante), como proposto por Di Bernado & Dantas (2005).

Choo & Tien (1995) afirmam que a filtração é um processo transitório, no qual o arranjo (tortuosidade), criado pelas partículas de areia da camada porosa, dificulta o escoamento do fluido. Com, o poro funcionando como retentor das impurezas encontradas na água, podendo ser levado ao entupimento em função da dinâmica de filtração. Assim, à medida que aumenta o volume de material depositado no elemento filtrante, a velocidade intersticial aumenta pela diminuição da porosidade, com um correspondente aumento da perda de pressão e das forças hidrodinâmicas de cisalhamento, arrastando, em consequência, certa quantidade de partículas para o interior do leito filtrante.

O aumento da contaminação do leito filtrante exige a lavagem (retrolavagem) do filtro pela inversão do fluxo da água (DI BERNADO & DANTAS, 2005). ASABE (1994) define a retrolavagem como o procedimento de passagem da água através do filtro em sentido contrário ao fluxo de filtração com o objetivo de remover partículas orgânicas e inorgânicas retidas no meio filtrante.

A Figura 7 ilustra a realização do processo da retrolavagem em um filtro de areia comercial. O efluente previamente filtrado por um ou vários filtros, presentes no conjunto de filtros, entra em direção vertical ascendente pelo sistema de drenagem que distribuem o fluxo ao longo da camada de areia. A passagem do fluido no sentido contrário determina uma expansão da camada filtrante, ficando parte da camada de areia suspensa no fluido, promovendo a remoção das partículas aderidas. Essa remoção é feita pela diferença de densidade entre as partículas e o meio filtrante, sendo que as partículas com maior densidade permanecem dentro do filtro, e as de menor densidade são retiradas pela água de retrolavagem (SALCEDO et al., 2011).

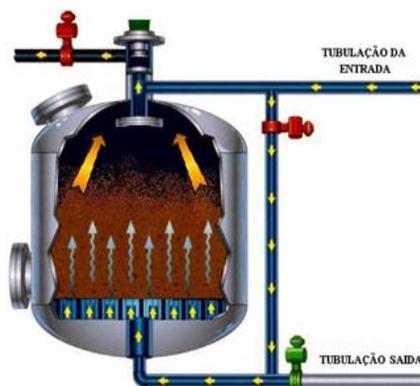


Figura 7: Detalhe do escoamento durante o processo de retrolavagem nos filtros de areia (Fonte: SALCEDO et al. 2011).

Para Nakayama et al. (2007) a velocidade do fluxo inverso deve ser suficiente para causar a separação e suspensão de material em partículas individuais de areia, atingindo o estado de fluidização, onde o contato partículas com partículas de areia em movimento é máximo, interagindo para friccionar os materiais fracamente aderidos, removendo-os dos grãos de areia.

Salcedo (2010) descreve o regime de fluidização particulada como sendo o momento em que a camada de areia sofre uma expansão progressiva na sua totalidade, proporcional ao aumento da velocidade. Segundo esse autor as etapas do processo de fluidização em filtros de areia podem ser caracterizadas por: 1) inicialmente ocorre a movimentação desordenada e agitada das partículas de areia, tanto na superfície como ao longo da espessura do leito filtrante; 2) com o aumento da velocidade da água vence-se o peso gerado pelas partículas e a expande, gerando uma camada de contínuos e rápidos movimentos ascendentes, mantendo as partículas suspensas e aumentando a porosidade do leito. Nessa etapa ainda prevalece à ocorrência de fortes turbulências, efeito de impulsos de jatos de água da parte inferior do filtro, com quantidade significativa de partículas fluidizadas desordenadamente acima da superfície da camada; 3) formação de diferentes estratos da camada de areia que se movimentam dentro do filtro: os superficiais mudam de posição sendo substituídos por estratos de areias do fundo; 4) no final do ciclo desse regime, a camada se levanta completamente, formando um colchão homogêneo de areia suspenso, ou seja, camada de areia estará fluidizada totalmente.

Lopez (2009) sugere que a expansão do leito filtrante deve permitir a remoção dos sólidos suspensos retidos em seu interior, sendo necessário o estabelecimento de parâmetros hidráulicos de velocidade superficial e diferencial de pressão para as características de operação dos sistemas de filtração.

A retrolavagem em filtros de areia é necessária e é um complemento importante da filtração, melhorando a qualidade da água e diminuindo os níveis de turbidez presentes. Alguns problemas associados com a filtração podem ser produzidos por excesso ou por inadequação de retrolavagens. Uma expansão insuficiente do meio filtrante produz uma limpeza inadequada da camada, gerando diferentes problemas na filtração, como exemplo as oscilações hidráulicas ou mudanças no fluxo, curtos tempos de filtração e, eventualmente, formação de aglomerados de partículas. No entanto, uma expansão demasiada promoverá elevação excessiva da camada filtrante, que acarretará na expulsão de parte do elemento filtrante (areia) para fora do filtro e que, conseqüentemente, irá reduzir a altura do leito podendo diminuir a eficiência de remoção de impurezas do equipamento (MESQUITA, 2010; TESTEZLAF, 2008).

Salcedo (2010) salienta que, em termos práticos, uma expansão homogênea da camada de areia em percentagens que permitam o levantamento adequado para a limpeza do meio, com a mínima ocorrência de perdas, fornecendo baixos valores de perda de pressão em função dos componentes internos do filtro, indica pontos relevantes na escolha do melhor sistema de filtração.

Observa-se que a hidrodinâmica do processo de retrolavagem é totalmente dependente do sistema de drenagem, sendo responsável pela distribuição das linhas de fluxo durante o escoamento ascendente do fluido. Uma distribuição desuniforme pode acarretar na formação de regiões preferenciais de escoamento e, conseqüentemente, reduzir a fluidização/expansão do leito, culminando na baixa eficiência de limpeza do leito filtrante. Além disso, acarretaria numa menor área efetiva de camada filtrante no processo de retrolavagem, conseqüentemente, diminuindo a qualidade do efluente.

2.1.3 Características do leito filtrante

Testezlaf et al. (2012) ressalta que a qualidade da água deve ser uma das preocupações dos projetistas e dos agricultores na hora de dimensionar e de operar sistemas de irrigação localizada, pois a ocorrência do entupimento de emissores por processos físicos, químicos e contaminantes biológicos pode se tornar um problema grave na manutenção diária do sistema de irrigação. Nesse contexto, filtros de areia são alternativas para solucionar problemas de entupimentos de emissores em irrigação localizada, sendo que a eficiência do processo retenção de impurezas pelo leito filtrante está diretamente correlacionada à correta seleção e características

dos grãos de areia e do dimensionamento do leito filtrante. Essas características são fundamentais para definir as principais variáveis de projeto, taxa de filtração disponível, qualidade do afluente, qualidade desejável do efluente, espessura da camada filtrante, que culminam na qualidade do processo de retenção de impurezas.

Segundo Weber (1979), o meio filtrante deve ter a dimensão ideal que retenha uma quantidade significativa de sólidos do afluente no processo de filtração e facilite o processo de limpeza na retrolavagem. Mesquita (2010) salienta que dado o processo de retenção das impurezas, realizada pela ação da superfície e da profundidade do leito filtrante, a definição da espessura da camada de areia torna-se fundamental para o sucesso da filtragem. Dessa forma Pizarro Cabelo (1996), sugere leitos de areia de 0,4 m a 0,6 m, afirmando que a espessura do leito filtrante influencia a qualidade do efluente até certo valor, chamada espessura crítica, porém, camadas maiores não melhorariam a qualidade da água, e sim aumentariam o tempo de contaminação total e, portanto, requerendo limpezas mais frequentes, devido ao aumento da perda de carga causada pela profundidade da camada. Vermerein & Jobling (1984), confirmam que a espessura da camada filtrante afeta a eficiência de remoção desses equipamentos e recomendam que a altura do leito filtrante seja de 0,5 a 1,0 m, não excedendo o valor máximo de 1,0 m, de forma a impedir, a formação de espaços com agregados de maior tamanho após a retrolavagem e reduzir a eficiência de remoção de impurezas do filtro. Mesquita (2010) chama a atenção para que as camadas filtrantes não ultrapassem 75% do corpo do filtro, permitindo um espaço vazio suficiente entre a base do difusor e a superfície do leito para a fluidização das camadas durante a retrolavagem.

Além da definição correta da espessura da camada porosa, a seleção da granulometria do elemento filtrante, neste caso areia, se faz necessário, pois as características físicas dos grãos de areia afetam a qualidade do efluente e no comportamento hidráulico do equipamento (TESTEZLAF, 2012). Haman (1994), afirma que uma areia muito fina permite resultados ótimos de filtração, mas não permite uma boa penetração de sólidos na camada, não deixando parte do leito sem utilizar, além de surgirem problemas de acumulações na superfície da camada, gerando compactações e dificultando sua remoção e necessitando de retrolavagens frequentes. Por outro lado, areias grosseiras toleram funcionamentos prolongados de processos com filtrações pouco efetivas, que permitem o entupimento dos emissores, facilitam a lavagem do meio filtrante, mas precisam de altas vazões para conseguir expansões que permitam a remoção dos contaminantes.

Testezlaf (2008) recomenda uma escolha correta do elemento filtrante como fator importante para garantir a eficiência de remoção do filtro. Dentre os critérios que devem ser considerados, Mesquita (2010) cita como parâmetros de seleção: diâmetro efetivo de partículas (D_{10}), coeficiente de uniformidade dos grãos de areia (CU), esfericidade e friabilidade.

Diâmetro médio efetivo (D_{10})

Característica definida como sendo o diâmetro da abertura da peneira que permite a passagem de 10% da amostra de material granular. Testezlaf et al. (2012) afirma que esse parâmetro caracteriza o menor diâmetro de partícula na classificação da areia e indica o tamanho da partícula que será removida pelo meio filtrante, e que, quanto menor for o D_{10} da areia melhor será a qualidade do efluente, mas menor será a duração da carreira efetiva de filtração do filtro, sendo, necessária a realização de retrolavagens mais frequentes, concordando com Haman (1994). Os autores sugerem ainda que a areia adequada seria aquela com o diâmetro efetivo médio igual ao diâmetro ou abertura mínima do gotejador e ao dobro do diâmetro mínimo de microaspersor, devido à relação entre o diâmetro efetivo do grão de areia e as dimensões das partículas removidas no leito filtrante.

Coeficiente de Uniformidade (CU)

O coeficiente de uniformidade (CU) se caracteriza como o intervalo de diâmetros de partículas de areia existentes dentro da amostra, definido como a relação entre a abertura da peneira que permite a passagem de 60% (D_{60}) do material poroso e a abertura da peneira que permite a passagem de 10% (D_{10}) do mesmo material. Di Bernado & Dantas (2005) afirmam que quanto menor o valor de CU, mais uniforme será o material, mais profunda será a retenção das impurezas e maior será a taxa de filtração.

Testezlaf et al. (2012) recomendam que, no caso de filtros de areia utilizados para a irrigação, seja utilizados areias com valor máximo de CU de 1,5, sendo aceitáveis areias com coeficientes entre 1,4 e 1,6. Os autores alertam que umas das possíveis consequências da utilização de areias com coeficientes acima desses valores é a ocorrência de perdas de material mais fino durante a retrolavagem.

Esfericidade

Esse termo, segundo Testezlaf et al. (2012) é complexo de se definir. No entanto os autores sugerem a escolha de grãos que possuem arestas afiadas e angulares ao invés daqueles de forma arredondadas ou roladas. Essa exigência se faz necessário para que esse material, dentro

da camada, crie um arranjo que permita a formação de trajetórias tortuosas para o fluxo de água, criando, assim, um maior percurso e possibilitando maior oportunidade para a retenção de sólidos suspensos e algas.

Friabilidade ou Dureza dos grãos

Os filtros de areia utilizados na irrigação localizada são caracterizados como pressurizados, e a combinação do processo de filtração e retrolavagem, compressão e atrito dos grãos de areia, podem modificar o formato desses grãos, alterar o diâmetro efetivo e desgastar as suas arestas, conseqüentemente, alterando as características físicas do material e a eficácia do processo de retenção de impurezas. Cleasby & Logsdon (1999) afirmam que a dureza dos grãos (friabilidade) define a durabilidade dos grãos no leito filtrante. No entanto, Testezlaf et al. (2012) ressaltam que o uso dessa propriedade física durante a escolha da areia para filtros utilizados na irrigação é limitada, pois sua determinação é complexa e, pelo fato de que alguns pesquisadores informaram que esse processo possa não ocorrer de forma significativa nesses equipamentos.

2.2 Fluidodinâmica computacional

A busca pela compreensão dos fenômenos associados ao escoamento de fluidos, fez com que a ciência aperfeiçoasse ferramentas que permitisse esse entendimento. Fortuna (2000) afirma que historicamente a mecânica dos fluidos foi a área da ciência que mais se preocupou em estudar esses comportamentos, ressaltando que os métodos experimentais foram os propulsores seguidos, posteriormente, das análises matemáticas. O autor afirma que a hidráulica, que trata do movimento de líquidos em tubos, canais entre outros, surgiu antes da hidrodinâmica, área de estudo que estabelece as relações entre o movimento dos fluidos e as forças que causam esse movimento de forma analítica.

Entretanto, a utilização da análise experimental em vários casos não é aplicável em função dos altos custos financeiros e temporais de execução. Da mesma forma, não há um modelo analítico de utilização absoluta e nem solução analíticas das *equações de Navier-Stokes*, principal modelo utilizado na Mecânica dos Fluidos, devido ao não desenvolvimento suficiente da matemática atual para solucionar equações diferenciais parciais não lineares (FORTUNA, 2000).

Assim, nem sempre os tratamentos teóricos e/ou experimentais são suficientes para o entendimento, reprodução e/ou solução do fenômeno em estudo. No entanto, com o advento do

computador surgiu uma terceira alternativa de se obter, pela solução numérica das equações de Navier-Stokes por técnicas computacionais, o campo de velocidades, pressões e temperaturas que compõem o escoamento. Essa nova alternativa conhecida como fluidodinâmica computacional, *computational fluid dynamics* (CFD), foi definida por Fortuna (2000) como a área da computação científica que estuda métodos computacionais para simulação de fenômenos que envolvem fluidos em movimento com ou sem trocas de calor, utilizando o método numérico de elementos ou volumes finitos.

Versteeg & Malalasekera (1995) definem os métodos de CFD como uma ferramenta computacional para análises de escoamento de fluido, assim como a transferência de calor e seus fenômenos associados, baseado na resolução numérica das equações fundamentais de conservação de massa, energia e quantidade de movimento em um domínio discretizado (geometria), que é convertido em uma malha de pontos nodais (volumes ou elementos finitos). Como resultado, obtêm-se os valores das variáveis características do escoamento (pressão, velocidade, temperatura, composições, etc.) em cada ponto da malha de cálculo e em função do tempo.

Li et al. (2008), sugerem que a análise do escoamento do fluido possibilita combinar a simulação numérica com a pesquisa experimental e teórica, identificando as características do fluxo. Provenzano et al. (2004) afirmam que a caracterização do escoamento do fluido permite projetar dispositivos hidráulicos em engenharia industrial e de muitos outros processos. Martignoni et al. (2007) avaliando a geometria de ciclones e suas influências no desempenho hidráulico, enfatizaram que uma boa compreensão da dinâmica do escoamento de fluidos na estrutura é necessária para fazer melhorias no projeto. Os autores ressaltam que as técnicas analíticas não permitem variações na geometria de forma a serem prontamente avaliadas, tornando os modelos de fluidodinâmica computacional em meios mais econômicos para compreensão da dinâmica de escoamento de fluidos em geometrias complexas, e permitindo analisar a influência das mudanças do projeto estrutural e das condições de operação do equipamento no escoamento do fluido.

No entanto, ressalta-se que a combinação das três formas de análise, experimental, teórica e simulação computacional, quando possível, devem sempre ser aplicadas em conjunto objetivando a formação e o aprofundamento do conhecimento referente ao estudo em questão.

2.2.1 Etapas do processo de simulação

A execução dos processos de simulação utilizando ferramentas de fluidodinâmica computacional é composta de diferentes etapas fundamentais, as quais podem ser caracterizadas como: (1) identificação do problema em questão (definição de objetivos e identificação do domínio), (2) pré-processamento (criação de geometria, geração da malha, definição das propriedades físicas dos fluidos, seleção de modelos matemáticos e configuração dos parâmetros do *solver*), (3) solução ou processamento (cálculo da solução), (4) pós-processamento (análise dos resultados). O esquema apresentada na Figura 8 mostra de forma simplificada o fluxograma das etapas do processo de simulação e os passos existentes dentro de cada uma (VERSTEEG & MALALASEKERA, 1995; FORTUNA, 2000; MALISKA, 2004; MANZANO, 2008).

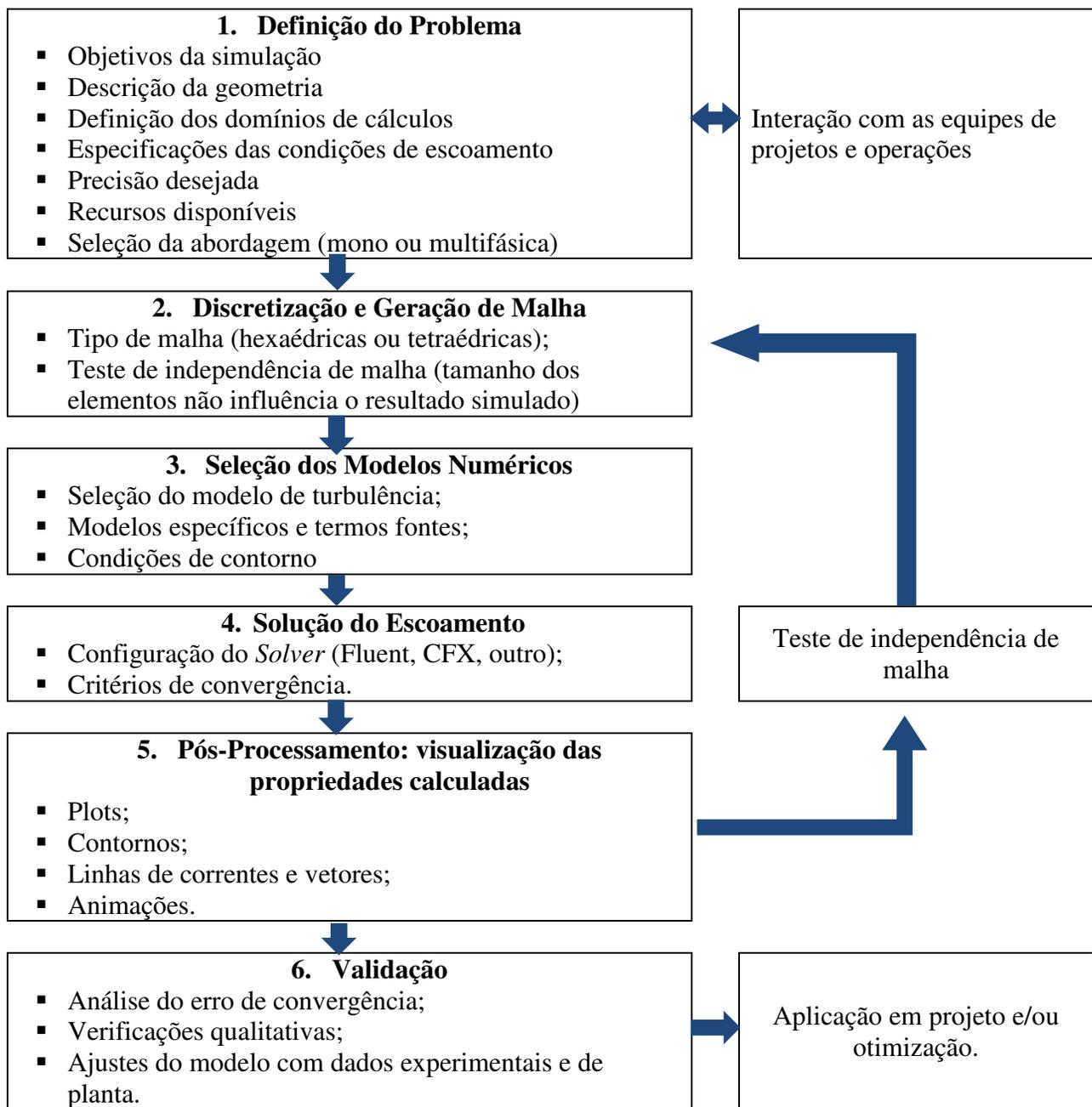


Figura 8: Fluxograma simplificado da rotina de simulações de fluidodinâmica computacional (Fonte: Adaptação de CÁRDENAS, 2012).

Os autores salientam, ainda, que todas as fases são de extrema importância para o processo de simulação, pois um erro cometido em uma dessas etapas será carregado até a solução final e, conseqüentemente, proporcionará interpretações equivocadas ou a impossibilidade de chegar a uma solução do problema. Essas etapas são apresentadas e discutidas a seguir.

1) Definição do objetivo: etapa necessária para avaliar a possibilidade de realização de algumas simplificações no modelo. Essas simplificações podem ser na geometria, formato 2D ou 3D, assimetria, entre outras, ou na modelagem física, escolha dos modelos de escoamento, causando influência nos resultados finais;

2) Pré-processamento: Essa etapa pode ser dividida em:

a. Geração de geometria: baseia-se na representação do domínio que será utilizado no escoamento do fluido. Essa geometria pode ser criada ou importada. Para essa geração utilizam-se softwares com a lógica CAD (Computer Aided Design) disponíveis no mercado. No caso da importação da geometria é necessário fazer um processo de adequação aos objetivos da análise com a eliminação de detalhes desnecessários ao estudo. Salienta-se também que muitas vezes faz-se necessário estender a geometria real nas regiões onde serão aplicadas às condições de contorno de entrada e saída, pois, em algumas condições, o fluido precisará de certa distância para que o escoamento entre em regime desenvolvido.

b. Geração de malha: é a discretização do domínio de cálculo, ou a divisão do domínio geométrico do problema original em estudo, em pontos nodais discretos, uma vez que, a solução numérica das equações governantes do escoamento acontece nesses pontos discretizados. As equações são resolvidas gerando variáveis com valores discretos em cada elemento (volume). A solução de um elemento é então utilizada como condição de contorno, no caso de solução explícita para o elemento adjacente. A exatidão da simulação está relacionada com o número e a qualidade das células da malha, sendo que, um elevado número de células proporcionará uma melhor solução, mas necessitará um maior tempo de cálculo e de capacidade computacional. Dessa forma, busca-se usar técnicas de refino da malha, o que geralmente acontece sempre em regiões onde se buscam maiores detalhamentos do escoamento, ou onde se esperam gradientes mais elevados das propriedades relevantes (velocidade, pressão, temperatura, etc.), ou em pontos onde a geometria apresenta características específicas. Exemplo de refino de malha é a criação de uma camada de prismas próximos à parede de escoamento do fluido para casos onde se busca caracterizar o efeito da parede no perfil de movimento do fluido. As malhas, inicialmente, podem ser classificadas em *estruturadas*, quando apresentam uma estrutura regular na distribuição espacial dos pontos nodais e *não-estruturadas*, quando não apresentam regularidade na disposição dos mesmos pontos (Figura 9). Observa-se que na malha estruturada cada volume de controle possui o mesmo número de faces e volumes vizinhos (com exceção daqueles localizados

na parede), o que não necessariamente acontece para o caso não-estruturado. Esta ordenação torna a solução numérica do primeiro caso mais simples (FORTUNA, 2000, MALISKA, 2004).

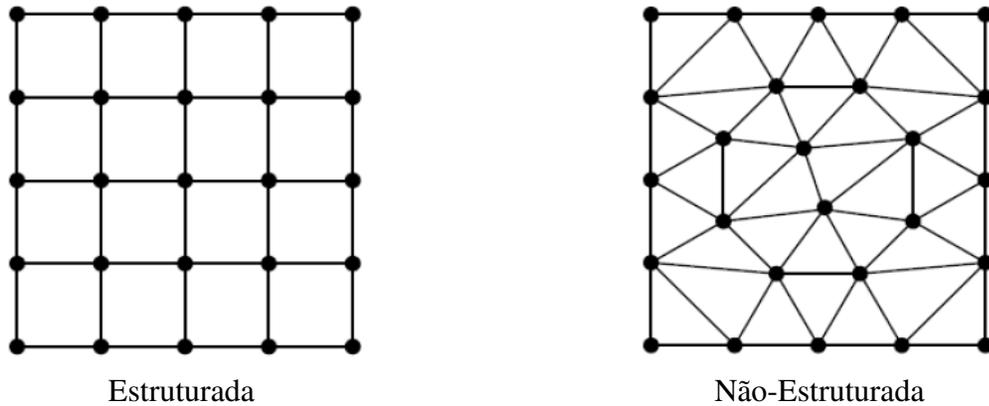


Figura 9: Esquema dos tipos de malha

As malhas não-estruturadas podem ser compostas de volumes de controle de diversas formas: tetraédricos, piramidais, prismáticos ou hexaédricos. Castro (2006) salienta que, sempre que possível, recomenda-se utilizar malhas híbridas, união de malhas *estruturadas* com as *não-estruturadas*, buscando potencializar as vantagens de cada modelo. Contudo, a malha não-estruturada apresenta maior adaptabilidade e facilidade de refinamento em regiões específicas, uma vantagem ao se trabalhar com geometrias complexas. Portanto, este foi o tipo malha utilizada no presente trabalho.

c. Seleção dos modelos físicos: para a realização dessa etapa da simulação faz-se necessário o conhecimento prévio da física do fenômeno em estudo, definindo os aspectos físicos do problema, características presentes no sistema (escoamento), regime de escoamento (turbulento ou laminar), regime permanente ou transiente, características particulares do fluido (propriedades físico-químicas, entre outras). Após a caracterização do fenômeno, selecionam-se as equações de governo e os modelos para os processos pertinentes ao escoamento (turbulência, radiação, transferência de massa e quantidade de movimento, interação entre fases, misturas, etc.) e, quando necessário, se especificam as reações químicas (termodinâmica, cinética), como também se introduzem as condições de contorno (entrada e saída do escoamento, simetria, parede, entre outras) e iniciais (pressão, velocidade, vazão mássica).

d. Parametrização do *solver*: etapa onde ocorre o estabelecimento dos parâmetros numéricos, critérios de convergência, intervalos de tempo, entre outros.

3) Solução ou processamento: é o momento em que o algoritmo de solução (solver) estará resolvendo as equações, sem a atuação direta do operador, sendo que essa fase finaliza com a convergência dessa solução, momento quando todos os níveis de resíduos estiverem abaixo dos níveis especificados no pré-processamento.

4) Pós-processamento: é a fase que será plotado e analisado o comportamento do escoamento utilizando as variáveis de interesse. Salienta-se que a técnica CFD possibilita a geração de mapas de contorno de propriedades em qualquer fronteira do modelo ou em planos de corte, curvas ou superfícies com um formato arbitrário pré-definido. Assim como, é possível criar linhas de corrente ou de trajetória emitidas de qualquer posição que se deseje que contemplem regiões do modelo cujos valores de determinadas propriedades estejam dentro de intervalos configuráveis.

2.2.2 Equações regentes (governantes) da fluidodinâmica computacional

A técnica de fluidodinâmica computacional (CFD) é baseada nas equações fundamentais que regem a mecânica dos fluidos e que geraram os modelos matemáticos formulados a partir da observação de fenômenos físicos que ocorrem na natureza. A metodologia utilizada nessas simulações baseia-se na solução da Lei de Conservação de Massa ou Equação da Continuidade, na Segunda Lei de Newton ou Equação de Quantidade de Movimento (momento) e na Primeira Lei da Termodinâmica ou Equações de Conservação de Energia, obtendo valores de pressão e velocidade nos volumes de controle definidos por uma malha (FORTUNA, 2000).

Segundo Manzano (2008), o desenvolvimento desses três princípios pode ser abordado por dois enfoques. O primeiro é o enfoque clássico da mecânica dos fluidos que parte da consideração de uma região finita no fluxo associado a um volume de controle com sua correspondente superfície. O volume de controle pode ocupar uma posição fixa no espaço, com o fluxo movendo-se através dele, ou, pode, o volume de controle estar em movimento, conectado ao fluido no qual se encontra. Dessa forma, considerando o volume de controle fixo ou em movimento, se obtém a formulação conservativa ou não conservativa, respectivamente, que em linguagem de simulação, são denominadas abordagens Euleriana ou Lagrangiana.

O segundo enfoque de aplicação das equações de governo baseia-se no estudo de um volume elementar de fluido. Assim como acontece quando se considera o volume de controle, o elemento diferencial pode encontrar se fixo em um ponto do espaço ou movendo ao longo de

uma linha de corrente com uma velocidade igual à velocidade do fluxo em cada ponto. Dessa forma, se obtém a partir desse elemento infinitesimal, as equações fundamentais em forma de derivadas parciais. Essa formulação também pode ser conservativa ou não conservativa (WENDT, 1992).

De acordo com Maliska (2004), o método numérico resolve um sistema de equações diferenciais, substituindo as derivadas existentes por expressões algébricas que envolvem a função incógnita. Os métodos numéricos mais usados para resolver este tipo de equações diferenciais são o método de diferenças finitas, elementos finitos e volumes finitos. O método dos volumes finitos, escolhido para emprego nessa pesquisa, é muito usado na técnica CFD para resolver as equações diferenciais que descrevem a fluidodinâmica de um processo estudado. O método consiste em definir e dividir o domínio do fenômeno em volumes de controle (discretização), onde as equações diferenciais vão ser integradas. As variáveis são definidas no centro dos volumes de controle, e as equações são integradas sobre esses volumes para se obter uma equação discreta, que conecta as variáveis no centro do volume de controle com sua vizinhança. Ainda de acordo com Maliska (2004) o método dos volumes finitos é todo aquele que, para obter as equações aproximadas, satisfaz a conservação da propriedade para cada volume elementar do domínio discretizado.

Assim, utilizando o princípio de que a massa não pode ser criada nem destruída, ou seja, a massa se conserva, aplica-se a lei da conservação de massa em um elemento infinitesimal e obtém-se a expressão geral da equação da continuidade em coordenadas retangulares, com a variação temporal da quantidade de massa no elemento igual à descarga resultante através das fronteiras do elemento; (monofásica).

$$\nabla(\rho\vec{U}) = \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

Onde:

$$\vec{U} = u\vec{i} + v\vec{j} + w\vec{k} \quad (2)$$

Sendo, t: tempo (T); ρ : massa específica do fluido ($M L^{-3}$); \vec{U} : vetor velocidade do elemento diferencial; u : componente do vetor velocidade na direção x ($L T^{-1}$); v : componente do vetor velocidade na direção y ($L T^{-1}$); w : componente do vetor velocidade na direção z ($L T^{-1}$).

Sendo:

$\nabla(\rho\vec{U})$ = fluxo de massa líquida através da superfície do volume considerado

Seguindo a mesma linha de raciocínio aplicada ao desenvolvimento da equação da continuidade, e partindo da segunda lei de Newton como princípio físico fundamental, obtém-se a equação geral da conservação de quantidade de movimento, com a taxa de variação temporal do momento de uma partícula igual à resultante das forças que agem sobre essa partícula, para escoamento incompressível e propriedades físicas constantes.

$$\frac{\partial\vec{U}}{\partial t} + (\vec{U}\nabla)\vec{U} = -\frac{1}{\rho}\nabla p + \nu\nabla^2\vec{U} + \vec{g} \quad (3)$$

Onde, p : pressão em uma superfície elementar ($M L^{-1} T^{-2}$); μ : viscosidade absoluta ($M T^{-1} L^{-2}$); \vec{g} vetor da aceleração da gravidade ($L T^{-2}$);

Sendo:

$\frac{\partial\vec{U}}{\partial t}$ = taxa de variação da quantidade de movimento;

$(\vec{U}\nabla)\vec{U}$ = fluxo convectivo da quantidade de movimento;

$-\frac{1}{\rho}\nabla p$ = força resultante devida ao gradiente de pressão;

$\nu\nabla^2\vec{U}$ = fluxo líquido difusivo da quantidade de movimento ou dissipação de energia cinética dependendo das escalas em questão, onde ν é a viscosidade cinemática;

Manzano (2008) destaca que, na maioria dos problemas de interesse na Mecânica dos Fluidos, não existe fortes gradientes de temperatura, possibilitando assumir nesses fluxos que a temperatura permanece constante em todos seus pontos não sendo, conseqüentemente, necessário introduzir a equação de energia nas simulações. Como o sistema estudado nessa pesquisa pode ser considerado isotérmico, a equação de conservação de energia térmica foi desprezada.

2.2.3 Modelos de turbulência

Dada a impossibilidade de se obter resultados numéricos para as equações de conservação de massa e de momento, para escoamentos com o nível de resolução espacial e temporal formadas pelas Equações (1) e (3), para a maioria das situações, surge à necessidade da modelagem de escoamentos turbulentos. Kundu & Cohen, (2002) e Davidson, (2003) salientam que escoamentos turbulentos são de grande interesse para a engenharia e suas principais

características estão relatadas na literatura, e dentre estas se destacam: Aleatoriedade; Vorticidade e Tridimensionalidade; Escalas Estruturais; Não-linearidade; Dissipação de Energia; Difusividade; Escoamento Contínuos.

Dentre as diferentes abordagens, métodos de caracterização da turbulência são possíveis destacar três grupos de métodos utilizados em fluidodinâmica computacional, sem que nenhum desses seja universalmente aceitos para todos os fenômenos hidráulicos, e são baseados na forma que analisam as características turbulentas a partir das equações de Navier-Stokes (SILVA JR, 2011).

O primeiro grupo é denominado DNS (Direct Numerical Simulation), que se destaca por resolver as equações de Navier-Stokes para escoamentos em todas as escalas de turbulência. Este método é considerado a solução teórica mais exata, e, conceitualmente, a mais correta, por não calcular médias ou aproximações das variáveis necessárias para a discretização numérica. Por essa razão, esse método requer mais informações ou condições iniciais e de contorno do escoamento, sendo aplicável na maioria dos casos. No entanto, o método DNS, exige maiores recursos computacionais, pois em sua abordagem há uma maior demanda por cálculos para determinar as propriedades turbulentas. Por essa razão Oliveira et al. (2004) sugere que o uso dessa metodologia seja restrita a escoamentos com baixos valores do número de Reynolds, pois para elevados números de Reynolds traduziriam em malhas computacionais contendo muitos elementos, requerendo uma infraestrutura computacional diferenciada. Pope (2000) ainda sugere que o uso do DNS é restrito a escoamentos em geometrias razoavelmente simples. Por essas razões o DNS torna-se inviável para simulação de filtros de areia.

A segunda opção são os métodos chamados LES (Large Eddy Simulation), que modelam a turbulência para fluxos com maiores intensidades turbulentas. Ferreira (2006) afirma que este método consiste na aplicação de uma operação de filtragem de forma a remover o efeito das escalas menores de turbulência, sendo necessário, neste caso formula-lo como transiente e tridimensional. Esse método considera que grandes vórtices condicionam mais efeitos ao escoamento que os menores, por isso esse modelo busca caracterizá-los adequadamente. Essas características determinam menor custo computacional em relação ao DNS.

O último método e mais utilizado, é o grupo que atribui ao fluxo uma velocidade média temporal, denominados RANS (Reynolds-Averaged Navier Stokes). Araújo (2012) enfatiza que no método RANS, as propriedades do escoamento são decompostas num valor médio dentro de

uma flutuação relacionada à turbulência, empregando-se da estratégia de decomposição em todas as propriedades do fluxo para se atingir uma equação para resolução do escoamento médio por meio de média temporal das equações de Navier-Stokes. Considerando os três métodos, o RANS é o que necessita menos capacidade computacional e melhor simula casos em regime estacionários, fazendo deste método o selecionado para os estudos em filtros de areia dessa pesquisa.

A introdução de variáveis de quantidades médias e as flutuações de propriedades, como por exemplo, a velocidade, nas equações instantâneas de Navier-Stokes, produzem as equações RANS, que representam apenas as quantidades médias do escoamento, modelando os efeitos da turbulência sem a necessidade da resolução das flutuações por ela geradas. No entanto, este procedimento de aproximação introduz termos desconhecidos nas equações, os quais contêm produtos das quantidades das flutuações. Conhecidos como tensões turbulentas ou de Reynolds, estes termos necessitam de equações adicionais para sua modelagem, que são definidas de acordo com o modelo de turbulência utilizado. O grupo de métodos denominado RANS atendem de forma significativa os fenômenos encontrados na hidráulica. Sua formulação baseia-se na hipótese de Boussinesq para as tensões de Reynolds, introduzindo a viscosidade turbulenta ou aplicando em cada tensão turbulenta sua correspondente equação de desenvolvimento (WILCOX, 2006).

Wilcox (2006) salienta que o modelo de turbulência $k-\epsilon$ padrão foi introduzido por Launder & Spalding (1974), sendo, desde então, extensivamente aplicado na resolução de problemas de engenharia. As principais vantagens deste modelo são: simplicidade – necessidade apenas da definição das condições iniciais e de contorno; excelente desempenho na predição da maioria dos escoamentos de interesse industrial; bem estabelecido – modelo de turbulência mais utilizado e validado (VERSTEEG & MALALASEKERA, 1995). No entanto, como desvantagem, ressalta-se o desempenho ineficaz em alguns casos importantes, principalmente os que envolvam regiões de escoamento com separação da camada limite ou baixo número de Reynolds. Já o modelo $k-\omega$ é mais sensível aos fenômenos próximos à parede, necessitando mais detalhamento da malha próxima a essas regiões. O modelo SST ($k-\omega$) faz-se a união dos outros dois modelos citados, isto é, oscila em aplicar o modelo $k-\omega$, próximo à parede, e $k-\epsilon$, no domínio restante.

O modelo k-ε é fundamentado na análise estatística e não na física da turbulência, fazendo com que constantes do modelo precisem ser ajustadas para satisfazer cada tipo de escoamento e, assume que, a viscosidade turbulenta (μ_T) está relacionada à energia cinética turbulenta (k), e à sua dissipação (ε). Assim, Jones & Launder, (1972) e Wilcox, (2006), mostram que os parâmetros de energia cinética turbulenta, a dissipação de energia cinética turbulenta e a viscosidade turbulenta devem atender, respectivamente, as seguintes equações:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (4)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + U_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = C_1 \frac{\varepsilon}{k} \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - C_2 \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] \quad (5)$$

$$\mu_T = \frac{C_\mu k^2}{\varepsilon} \quad (6)$$

Onde C_μ é uma constante, k é a energia cinética turbulenta e ε é a dissipação turbulenta e as constantes empíricas e relações auxiliares para simulação, como descritas por Wilcox, (2006), assumem os seguintes valores:

$$\sigma_\varepsilon = 1,30 \quad \sigma_k = 1,00 \quad C_1 = 1,44 \quad C_2 = 1,92 \quad C_\mu = 0,09 \quad (7)$$

Como pode observar, a aplicação de simulações matemáticas em fenômenos referentes à fluidodinâmica e suas particularidades requer o conhecimento e a identificação de cada caso a ser estudado, pois todo o processo de simulação é realizado a partir de escolhas sobre os diferentes modelos disponíveis para solução do caso. Nessa pesquisa foram utilizadas as equações de conservação de massa e quantidade de movimento, pois o processo foi considerado isotérmico, não sendo necessária a utilização da equação da energia, e para a modelagem da turbulência foi considerado o modelo k-ε, pois não se requeria detalhamentos nas camadas limites. Justifica-se o uso do modelo k-ε nessa pesquisa, pois o escoamento em filtros de areia se caracteriza por captar efeitos distantes da parede, região onde este modelo é indicado.

2.2.4 Propriedades e validade das técnicas CFD

Para Fortuna (2000) não se deve aceitar sem contestação ou validação os resultados numéricos fornecidos pelo computador, sendo necessário que eles sejam analisados criteriosamente e correlacionados à física do problema. Erros sutis de programação ou de condições de contorno podem fazer que uma simulação forneça resultados visualmente plausíveis, mas fisicamente incompatíveis com o problema tratado. Segundo AIAA (1998) citada por Fortuna (2000), existem duas etapas de avaliação de uma simulação: a verificação e a validação, que são constituídas de diferentes processos, identificados a seguir.

- Verificação: determina com que grau a implementação do modelo, representado pelas equações, parâmetros e métodos numéricos adotados, corresponde à sua descrição conceitual, isto é, se o modelo está corretamente implementado. Os resultados fornecidos pela implementação do modelo são comparados a outras soluções, consideradas referenciais. Essas soluções podem ser analíticas, numéricas ou experimentais. A verificação permite a avaliação de erros de implementação e incertezas em nível de modelamento computacional.

- Processos da Etapa de Verificação;
 - Examinar a programação: teste visual da programação e testes de I/O de sub-rotinas e funções;
 - Examinar a convergência de resíduos: é necessário que o código demonstre convergência ao longo das iterações nas simulações de verificação;
 - Examinar a consistência da solução: deve-se entender a coerência física da solução em aspectos básicos, como conservação da massa num duto, ou perda de pressão total dentro de uma camada limite;
 - Examinar a convergência espacial: as simulações em malhas com sucessivos refinamentos deve mostrar convergência da solução (ou do erro) conforme o espaçamento de malha diminui;
 - Examinar a convergência temporal: os erros devem diminuir com a redução do passo (intervalo de tempo de simulação) no tempo;
 - Comparar resultados das simulações: conferir resultados com soluções de alta precisão, que são, geralmente, soluções analíticas para problemas que suportam esse tipo de solução (e.g., camada limite laminar, tubo de choque);

- Validação: quantifica o grau de representatividade do modelo em relação ao fenômeno físico real. Essa análise é, normalmente, realizada por comparações sistemáticas com dados experimentais, representativos ao fenômeno no qual se espera utilizar na simulação. Salienta-se que se deve considerar nesse processo as incertezas causadas nos ensaios experimentais. Essa etapa determina se a simulação computacional representa a realidade física e avalia a ciência teórica nos modelos conceituais pela comparação com resultados experimentais.

- Processos da Etapa de Validação

- Comparar resultados de simulações com dados experimentais, que são uma observação do “mundo real” em uma forma controlada. Ao se comparar resultados de simulação com esses dados, espera-se que haja boa correlação. Para se contornar o fato de que dados experimentais também contêm erros, a validação deve ser feita de forma incremental;
- Examinar incertezas dos modelos. Os modelos físicos implementados podem conter alguns níveis de incerteza devido à falta do completo entendimento do processo físico (e.g., modelamento de turbulência). As incertezas podem ser conhecidas simulando-se vários modelos para vários casos teste;

Manzano (2008) destaca que a validade da técnica de CFD não cabe dúvida sendo uma ferramenta de grande potencial em projetos e investigações hidráulicas. No entanto, enfatiza a necessidade de validar os resultados simulados por meio de experimentação clássica e testes laboratoriais. Lembrando que, para essas variáveis, os resultados da solução das equações diferenciais parciais se aproximam da solução real dessas equações. O autor, concordando com Fortuna (2000), sugere ainda a observância nas variáveis das propriedades de convergência, consistência, estabilidade e conservação.

- Convergência: quando a solução numérica da equação discretizada no domínio de interesse se aproxima da solução exata da equação diferencial parcial;
- Consistência: a solução deve permanecer quase constante quando o espaçamento da malha, ou o intervalo de tempo para problemas não estacionários, tender a zero. A diferença entre a solução discretizada e a exata é assimilável ao erro de truncamento. A consistência é condição necessária para a convergência, sendo inútil se a solução numérica não for convergente;

- Estabilidade: acontece quando os erros ou perturbações geradas na solução não são amplificados durante o processo de simulação.

2.2.5 Aplicações da fluidodinâmica computacional na engenharia agrícola

O avanço do uso da fluidodinâmica computacional, fez dessa técnica uma ferramenta integrada ao ambiente de projetos e análises de engenharia de muitas empresas pela sua capacidade de prever os resultados, na realização de novos projetos ou processos, antes mesmo que eles sejam fabricados ou implementados (SCHALDACH et al., 2000). Lee et al. (2013) salientam que essa ferramenta permite uma análise profunda da dinâmica de fluidos e seus efeitos locais em vários domínios do ambiente agrícola. Esses autores destacam o uso de CFD por alguns engenheiros projetistas na análise do desempenho de novos sistemas antes de decidir quais e quantos testes de validação devem ser realizados de forma sustentável, reduzindo os custos de produção, e fornecendo informações detalhadas para auxiliar na tomada de decisão e planejamento do projeto.

Norton et al. (2007) afirmam que a ferramenta de CFD se tornou muito popular no campo da engenharia, incluindo na engenharia agrícola, destacando que no passado, a aplicação era limitada apenas às estruturas agrícolas, como a solução de problemas ambientais em estufas, instalações de produções de animais e em armazéns de estocagem de cereais. No entanto, ao longo dos anos, a versatilidade, precisão e confiabilidade, oferecidas por essa técnica têm levado ao aumento da sua aceitação pela comunidade científica de engenharia agrícola, tornando-se uma ferramenta importante na investigação e análise de diversos fenômenos na indústria agrícola. Assim, a aplicação de CFD tem se difundido amplamente em vários campos da indústria agroambiental, tais como os processos atmosféricos, manejo do solo e da água, segurança e gestão de desastres ambientais, a otimização dos sistemas de produção para aplicações de energia renováveis e de fertilizantes (LEE et al., 2013).

Existem atualmente pesquisas publicadas nas áreas de hidráulica geral e engenharia de irrigação que utilizam fluidodinâmica computacional. Davis & Stewart (2002) demonstraram a utilidade do CFD nos estudos de válvulas, bombas e cavitação, e no aperfeiçoamento da geometria dos dispositivos hidráulicos. Palau Salvador et al. (2004) propuseram uma abordagem com CFD para avaliar as perdas de pressão localizadas em conexões de um gotejador on-line, baseada na análise de turbulência ao redor do emissor. Li et al. (2005) simularam as

características de fluxo no interior do labirinto de três tipos de gotejadores, permitindo visualização da distribuição da magnitude da velocidade, da vorticidade e da intensidade de turbulência, enquanto Wei et al. (2006) avaliaram as características de fluxo interno para gotejadores do tipo labirinto com formatos triangular, retangular e trapezoidal, usando o modelo de turbulência $k-\epsilon$ em três dimensões e com malhas tetraédricas, configuração análoga a aplicada por Palau Salvador et al. (2004). Na mesma linha de estudo Palau Salvador et al. (2006) determinaram a perda de pressão localizada em emissores e Qingsong et al. (2008) avaliaram a variação da pressão em função do entupimento de gotejadores de irrigação localizada. Zhang et al. (2007) analisaram a relação entre a vazão e perda de pressão, bem como a distribuição do fluxo nos canais de labirintos de gotejadores.

A técnica de simulação numérica tem sido utilizada na análise de desempenho de equipamentos e processos de filtragem. Oliveira et al. (2009) avaliaram a influência das dimensões da geometria no desempenho de filtros hidrociclones, onde modelaram o equipamento em duas dimensões, usando o solver comercial FLUENT, para interação em dupla precisão, escoamento em regime permanente e modelo de Reynolds Stress Model (RSM) para turbulência e caracterizaram a influência da parede cônica do equipamento no processo de separação de partículas suspensas. Cheng & Zhu (2005) simularam bidimensionalmente a hidrodinâmica do fluxo líquido-sólido em reatores circulante de leito fluidizado, empregando o modelo Euler-Euler para escoamento multifásico e $k-\epsilon$ para a turbulência, considerando que essa modelagem matemática suficiente para representar o fenômeno gerado durante esses escoamentos.

Qi et al. (2013) compararam a hidrodinâmica de um filtro de areia de fluxo ascendente por modelagem CFD com a obtida experimentalmente. Os autores, a fim de aperfeiçoar o projeto de engenharia desses filtros e investigar mais intensamente remoção de poluentes, dividiram o estudo em quatro etapas; (1) realização de experimentos rastreadores em filtros especiais de fluxo ascendentes para caracterizar o padrão de escoamento da água em diferentes estruturas hidráulicas, e, para determinar os fatores de interferência a hidrodinâmica do fluido; (2) utilização de modelos matemáticos com o propósito de diagnosticar, localizar falhas de fluxo e sugerir causalidades, incluindo a proposta de um novo modelo; (3) uso do software de CFD, Fluent®, para simular o escoamento hidrodinâmico desses equipamentos e visualizar o padrão de fluxo de água durante o processo; (4) após, a calibração dos modelos matemáticos de escoamento de fluxo e a obtenção dos resultados das simulações com os tipos de tubulação, aplicou-se o CFD para

simular e estudar as áreas de fluxo para diferentes diâmetros de meio filtrante. A modelagem matemática das simulações foi parametrizada com prescrição da velocidade na entrada e pressão na saída, considerando parede lisa e não deslizante, e, para a simulação da camada porosa adicionaram às equações padrões (da continuidade e momento) um termo constituído de um coeficiente de perda viscosa e outro da resistência inercial, a geometria foi simplificada considerando-a simétrica e regime de escoamento laminar. Os autores não concluíram sobre a validade do uso da fluidodinâmica computacional, porém, a sua análise tornou evidente o potencial e a legitimidade da ferramenta computacional nos estudos realizados.

Arbat et al., (2011) usando fluidodinâmica computacional determinaram o efeito que os acessórios estruturais internos de filtros de areia, placa difusora e dreno, causam na perda de pressão total do equipamento. Os autores ainda simularam o comportamento da camada porosa nesse processo, correlacionando os resultados encontrados nas simulações com dados experimentais e teóricos. O equipamento testado possuía 500 mm de diâmetro, 570 mm de espessura de camada filtrante. A geometria virtual seguiu o modelo experimental com algumas simplificações, sendo a mais significativa para o formato do dreno, que originalmente era cônico e o virtual foi considerado cilíndrico. Foram utilizadas nesses estudos malhas não-estruturadas com refinamentos em regiões de maior interesse de estudo. Para as simulações foi usado um software comercial FLUENT 6.3, modelado numericamente com a equação da continuidade e de momento linear, e considerando-se fluido incompressível e prescrevendo-se a pressão na entrada e fluxo de massa na saída, como condições de contorno. Os autores salientam que foi adicionado à modelagem numérica um termo fonte para configurar a camada porosa que considera as perdas viscosas e inerciais, e outro, para a turbulência, $k-\epsilon$, na região de escoamento monofásico de água. Os resultados das simulações subdimensionaram os valores, mostrando a discrepância de 9 % a mais para os valores experimentais. Essa diferença no comportamento foi justificada por ter sido considerado água limpa no fluído das simulações e nos ensaios experimentais o afluente apresentava impurezas.

Os resultados obtidos até o momento com a aplicação da ferramenta de fluidodinâmica computacional em problemas relacionados com a Engenharia Agrícola, principalmente, com o seu emprego em projetos de engenharia de irrigação, permite visualizar o seu potencial para gerar critérios de projeto em filtros de areia.

3 MATERIAL E MÉTODOS

A Validação da hipótese dessa pesquisa requer a avaliação de uma metodologia para propor e desenvolver acessórios internos (placa difusora e dreno) que maximizem o potencial operacional dos filtros de areia, eficiência de remoção de impurezas e limpeza do leito filtrante, garantindo uma maior eficiência hidráulica durante o processo de filtração e de retrolavagem nesses equipamentos. Assim, para atingir os objetivos e confirmar a hipótese desse trabalho, a parte experimental foi dividida em quatro etapas: (1) validação do uso da fluidodinâmica computacional em análises hidráulicas para filtros de areia; (2) realização de estudos do comportamento hidrodinâmico de placas difusoras e de drenos comerciais no escoamento interno de filtros de areia; (3) projeto e dimensionamento de novos acessórios, placa difusora e de dreno; e (4) construção e avaliação hidráulica de um protótipo de filtro de areia.

3.1 Validação da fluidodinâmica computacional em análises hidráulicas para filtros de areia

Buscou-se validar a fluidodinâmica computacional como ferramenta para confirmar a possibilidade do seu uso no aprofundamento do conhecimento sobre a influência das características estruturais da placa difusora e dos drenos no escoamento do fluido nos sentidos descendente e ascendente, coincidentes aos processos de filtração e retrolavagem, respectivamente. Os resultados obtidos nessa etapa são a base para o desenvolvimento do projeto de engenharia dessas estruturas físicas, e, conseqüentemente, na operação de filtros de areia.

Stern et al. (1999) destacam que a validação é um processo de avaliação das incertezas da modelagem empregada na simulação usando dados experimentais de referência e, quando possível, estimativas de sinal e magnitude do erro da modelagem. No caso desse estudo, a validação da ferramenta de fluidodinâmica computacional foi realizada pela comparação dos valores de perda de pressão encontrados durante as simulações via CFD com os obtidos experimentalmente em ensaios laboratoriais. Esse procedimento é recomendado e considerado fundamental para desenvolvimentos realizados por meio da fluidodinâmica computacional (FORTUNA, 2000; ZHANG et al., 2010; FRANCO et al., 2011; RONG et al., 2011, SAHA et al. 2011).

Assim, para realizar a análise da ferramenta computacional e simular o comportamento do escoamento em filtros de areia, essa etapa da pesquisa foi dividida em três etapas: 1) ensaios

laboratoriais para caracterizar o efeito de diferentes modelos de placa difusora no processo de perda de pressão do módulo experimental; 2) simulação computacional das condições avaliadas nos ensaios laboratoriais, empregando representação do módulo experimental; e 3) análise de sensibilidade da modelagem numérica.

3.1.1 Ensaios laboratoriais

Para os ensaios laboratoriais foi construído um módulo experimental (Figura 10), buscando padronizar as condições estruturais e dimensionais dos filtros de areia e dar praticidade aos ensaios, permitindo a troca dos acessórios, placa difusora e drenos, sem descaracterizar as demais estruturas do equipamento. Esse módulo foi projetado para facilitar a visualização dos processos de escoamento durante a filtração e retrolavagem, sendo constituído de um corpo de metal, em aço doce 1020, de 1 m de altura e 0,5 m de diâmetro, com visores laterais em placas de acrílico de 2,5 cm de espessura.

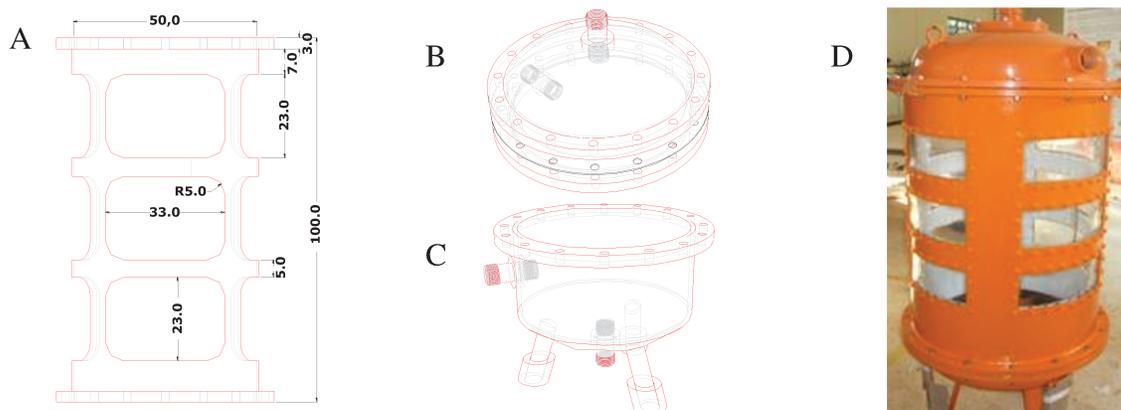


Figura 10: Projeto estrutural do módulo experimental. ^[A] detalhe do corpo, ^[B] detalhe do tampo superior e, ^[C] detalhe do tampo inferior, ^[D] imagem do módulo experimental construído (Dimensões em cm).

O módulo experimental foi instalado e instrumentalizado no circuito hidráulico presente no Laboratório de Hidráulica e Irrigação da Faculdade de Engenharia Agrícola (FEAGRI), na Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), seguindo o esquema apresentado por Mesquita (2010), indicado na Figura 11. O circuito de ensaio era constituído de dois registros tipo agulha, instalados na entrada e na sua saída com a função de controlar as velocidades de ensaio e de manter o diferencial de pressão, um sensor eletromagnético para monitorar a vazão do sistema (marca Seginet, modelo 2551), um medidor de vazão ultrassom (marca FMS e modelo UFM170) que monitorava a velocidade de escoamento da água e dois pontos para tomada de pressão

imediatamente antes e após o filtro de areia. Os transdutores de vazão e pressão foram calibrados e os valores adquiridos eram monitorados por leituras periódicas com manômetros de Bourdon para pressão e medidor de ultrassônico para vazão.



Figura 11: Módulo experimental instalado no circuito hidráulico. (Foto: Marcio Mesquita)

As variáveis experimentais de vazão e diferencial de pressão do módulo experimental foram monitoradas por um sistema de aquisição de dados que gerenciava um sensor de vazão eletromagnético, transdutores diferenciais de pressão (marca MOTOROLA, modelo MPX 5700DP) acoplados às tomadas de pressão do tipo integral (Mesquita, 2010). O sistema de aquisição era composto por uma placa de aquisição de dados (marca National Instruments Inc., modelo PCI 6221), instalada em um microcomputador e gerenciada por uma interface computacional desenvolvida no software Labview® (National Instruments Inc).

Os ensaios laboratoriais de validação constituíram-se na determinação da perda de pressão em função da velocidade de entrada da água nos filtros, para as seguintes condições de ensaio:

- Módulo experimental vazio, sem placa difusora e dreno;
- Módulo experimental configurado com placa difusora e sem o dreno, com a avaliação de dois modelos de placa difusora;
- Módulo experimental configurado com um modelo de dreno e de placa difusora. Neste ensaio foi utilizada uma unidade de dreno instalado no centro do fundo falso do equipamento, ensaiada com dois tipos de placa difusora.

Esses ensaios foram realizados com o módulo experimental sem leito filtrante e utilizando água limpa, com escoamento no sentido coincidente ao processo de filtração

(descendente) para cinco valores de velocidade, 0,5; 1,0; 1,5; 2,0 e 2,5 m s⁻¹, medidos na tubulação de entrada, com o objetivo de individualizar os efeitos dos componentes estruturais. Foram realizadas três repetições para cada valor de velocidade de escoamento, com valores aplicados em ordem crescente, decrescente e aleatória.

Os acessórios utilizados nos ensaios foram dois modelos de placa difusora e um de dreno, selecionados aleatoriamente a partir de modelos fabricados comercialmente por empresas nacionais de filtros de areia (Figura 12).

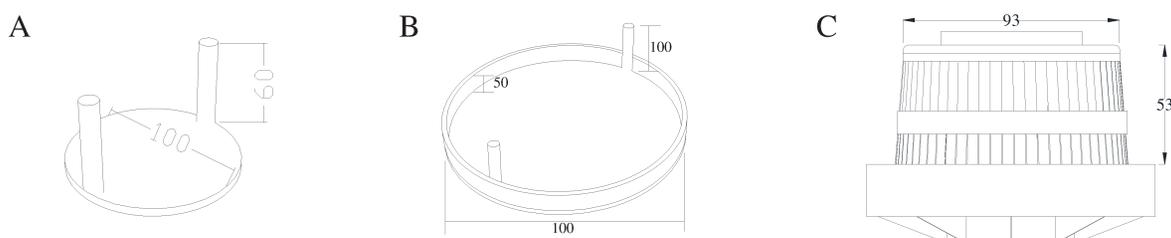


Figura 12: Acessórios internos utilizados nos ensaios para validação. ^[A] Placa difusora plana sem borda. ^[B] Placa difusora plana com borda. ^[C] Crepina cônica. Nota: Dimensões em mm.

Para cada velocidade ensaiada foi registrado um valor por segundo para as variáveis de diferencial de pressão e da vazão, durante um período de tempo de três minutos. A partir dos valores médios registrados determinou-se a perda de pressão característica de cada configuração para uma determinada velocidade de escoamento, sendo as curvas características de perda de pressão em função da velocidade de escoamento ajustadas aos valores médios pelo software Statistica 6.

3.1.2 Simulações computacionais dos ensaios experimentais

As simulações computacionais foram realizadas com o apoio do Departamento de Ingeniería Rural y Agroalimentaria da Universidad Politécnica de Valencia–Valencia/Espanha, no período de setembro de 2011 a fevereiro de 2012 e, posteriormente, no Laboratório de Pesquisa em Processos Químicos e Gestão Empresarial (PQGe) da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Estadual de Campinas.

Na sequência serão descritos os procedimentos realizados, os programas e modelos selecionados e as tomadas de decisões assumidas durante o processo de modelagem do escoamento em filtros de areia empregando a fluidodinâmica computacional para a simulação dos ensaios nas condições laboratoriais. Basicamente, dividiu-se todo o processo em três etapas: a) Construção da geometria dos acessórios e da malha numérica correspondente; b) Estabelecimento

das condições iniciais do solver de solução ou, também chamada de fase de pré-Processamento e, c) Análise dos resultados ou Pós-Processamento.

a) Construção das geometrias dos acessórios e das malhas numéricas dos volumes

As geometrias representativas dos acessórios auxiliares internos (placa difusora e dreno) e do módulo experimental foram criadas em três dimensões, utilizando o software ICEM-CFD, respeitando as dimensões do módulo experimental (Figura 13). No caso desse projeto, foram simplificados nos desenhos virtuais detalhes considerados não relevantes ao escoamento do fluido, como por exemplo: as emendas das placas de acrílico com as chapas de aço do corpo do módulo experimental, conexões (união, T, luvas), entre outras. Salienta-se que essas simplificações foram desconsideradas por não trazerem dados significativos ao entendimento da dinâmica de escoamento em filtros de areia.

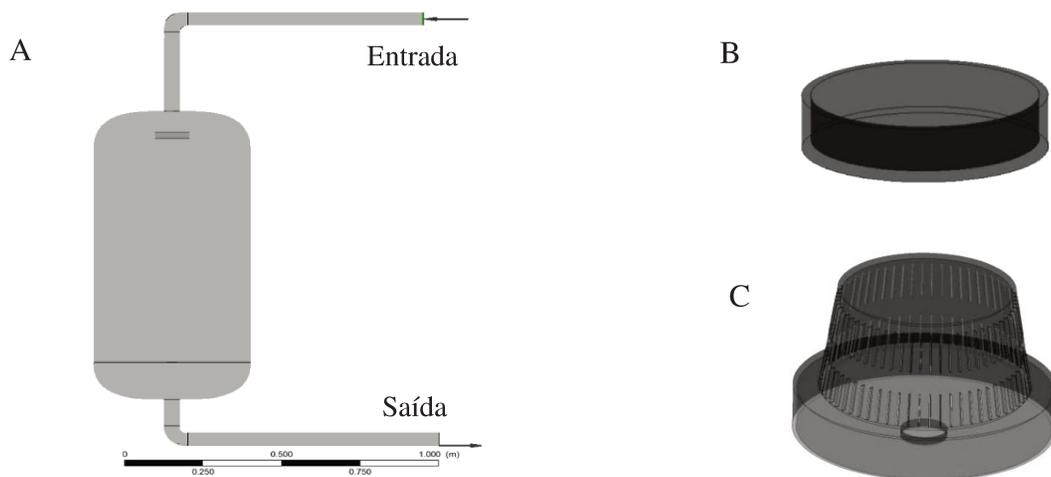


Figura 13: Geometrias desenvolvidas para serem utilizadas nas simulações. ^[A] Detalhe do módulo experimental e do domínio de estudo. ^[B] Detalhe da placa difusora. ^[C] Detalhe do dreno.

A partir da geometria foram concebidas as malhas numéricas, ou seja, divisão do domínio em volumes de controle, nos quais será obtida a solução das equações propostas pelo modelo (Figura 14). As malhas foram construídas no formato não estruturado do tipo tetraédrica em todo o domínio, em função da dificuldade de gerar malhas estruturadas nos filtros de areia pela complexidade de detalhes do projeto estrutural do equipamento.



Figura 14: Detalhe dos volumes de controle utilizados na geometria estrutural do corpo do filtro ensaiado.

Após a construção das malhas, foi realizado um teste de independência de malha para definir a quantidade mínima de volumes necessários para a simulação do módulo experimental sem os acessórios. A independência de malha é obtida quando os resultados gerados numa simulação, efetuada para um determinado número de volumes (malha), não variam significativamente de outra realizada com uma malha que possui quantitativamente mais volumes, ou seja, quando um refinamento na malha empregada não gerar mudanças significativas nos resultados.

A Figura 15 apresenta o comportamento da perda de pressão em função do número de volumes de controle, onde os resultados mostraram um valor mínimo de 750 mil elementos para que não ocorram variações significativas no valor dessa variável para o módulo estudado.

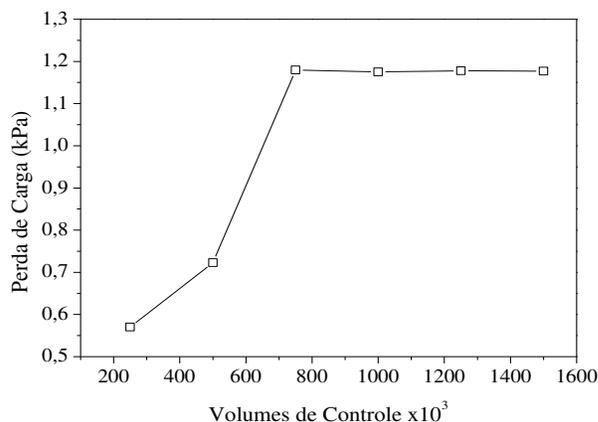


Figura 15: Gráfico de perda de pressão em função da concentração da malha numérica obtido no teste de independência de malha.

Salienta-se que o teste de independência de malha foi realizado para o módulo experimental configurado sem placa difusora e dreno. Após o acréscimo desses acessórios internos nos modelos de simulação, os valores dos volumes de controle variaram em função da adição dessas novas geometrias, porém sem prejuízos para a precisão dos resultados.

b) Pré-Processamento

Após a definição do domínio de estudo, construção das geometrias e aceções das regiões de entrada, saída e parede, foi realizada a parametrização do algoritmo de solução (solver) no programa *ANSYS-CFX*, onde, para interpolação de valores, se optou em simular com dupla precisão em alta resolução e em primeira ordem (*High Resolution and First Order*). Salienta-se que essas condições foram assumidas buscando maior precisão nos cálculos durante o processo de simulação e por não contribuírem com acréscimos significativos no tempo computacional. As propriedades físicas do fluido, condições de contorno das simulações e os valores iniciais das variáveis estabelecidas para as seções específicas de ensaio, entradas, saída e parede, são apresentados nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1: Propriedades físicas das condições de contorno e os respectivos valores iniciais utilizados nas simulações numéricas.

| Superfície de contorno | Variável utilizada | Valor Simulado |
|------------------------|-------------------------------------|--|
| Entrada | Velocidade prescrita | 0,5; 1,0; 1,5; 2,0 e 2,5 m s ⁻¹ |
| | Intensidade Turbulenta (<i>i</i>) | 1% |
| Saída | Pressão prescrita | 200 kPa (cte) |
| Parede | Superfície lisa e não deslizante | |

Tabela 2: Especificações gerais do fluido e das condições numéricas utilizadas no pré-processamento das simulações.

| Propriedades físicas do fluido | | |
|--|-----------------------------------|----------------------|
| Material | Água a 25° C | |
| Massa específica | 997 kg m ⁻³ | |
| Viscosidade dinâmica | 1,003x10 ⁻³ Pa s | |
| Condições numéricas da simulação | | |
| Critério de convergência | RMS (Root Mean Square) | 1 x 10 ⁻⁴ |
| Número de interação (<i>N_i</i>) | 300 ≤ <i>N_i</i> ≤ 3000 | |
| Balanco de massa | ±5% | |

Na modelagem matemática foi estabelecido o emprego das equações de transporte, conservação de massa e de quantidade de movimento, considerando o fluido como sendo água

limpa. Dessa forma, optou-se por uma abordagem monofásica para o cálculo de escoamento em regime estacionário de água no interior do filtro, considerando um fluido newtoniano incompressível. Justifica o uso do regime estacionário por considerar que as interferências que poderiam modificar o padrão de escoamento do fluido são insignificantes para esse tipo de análise.

Como o regime de escoamento no interior de filtros de areia é turbulento, utilizou-se nessa pesquisa o modelo físico denominado $k-\varepsilon$, do tipo RANS (*Reynolds Averaged Navier-Stokes*), amplamente empregado em estudos de engenharia em geral, pela simplicidade (sendo necessária a definição das condições iniciais e de contorno), robustez e características de captar fenômenos em camadas de escoamento mais distantes da parede (VERSTEEG & MALALASEKERA, 1995).

A implementação do modelo $k-\varepsilon$ e a condição de superfície não deslizante provocam efeitos no escoamento do fluido, devido às forças viscosas e a formação de uma camada limite turbulenta, que segundo Kim (1989), causa flutuações das propriedades físicas do fluido (pressão e velocidade), além de contribuir para a anisotropia do campo de turbulência nessa região. Silva Jr. (2011) afirma que essa camada limite é tão estreita que seria necessário um número elevado de volumes de controle para obter uma resolução na região.

Segundo Ferziger & Peric (2002) esse problema pode ser evitado utilizando funções de paredes, as quais definem a existência de uma região logarítmica no perfil de velocidade. Uma função de parede é uma correlação empírica usada em escoamentos sem descolamentos, que permite avaliar a tensão cisalhante e a velocidade na primeira célula de cálculo junto a uma parede. Silva Jr. (2011) destaca que a camada limite turbulenta pode ser dividida em duas regiões, uma interna, que foca nas funções de parede e subdividida em subcamadas viscosa e logarítmica, e outra externa composta pela camada *defect*, onde os termos inerciais dominam o escoamento.

Baseado em Schlichting & Gersten (1999) e Warsi, (1993), a solução e o entendimento do comportamento da velocidade do fluido dentro da camada limite estão associados ao número adimensional (y^+), também denominado distância de parede, que atende aos limites da camada viscosa, e descreve uma distância adimensional medida a partir da parede, sendo definido pelas Equações 8 e 9.

$$\mathbf{u}^+ = \frac{\overline{u_p}}{u_\tau} \quad (8)$$

$$y^+ = \frac{u_t \Delta y}{\nu} \quad (9)$$

Onde u^+ velocidade ($L T^{-1}$), $\overline{u_p}$ é a velocidade média ($L T^{-1}$) paralela à parede na distância Δy (L), u_t é a velocidade de atrito ($L T^{-1}$), definida pela Equação 10, τ tensão de cisalhamento ($F L^{-2}$) e ν é a viscosidade cinemática ($L^2 T^{-1}$).

$$u_t = \sqrt{\frac{\tau_\omega}{\rho}} \quad (10)$$

Onde τ_ω é a tensão de cisalhamento ($F L^{-2}$) na parede e ρ é a massa específica do fluido ($M L^{-3}$).

Considerando a condição de não deslizamento da parede e utilizando as variáveis definidas nas equações 8, 9 e 10 e as aplicando na lei da viscosidade de Newton obtém-se a equação 11, denominada lei da parede na subcamada viscosa.

$$u^+ = y^+ \quad (11)$$

Ferziger & Peric, (2002) consideram que na subcamada viscosa o escoamento está em equilíbrio local, com a produção e dissipação de turbulência aproximando-se a zero. Dessa forma, considera-se que os valores simulados apresentam concordância significativa aos experimentais para um y^+ com valor adimensional aproximado de até 5. Contudo, fora da subcamada viscosa existe uma região onde os efeitos viscosos e turbulentos são significativos, denominada de subcamada logarítmica (Equação 12), onde a tensão de cisalhamento varia lentamente com a distância da parede.

$$u^+ = \frac{\overline{u_p}}{u_\tau} = \frac{1}{k} \ln(y^+) + C \quad (12)$$

Onde k é a constante de Von Kármán (von Kármán, Theodore; 1881 – 1963) e C é a constante dependente da rugosidade da superfície.

Coles & Hirst (1968) sugerem valores de $k \approx 0,41$ e $C \approx 5,0$. Aplicando-se essas constantes uma aproximação é obtida para a região onde $y^+ > 30$. Silva Jr. (2011) salienta que a solução da equação 12 torna-se um problema complexo quando os valores de velocidade se aproximam de zero. Nesses casos, o autor sugere uma escala alternativa de velocidade, definida pela Equação 13.

$$\mathbf{u}^* = C_{\mu}^{1/4} k^{1/2} \quad (13)$$

Com

$$\mathbf{y}^* = \frac{\mathbf{u}^* \Delta y}{\nu} \quad (14)$$

Dessa forma, a tensão de cisalhamento na parede pode ser obtida pela Equação 15.

$$\boldsymbol{\tau}_{\omega} = \rho \mathbf{u}_{\tau} \mathbf{u}^* \quad (15)$$

Entre as duas regiões (viscosa e logarítmica) existem uma camada, geralmente definida entre $5 < y^+ < 30$, considerada uma região de transição de efeitos. O *software* ANSYS CFX limita o valor de y^+ , conforme a Equação 16, buscando garantir que todos os pontos nodais da malha numérica estejam localizados fora da subcamada viscosa, possibilitando, assim, a aplicação da lei logarítmica.

$$\tilde{\mathbf{y}}^* = \mathbf{max}(\mathbf{y}^*, \mathbf{11}, \mathbf{06}) \quad (16)$$

Onde o valor 11,06 representa o ponto de transição entre a subcamada viscosa e a camada logarítmica (interseção entre a zona linear e logarítmica). Wilcox (2006) sugere para escoamentos turbulentos o limite de $y^+ < 300$ como o indicado para obter resultados aceitáveis em função do perfil de camada de parede implementado. Salienta-se que nos ensaios dessa pesquisa os valores médios encontrados nas simulações foram, aproximadamente, de 260. Dentro do limite sugerido por Wilcox (2006).

Nas simulações matemáticas foram consideradas condições isotérmicas a 25 °C, sendo os valores usados na prescrição de velocidades os mesmos utilizados nos ensaios experimentais, com o valor da pressão na saída do volume fixado uniforme e constante para todos os valores de velocidade de entrada.

Para a obtenção dos resultados da solução numérica propriamente dita, foi utilizado um cluster computacional, onde cada simulação foi calculada utilizando processamento em paralelo, em oito núcleos de processadores Xeon com 3 GHz, necessitando, assim, um tempo computacional aproximado de 48 horas para cada simulação ser finalizada.

c) Pós-Processamento

A ferramenta computacional fornece diferentes representações de resultados, como gráficos das variáveis envolvidas, grandezas escalares ou vetoriais, geração de linhas de fluxo,

formação de mapas de superfícies e geração de arquivos numéricos dessas informações para análises posteriores.

A realização da etapa de pós-processamento permitiu interpretar os resultados das simulações na caracterização do escoamento em filtros de areia para as condições de ensaio, possibilitando analisar as linhas de fluxo formadas durante os processos de filtragem e retrolavagem, identificar os padrões de funcionamento de cada elemento e validar o uso do CFD. Para isso, foram criados dois planos de análise, um no eixo xy, localizado no centro do equipamento, e outro zx, localizado na altura acima da referência da superfície da camada filtrante, que possibilitaram a construção dos mapas do perfil de velocidade resultantes do escoamento do fluido. Também foram plotados gráficos de dispersão com os valores quantitativos de velocidade para duas alturas (L1 e L2) localizadas a 10 e 20 cm a partir da base da placa difusora.

3.1.3 Análise de sensibilidade da modelagem numérica

A análise de sensibilidade (validação) dos valores de perda de pressão simulados e experimentais foi realizada de três formas: 1) comparando os valores médios dessas variáveis por meio dos intervalos de confiança e coeficientes de determinação (R²) dos respectivos ajustes matemáticos, 2) estatisticamente utilizando o módulo de análise de variância (ANOVA) do pacote estatístico SAS (SAS Institute, Cary, NC, EUA), procedendo ao teste de comparação pareada Tukey, para P <0,05 e, 3) estimando a percentagem da diferença (%*dif*) entre os valores medidos experimentalmente e simulados, segundo a proposta de Wilson et al. (2006), de acordo com a Equação 17.

$$\%dif = \left(\frac{MaxHf - MinHf}{MaxHf} \right) * 100\% \quad (17)$$

Onde *MaxHf* é o maior valor absoluto de perda de pressão e *MinHf* o menor valor, para uma mesma condição de ensaio, sendo utilizado nesse trabalho a velocidade como variável de controle.

3.2 Estudo do comportamento hidrodinâmico em placas difusoras e drenos comerciais

Buscando identificar as principais interações do modelo estrutural dos acessórios de filtro de areia (placa difusora e dreno), durante o escoamento da água no interior desses equipamentos nos sentidos ascendente (retrolavagem) e descendente (filtragem), e fundamentar o desenvolvimento de novos modelos otimizados hidraulicamente, foram realizados estudos de caracterização da hidrodinâmica de diferentes acessórios comerciais, geometria e dimensões, aplicando a fluidodinâmica computacional para simular esses processos e abordando e/ou identificando dos seguintes fatores:

- Interferência da placa difusora na redução da velocidade de escoamento sobre o leito poroso;
- Influência da placa difusora na uniformidade e no perfil de distribuição das linhas de fluxo, sobre a região próxima a camada superficial do leito filtrante;
- Formação de vórtices próximos à região superficial da camada filtrante;
- Influência do dreno na uniformidade e no perfil de distribuição das linhas de fluxo, sobre o leito filtrante durante o escoamento no sentido coincidente ao processo de retrolavagem;
- Formação de pontos de estagnação, sem efetividade hidráulica durante o escoamento do fluido, na superfície do dreno durante ambos os escoamentos, descendente e ascendente;
- Processo de perda de pressão causado por essas estruturas.

Após a realização das simulações para as placas difusoras, viu-se a necessidade de caracterizar e/ou confirmar os efeitos da geometria da placa difusora na formação das linhas de fluxo. Dessa forma, foi proposta uma avaliação experimental em laboratório de caracterização de deformação superficial do leito filtrante durante o escoamento descendente. Assim, os resultados dos perfis de velocidade gerados pelos diferentes modelos de placa difusora obtidas nas simulações por CFD foram confrontadas com os perfis de deformação da superfície do leito filtrante por imagens escaneadas após ensaios laboratoriais.

3.2.1 Simulações computacionais

As simulações computacionais para a análise do desempenho dos acessórios foram realizadas individualmente, ou seja, simularam-se os modelos de placa difusora sem a presença

de drenos e vice versa, visando isolar o efeito de cada elemento no processo hidráulico de escoamento.

Para a análise dos modelos de placas difusoras, as simulações foram realizadas para o domínio do módulo experimental, configurado sem e com leito filtrante. A presença da camada filtrante foi considerada nessa etapa dos estudos para permitir a identificação de mudanças do padrão de escoamento gerado pela placa difusora com a resistência adicional do leito poroso. Dessa forma, simulou-se inicialmente o módulo experimental vazio (sem o acessório). Na sequência foi simulado a hidrodinâmica para os modelos utilizados para validar a modelagem matemática, identificados na Figura 12, e, também, o modelo comercial, caracterizado na Figura 16.

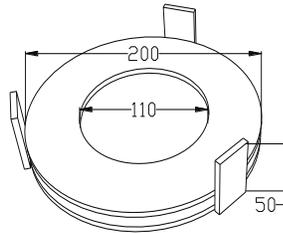


Figura 16: Desenho estrutural do modelo de placa difusora usado nas simulações, placa difusora plana com anel superior. (Dimensões em mm).

Nessa etapa da pesquisa, a modelagem geral das simulações, seleção dos modelos matemáticos e tomadas de decisões referentes ao pré-processamento (condições de contorno, valores inicial das variáveis de entrada e saída, critérios de convergências, entre outras), seguiram os procedimentos descritos no item 3.1.2 e Tabelas 1 e 2, para a condição sem leito filtrante. Contudo, para os ensaios com leito filtrante foi acrescido às equações padrões de Navier-Stokes um termo (S_i) que considera o efeito do leito como uma camada porosa ao escoamento. O modelo matemático selecionado no ANSYS-CFX foi do tipo de perda dinâmica (*momentum loss*) classificado como isotrópico e denominado no solver por “*Superficial Velocity Formulation*”. Este equacionamento considera um termo de perda causada pela viscosidade e outro pela inércia (ANSYS-CFX, 2009).

$$S_i = \left(\frac{\mu}{K_{Perm}} v_i + K_{Loss} \frac{1}{2} \rho |v| v_i \right) \text{ Para } i = x, y, z \quad (18)$$

$$K_{Perm} = \frac{d_{10}^2}{150} \frac{\varepsilon_i^3}{(1-\varepsilon_i)^2} \quad (19)$$

$$K_{Loss} = \frac{3,5 (1-\varepsilon_l)}{d_{10} \varepsilon_l^3} \quad (20)$$

Onde K_{Perm} e K_{Loss} são coeficientes de perdas por permeabilidade e resistência inercial, respectivamente, d_{10} diâmetro efetivo do poro (L), ε_l porosidade do meio.

Arbat et al. (2011) simulando filtros de areia e usando o código fonte do FLUENT, comprovaram a significância desse modelo matemático em representar o comportamento hidráulico da água durante o escoamento em meio poroso. Cárdenas (2012) avaliando processos comerciais de hidro tratamento, também utilizou essa modelagem para simular camadas porosas. Fan et al. (2009) afirmam que esse modelo pode ser usado para modelar fluxo em camadas porosas e filtros de papel com escoamento mono ou multifásico.

Considerou-se nas simulações para os ensaios da placa difusora, o módulo experimental configurado com uma camada porosa a 60 cm de altura, modelada para uma porosidade (ε_l) de 0,43 ou 43% e diâmetro efetivo do poro (d_{10}) de 0,51mm, e velocidade no sentido descendente de 0,5; 1,0; 1,5; 2,0 e 2,5 m s⁻¹. Salienta-se que essas características foram selecionadas por serem as que apresentariam maior resistência ao escoamento do fluido, isto é, condição mais crítica ao fluxo de água.

Para analisar os resultados do escoamento característico gerado pelas placas difusoras foram construídos mapas do perfil de velocidade do escoamento nos eixos xy, e zx, que destacam os campos de vetores de velocidade em y, plotados para caracterizar as linhas de correntes e a trajetória do escoamento do afluente. Adicionalmente, construiu-se também um corte no eixo zx a uma altura acima da referência da superfície da camada filtrante, com o intuito de identificar a magnitude dos vetores de velocidade sobre essa superfície. Também, foram plotados gráficos de dispersão com os valores de velocidade em duas posições L_1 e L_2 , identificadas nos mapas, correspondentes às distâncias de 10 e 20 cm, delimitadas abaixo da base das placas difusoras para os ensaios com leito poroso. Essas distâncias foram selecionadas para permitir a análise dos efeitos do escoamento na região delimitada como mínima para a expansão do leito durante sua fluidização, isto é, respeitando os 25% destinado ao equipamento para realização do processo de retrolavagem.

Destaca-se que, para as simulações dos drenos, a geometria do módulo experimental foi modificada, como mostra a Figura 17, considerando o leito filtrante de 20 cm de altura, por considerar ser uma espessura suficiente para apresentar os efeitos causados pelo dreno ao

escoamento. Essas modificações foram necessárias, pois, quando discretizado o conjunto dreno e módulo experimental, resultou em um número de elementos superior a 10 milhões, considerado elevado e injustificado para essas simulações. Esse número elevado de elementos ocorreu devido às diferenças de dimensões entre os orifícios de passagem do fluido (0,3mm) com o restante do módulo (altura de 1m).

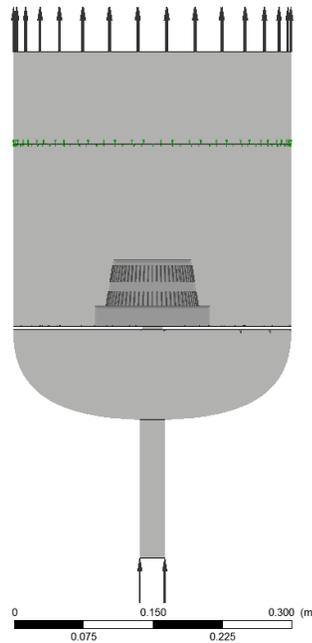


Figura 17: Módulo virtual criado para simulação de drenos (crepinas).

A Figura 18 apresenta o detalhe dos volumes de controle resultante para o módulo virtual de simulação dos drenos. Observa-se que há um maior refinamento dos elementos no dreno em função das características e dimensões reduzidas dos slots de passagem de água. Essa configuração de malha resultou em um número de aproximadamente $1,5 \times 10^6$ elementos.

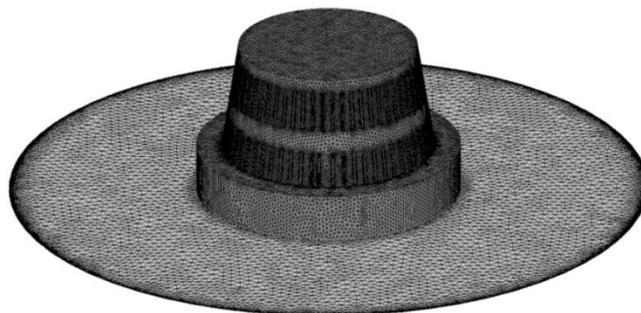


Figura 18: Detalhe dos volumes de controle na região virtual próxima ao dreno.

A fundamentação do escoamento nos drenos baseou-se na caracterização do fluxo apresentado pelo modelo descrito na Figura 12 (formato cônico), e pelos modelos apresentados na Figura 19, ou seja, drenos com formatos cilíndricos e fundo falso ranhurado, respectivamente.

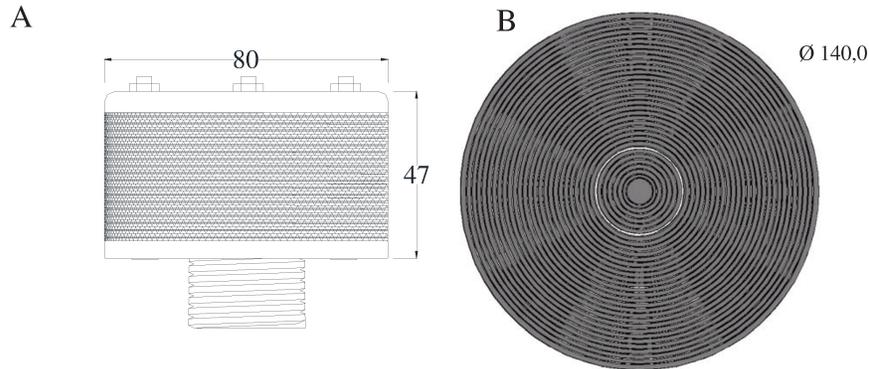


Figura 19: Modelos de drenos usados na fundamentação do desenvolvimento. ^[A] dreno cilíndrico, ^[B] fundo falso perfurado. (Dimensões em mm).

As simulações dos drenos foram realizadas para o escoamento no sentido ascendente, coincidentes ao processo de retrolavagem, com velocidades a 0,5; 1,0; 1,5; 2,0 e 2,5 m s^{-1} , e descendente, coincidentes ao processo de filtragem, para os valores de 0,05; 0,1; 0,15; 0,2 e 0,25 m s^{-1} . A simplificação para as velocidades no sentido descendente foi adotada por considerar que o fluido escoava no interior do equipamento com uma velocidade menor que nas tubulações em função dos seus diâmetros, baseando no princípio da conservação de massa, determinou-se esses novos valores. Os valores das demais variáveis respeitaram as condições detalhadas durante o processo de validação da ferramenta computacional (no tópico 3.1.2 e Tabela 1 e 2), exceto para pressão de saída que se fixou, neste caso, o valor de 50 kPa.

Para a análise dos resultados das simulações de caracterização do escoamento nos drenos foram plotados mapas de velocidade num corte xy do módulo virtual, destacando a região próxima ao acessório, possibilitando observar os campos de vetores nessa região.

3.2.2 Caracterização da deformação da superfície do leito filtrante

Para identificar os efeitos da geometria da placa difusora na formação das linhas de fluxo e no fenômeno de deformação da superfície do leito filtrante durante o escoamento descendente, foram construídas réplicas dos modelos comerciais desses acessórios e submetidas a ensaios laboratoriais no módulo experimental.

A partir dos resultados experimentais da deformação da superfície filtrante é possível inferir se houve a formação dos vórtices mostrados pelas simulações matemáticas. Destaca-se que esse fenômeno é dos responsáveis pela movimentação de areia e, conseqüentemente, da deformação superficial, sinalizando também o tipo de perfil de distribuição das linhas de fluxo do fluido sobre a camada superficial do leito filtrante. Os ensaios foram realizados no módulo experimental identificado e caracterizado no item 3.1.1, e configurados para três velocidades de escoamento de água 0,5; 1,5 e 2,5 m s⁻¹, para um intervalo granulométrico de areia (0,5 a 1,0 mm) e duas espessuras de camada porosa, 45 e 35 cm. Essas espessuras foram selecionadas para possibilitar, respectivamente, os espaçamentos 10 e 20 cm de distância da base da placa difusora.

Para cada condição de ensaio, o módulo era colocado em operação por 15 minutos, quando, após esse tempo, era aberto para o registro do perfil da superfície da areia, por meio de um escâner portátil marca HANDYSCAN 3D, modelo EXAscan, com resolução de 0,05 mm e precisão de até 0,04 mm (Figura 20). Foram realizadas três repetições dessa avaliação para cada uma das interações das variáveis de controle.



Figura 20: Fotografia do escâner empregado na caracterização da deformação da superfície do leito filtrante.

A metodologia de escaneamento da superfície da camada filtrante consistiu na captura da imagem da superfície após o seu mapeamento por tags refletoras (Figura 21), elementos responsáveis pelo georreferenciamento do scanner para o objeto. Uma vez capturadas, as imagens eram tratadas utilizando o software Rapidform XOR 3 64.



Figura 21: Mapeamento esquemático do georreferenciamento da superfície do leito filtrante por tags refletoras. (Foto: Marcio Mesquita)

Após o processo de tratamento das imagens foram traçadas quatro diagonais AB, CD, EF e GH, ligando os pontos situado em 0° a 180° ; 45° a 225° , 90° a 270° e 135° a 315° , na secção circular da superfície do leito filtrante (Figura 22). Essas diagonais foram criadas para orientar a coleta de dados diferenciando a distância (cotas) entre os picos e/ou depressões, encontrados nas superfícies, com relação a um plano horizontal, definido a partir de um ponto de origem gerado pelo software durante a plotagem da superfície, possibilitando identificar as movimentações causadas pelas linhas de fluxo e vórtices gerados pelo modelo de placa difusora ensaiada. Essas cotas foram localizadas nas extremidades, no centro e na mediana de cada raio da diagonal em questão. Os resultados foram plotados em tabelas que apresentam uma amostra gráfica da superfície deformada e os respectivos valores médios das cotas.

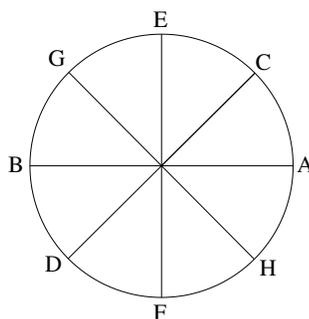


Figura 22: Esquema mostrando o posicionamento das diagonais na secção circular da área superficial da camada porosa utilizadas na coleta das cotas da superfície do leito filtrante.

3.3 Projeto e dimensionamento de novos acessórios

A validação da hipótese da pesquisa, além de exigir a obtenção de informações sobre o comportamento hidráulico de acessórios utilizados em filtros comerciais, também estabelece a necessidade de se analisar e propor novos modelos de acessórios. Dessa forma, buscou-se definir protótipos diferenciados, como por exemplo; uma placa difusora que provocasse maior dissipação de energia cinética e que reduzisse a formação de vórtices e determinasse uma distribuição homogênea das linhas de fluxo sobre a superfície da camada porosa. Para o dreno, buscava-se um acessório que apresentasse maior área efetiva de atuação, sem pontos de estagnação ao escoamento, e que distribuísse uniformemente e homogeneamente as linhas de fluxo durante a fluidização do leito filtrante.

Os resultados do estudo do comportamento hidrodinâmico de placas difusoras e drenos comerciais, foi fundamental para identificar características críticas e/ou em potencial ao escoamento da água no interior dos filtros de areia permitindo evoluir para novas proposições de

acessórios. Essas proposições basearam-se na aplicação da fluidodinâmica computacional para simular o processo de escoamento de água em diferentes modelos sugeridos virtualmente e, na sequência, a partir dos resultados hidrodinâmicos desses modelos, aperfeiçoar a proposta para outros modelos que eram analisados. No final desse processo foram selecionados protótipos de placa difusora e de dreno e, posteriormente, submetidos à avaliação experimental em laboratório.

Para avaliar experimentalmente os modelos que apresentaram melhores resultados hidráulicos, foram usinados em aço doce 1020, um protótipo da placa difusora e outro do dreno, buscando comprovar sua efetividade como indicada pelas simulações. Para testar a eficiência hidrodinâmica da placa difusora proposta utilizou-se o ensaio de identificação da deformação da superfície do leito filtrante, que seguiu os procedimentos descritos no item 3.2.2.

O desempenho do dreno projetado foi avaliado por ensaios que identificavam o momento de ocorrência dos regimes de fluidização do leito filtrante e o seu perfil de fluidização (característica da uniformidade da expansão). Esses ensaios buscavam analisar o potencial do dreno (sistema de drenagem) em expandir um leito poroso quando submetido o fluxo no sentido ascendente, o que está diretamente relacionado à uniformidade de distribuição das linhas de fluxo do escoamento.

Os experimentos com os drenos seguiram os procedimentos sugeridos por Salcedo (2010) que utilizou registros fotográficos para gravar as mudanças de regime de fluidização e as elevações nas camadas porosas com o acréscimo da velocidade. Os ensaios basearam-se no acréscimo da velocidade de entrada e na identificação visual do comportamento do leito poroso. A cada mudança de regime foi identificada a velocidade de sua ocorrência e relacionada em tabelas descritivas. Salienta-se que foram utilizados nesses ensaios três intervalos granulométricos de areia (0,5 a 1,0 mm; 0,8 a 1,2 mm e 1,0 a 1,5 mm) denominadas G1, G2 e G3, duas alturas de leito (35 e 45 cm) e três repetições. Salienta-se que foi considerado leito fluidizado quando esse atingia 25% de expansão a partir da altura inicial do leito filtrante. Foram determinados os valores de velocidade superficial no interior do módulo experimental, pelo monitoramento da vazão/velocidade na tubulação de entrada de fluido, e, utilizando os conceitos da equação da continuidade, calcularam-se os valores correspondentes no interior do equipamento, correlacionando aos valores respectivos de perda de pressão do módulo. Salienta-se que, para a realização desses ensaios foi proposto um dimensionamento do arranjo espacial do

sistema de drenagem baseado pelo princípio indicado pela metodologia de polígonos de Thiessen (TUCCI, 2009).

3.4 Projeto e avaliação hidráulica de um protótipo de filtro de areia

Baseado nos resultados encontrados nas simulações e nos ensaios laboratoriais individuais da placa difusora e do dreno, dimensionados no item 3.3, foi proposto um protótipo de filtro de areia com dimensões reais de um equipamento comercial e com as configurações dos componentes internos testados hidraulicamente. O protótipo foi construído em aço doce 1020, atendendo as normas de projeto de vasos de pressão (ASME - Boiler and Pressure Vessel Committee, 2007).

Para a obtenção de informações técnicas de sua operação e caracterização hidráulica, o protótipo em escala real foi submetido a ensaios laboratoriais realizados no módulo de ensaio de filtros de areia disponível no Laboratório de Hidráulica e Irrigação da Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas, descrito no item 3.1.1.

Promoveu-se inicialmente a caracterização da perda de pressão do protótipo para a condição sem material filtrante, ou seja, na ausência da areia no seu interior, com fluxo coincidente ao sentido do processo de filtração (descendente) e de retrolavagem (ascendente). Para ambas as condições procederam-se três repetições, aplicando-se cinco valores de velocidade (0,5; 1,0; 1,5; 2,0 e 2,5 m s⁻¹) em ordem ascendente, descendente e aleatória, medidas na tubulação de entrada do equipamento. Cada leitura tinha duração de três minutos, com o registro de um valor de diferencial de pressão e de vazão por segundo.

Adicionalmente, ensaiou-se o protótipo com a presença do material filtrante para se avaliar a interação das estruturas internas desenvolvidas (placa difusora e dreno) e do arranjo do sistema de drenagem, com o efeito da granulometria e de diferentes alturas da camada filtrante com sentidos de escoamentos coincidentes aos processos de filtração e de retrolavagem. Dessa forma, determinou-se a perda de pressão do protótipo para as mesmas cinco variações de velocidade já indicado nos ensaios sem camada filtrante, para duas alturas de leito filtrante, definidas por relações percentuais considerando a base do difusor até a base dos drenos (fundo falso), de 50 e 75%, respectivamente, 30 e 45 cm, e denominadas H1 e H2. Essas alturas do leito filtrante foram adotadas segundo os critérios de ensaios propostos por Mesquita (2010) e Salcedo (2011).

Os ensaios foram realizados para as três intervalos granulométricos de areia 0,5 a 1,0 mm; 0,8 a 1,2 mm e 1,0 a 1,5 mm, denominadas respectivamente, G1, G2 e G3, cujas propriedades estão descritas na Tabela 3 e caracterizados por Mesquita (2010). Procederam-se três repetições para cada granulometria, com coletas com duração de três minutos, aplicando valores de velocidade na ordem ascendente, descendente e aleatória.

Tabela 3: Propriedades físicas das areias utilizados nos ensaios experimentais.

| Características | Granulometrias utilizadas (mm) | | |
|---------------------------------------|--------------------------------|------|------|
| | G1 | G2 | G3 |
| Coefficiente de uniformidade (CU) | 1,51 | 1,27 | 1,34 |
| Diâmetro efetivo (d_{10}) | 0,5 | 0,85 | 1,15 |
| Diâmetro equivalente (D_{eq}) | 0,90 | 1,10 | 1,60 |
| Porosidade (ϵ_l) | 43 | 42 | 41 |
| Esfericidade (ψ) | 0,82 | 0,82 | 0,82 |
| Massa específica ($\rho_s(g*cm^3)$) | 2,67 | 2,67 | 2,67 |

Fonte: MESQUITA (2010)

Os ensaios foram realizados com água proveniente do sistema de abastecimento urbano do Município de Campinas, e apresentava uma concentração média de sólidos suspensos totais de 0,142 mg L⁻¹. Salienta-se que esse padrão de água atende a condição para realização de ensaios com o fluido sem impurezas, para não interferir nos resultados experimentais laboratoriais de perda de pressão, e também possibilitar a comparação com os resultados mostrados por Mesquita et al. (2012).

A sequência de ensaio era constituída de um funcionamento inicial para estabilização do sistema, com duração aproximada de 15 min, quando se iniciava a aquisição dos dados de vazão e pressão durante três minutos para cada condição de ensaio. Dessa forma, o sistema de aquisição registrava um valor de pressão e vazão por segundo, totalizando 180 valores para o intervalo de medida. A partir dos valores registrados de pressão na entrada e na saída, determinou-se o diferencial de pressão e, conseqüentemente, os valores médios de perda de pressão para cada condição de ensaio, procedendo-se a construção da curva característica de cada filtro.

A partir dos valores médios registrados em ambos os ensaios, vazio e com leito filtrante, determinou-se a perda de pressão característica do protótipo para uma determinada velocidade de escoamento e construíram-se as respectivas curvas características do equipamento. Para representar o comportamento hidráulico encontrado nos ensaios os valores de perda de pressão foram ajustados a uma equação exponencial em função da velocidade de escoamento para o filtro vazio. O ajuste exponencial foi baseado nos trabalhos apresentados por Burt (2010), Mesquita et

al. (2012) e Ponciano de Deus et al. (2013) e que encontraram correlações significativas em representar o fenômeno de perda de pressão em filtros de areia com esse modelo matemático.

Adicionalmente, os valores de perda de pressão e velocidade de escoamento foram linearizados para construção de gráficos de intervalos de confiança a 95% de significância, com o intuito de comparar os valores e avaliar os efeitos do processo de escoamento (ascendente e descendente), da altura do leito filtrante. Os resultados obtidos permitiram comparar os resultados com os filtros comerciais ensaiados por Mesquita et al. (2012).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos na pesquisa, separados nas seções propostas na Metodologia. Na primeira, analisou-se a acurácia dos modelos matemáticos selecionados para simular numericamente o escoamento de água no interior de filtros de areia, avaliando a predição dos valores de perda de pressão no módulo experimental encontrados nas simulações por CFD, com os dados experimentais desenvolvidos em laboratório. Na segunda seção são evidenciadas as principais interações do modelo estrutural de placas difusoras e drenos comerciais na hidrodinâmica do escoamento em filtros de areia, fundamentando o desenvolvimento de novos modelos de acessórios. Na terceira seção são apresentados os resultados da proposta do dimensionamento da placa difusora e do dreno e as características dos perfis de escoamento por eles gerados. Finalmente, na quarta seção são expostos os projetos do protótipo de filtro de areia, placa difusora e dreno, e também, os resultados do comportamento hidráulico do equipamento testado em laboratório.

4.1 Validação da fluidodinâmica computacional em análises hidráulicas para filtros de areia

A partir dos dados experimentais obtidos em laboratório (Tabelas 27, 28 e 29, **Anexo 8.1**) foram estimados os valores médios de perda de pressão nos ensaios experimentais, e esses valores foram comparados com os valores obtidos nas simulações por CFD (Tabela 26, **Anexo 8.1**), para as diferentes configurações do módulo experimental, visando a análise da acurácia dos modelos matemáticos selecionados para simular o escoamento de água em filtros de areia.

As Figuras 23, 24 e 25, apresentam a relação perda de pressão experimental ($H_{f_{Exp.}}$) e simulada ($H_{f_{Sim.}}$), seus respectivos ajustes, coeficientes de determinação (R^2) e a projeção do intervalo confiança a 95% significância, para as condições de módulo sem placa difusora e sem dreno; sem drenos e com placa difusora, e com dreno e com placa difusora, respectivamente. O **Anexo 8.2** são apresentadas as Tabelas 30, 31, 32, 33 e 34, respectivas as análises de variâncias dos ajustes encontrados nestas comparações.

Os resultados apresentados nessas figuras mostram que houve correlação significativa entre a modelagem numérica, implementada pelas equações governantes, modelos de turbulência e de escoamento no meio poroso, com os dados experimentais. A acurácia desses modelos na

predição da perda de pressão em filtros de areia foi comprovada pelo valor obtido com o coeficiente de determinação para todas as condições avaliadas ($R^2 \geq 0,99$). Porém, observa-se que a simulação apresenta uma tendência não significativa de superestimar os valores de perda de pressão, como pode ser comprovado pela aplicação das equações resultantes do ajuste, e verificáveis pela análise dos pontos entre os intervalos de confiança.

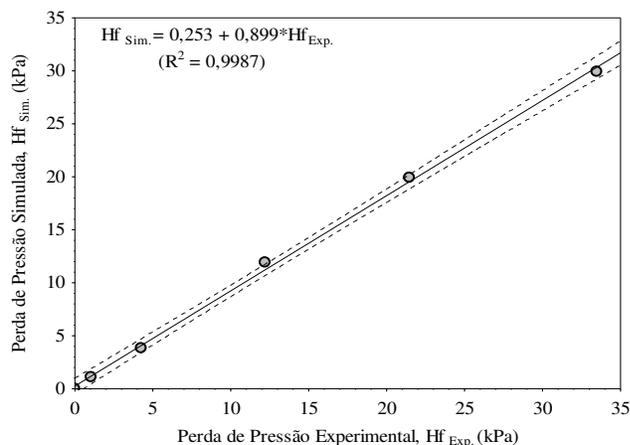


Figura 23: Comparação entre a perda de pressão simulada e experimental do módulo experimental configurado para a condição sem placa difusora e sem dreno.

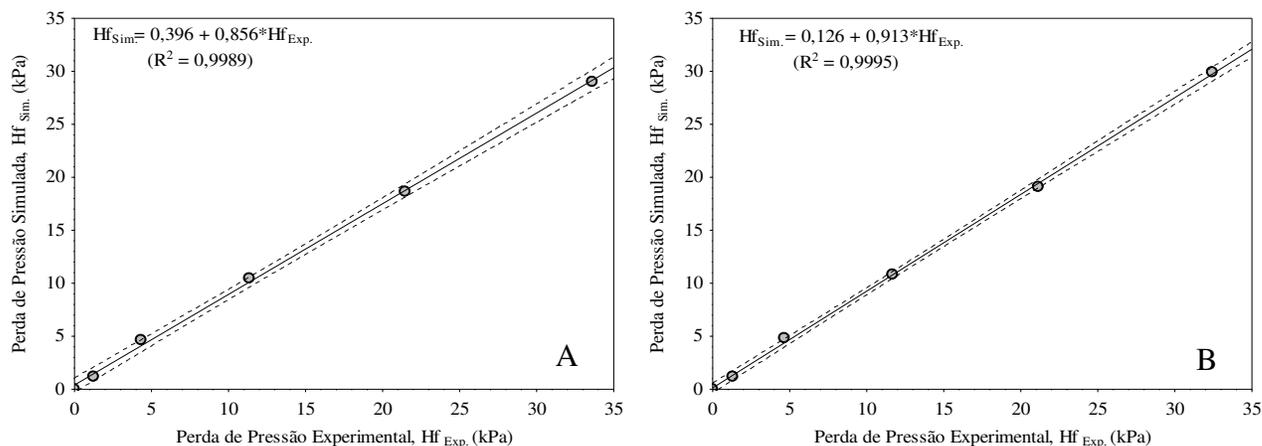


Figura 24: Comparação entre a perda de pressão simulada e experimental do módulo experimental configurado na condição sem dreno e com ^[A] placa difusora plana, e ^[B] plana com borda.

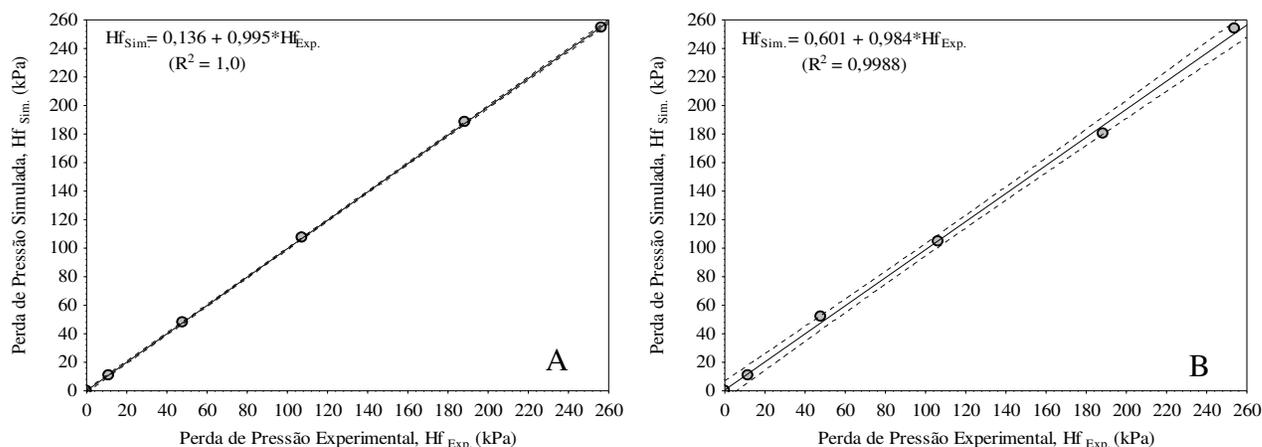


Figura 25: Comparação entre a perda de pressão simulada e experimental para módulo experimental configurado na condição com dreno e com placa difusora ^[A] plana, e ^[B] plana com borda.

Buscando ratificar esses resultados, confeccionou-se as Tabelas 4, 5 e 6, onde apresenta a *%Dif* (porcentagem de diferença entre os valores experimentais e simulados), a comparação estatística de médias o efeito da velocidade na perda de pressão para as condições experimental e simulada e a interação entre velocidade e tipo de teste para os valores de perda de pressão obtidos na simulação em comparação com o experimental, para as três condições de configuração do módulo experimental.

Tabela 4: Análise estatística comparando as médias de perda de pressão (kPa) para módulo experimental configurado na condição sem placa difusora e sem dreno, e as respectivas porcentagens da diferença (*%Dif*).

| | Velocidade (m s ⁻¹) | Experimental (kPa) | Simulado (kPa) | <i>%Dif</i> |
|---------|---------------------------------|--------------------|----------------|-------------|
| | 0,5 | 1,10eA | 1,14eA | 3,51 |
| | 1,0 | 4,27dA | 4,62dA | 7,56 |
| | 1,5 | 12,23cA | 11,38cA | 6,95 |
| | 2,0 | 21,50bA | 19,90bA | 7,44 |
| | 2,5 | 33,50aA | 29,93aB | 10,66 |
| P-Valor | Velocidade | | <0,0001 | |
| | Tipo | | <0,0001 | |
| | Interação | | 0,0003 | |

Nota: Médias representadas por letras iguais minúsculas na coluna ou maiúsculas na linha não diferem entre si pelo teste de comparação de Tukey na probabilidade indicada (p-valor).

Tabela 5: Análise estatística comparando as médias de perda de pressão (kPa) para módulo experimental configurado na condição sem dreno e com placa difusora plana e plana com borda, e as respectivas porcentagens da diferença (%Dif).

| Velocidade (m s ⁻¹) | Placa difusora Plana | | | Placa difusora Plana com Borda | | |
|---------------------------------|----------------------|----------------|-------|--------------------------------|----------------|-------|
| | Experimental (kPa) | Simulado (kPa) | %Dif | Experimental (kPa) | Simulado (kPa) | %Dif |
| 0,5 | 1,24eA | 1,15eA | 7,26 | 1,37eA | 1,19eA | 13,14 |
| 1,0 | 4,32dA | 4,66dA | 7,30 | 4,63dA | 4,81dA | 3,74 |
| 1,5 | 11,35cA | 10,46cA | 7,84 | 11,73cA | 10,81cA | 7,84 |
| 2,0 | 21,44bA | 18,63bB | 13,11 | 21,13bA | 19,12bA | 9,51 |
| 2,5 | 33,60aA | 29,04aB | 13,57 | 32,47aA | 29,90aA | 7,91 |
| P-Valor | Velocidade | <0,0001 | | <0,0001 | | |
| | Tipo | <0,0001 | | 0,0808 | | |
| | Interação | <0,0001 | | 0,5581 | | |

Nota: Médias representadas por letras iguais minúsculas na coluna ou maiúsculas na linha não diferem entre si pelo teste de comparação de Tukey na probabilidade indicada (p-valor).

Tabela 6: Análise estatística comparando as médias de perda de pressão (kPa) para módulo experimental configurado na condição com dreno e com placa difusora plana e plana com borda, e as respectivas porcentagens da diferença (%Dif).

| Velocidade (m s ⁻¹) | Placa difusora Plana | | | Placa difusora com Borda | | |
|---------------------------------|----------------------|----------------|------|--------------------------|----------------|------|
| | Experimental (kPa) | Simulado (kPa) | %Dif | Experimental (kPa) | Simulado (kPa) | %Dif |
| 0,5 | 11,13eA | 10,75eA | 3,41 | 11,43eA | 11,42eA | 0,09 |
| 1,0 | 47,73dA | 47,74dA | 0,02 | 48,07dA | 48,01dA | 0,12 |
| 1,5 | 107,57cA | 107,55cA | 0,02 | 106,53cA | 106,56cA | 0,03 |
| 2,0 | 188,30bA | 188,21bA | 0,05 | 188,27bA | 188,25bA | 0,01 |
| 2,5 | 256,60aA | 254,65aA | 0,76 | 254,00aA | 253,94aA | 0,02 |
| P-Valor | Velocidade | <0,0001 | | <0,0001 | | |
| | Tipo | 0,5853 | | 0,9750 | | |
| | Interação | 0,9462 | | 1,0000 | | |

Nota: Médias representadas por letras iguais minúsculas na coluna ou maiúsculas na linha não diferem entre si pelo teste de comparação de Tukey na probabilidade indicada (p-valor).

Conclui-se, pelos resultados apresentados nas tabelas 4, 5 e 6, que a velocidade afetou significativamente a perda de pressão durante o escoamento coincidente ao processo filtragem para o módulo experimental ($P < 0,0001$), mostrando que a perda de pressão aumentou com o incremento da velocidade. Esses resultados concordam com os encontrados por Burt, (2010), Mesquita et al. (2012), quando avaliaram modelos de filtros de areia comerciais.

Ao se avaliar o efeito do tipo de teste na predição do valor da perda de pressão, a um nível de significância de 99%, nota-se que a simulação por CFD estimou com precisão essa

variável, exceto para os testes do módulo experimental sem acessórios na velocidade de entrada a $2,5 \text{ m s}^{-1}$ e com placa difusora plana nas velocidades de $2,0$ e $2,5 \text{ m s}^{-1}$, onde a simulação subestimou a perda de pressão. Esse efeito pode ser considerado um fato isolado, pois não se observou nas demais configurações experimentais o mesmo fato, contudo, o efeito da turbulência, nessas duas condições de ensaio, pode ter propiciado esse fenômeno, causando uma maior imprecisão na predição da perda de pressão. No entanto, este fato não desqualifica a simulação por CFD como ferramenta para estudos em filtros de areia, pois nos demais ensaios esses efeitos não foram detectados.

Ao se analisar as porcentagens de diferença entre os valores médios de perda de pressão simulado e experimental para as condições de ensaio, observa-se que esses valores se mantiveram abaixo de 10% para todas as combinações ensaiadas, exceto para quatro situações, nas velocidades de $2,0$ e $2,5 \text{ m s}^{-1}$ no ensaio com placa difusora plana, na velocidade de $2,5 \text{ m s}^{-1}$ sem placa difusora e em $0,5 \text{ m s}^{-1}$ para a placa difusora plana com bordas. Esses resultados corroboram com os encontrados com Arbat et al. (2011), que ao determinar a perda de pressão de filtros de areia utilizando o solver FLUENT, encontrando valores de *%Dif* de 8 e 9%, Franco et al. (2011) consideraram como valor aceitável *%Dif*, entre experimental e simulado, de até 10%, diferentemente de Wilson et al. (2006), que mostraram *%Dif* médio admissível de 14%. Os resultados encontrados nessa pesquisa mostraram valores de *%Dif* dentro dos limites aceitáveis e comprovam a utilização do método de validação da simulação numérica.

Dessa forma, os resultados das análises realizadas mostraram que a simulação numérica, usando CFD/CFX, reproduziu adequadamente o valor de perda de pressão determinado nesse tipo de equipamento, comprovando que essa ferramenta computacional pode simular com precisão aceitável o escoamento em filtros de areia.

4.2 Estudo do comportamento hidrodinâmico em placas difusoras e drenos comerciais

Após a validação do uso de simulações numéricas via CFD, na modelagem de escoamento de água no interior dos filtros de areia, buscou-se desenvolver critérios de dimensionamento que permitissem propor e avaliar novos modelos de placa difusora e dreno, objetivando alcançar maiores eficiências hidráulicas e homogeneidade na distribuição de linhas de fluxo durante os processos de escoamento no equipamento, ascendente (retrolavagem) e descendente (filtragem).

Assim, essa etapa da pesquisa foi dividida em duas fases: 1) Estudo das características hidrodinâmicas de escoamento sob o domínio da placa difusora com a aplicação da fluidodinâmica computacional na simulação do processo de escoamento de água para o módulo virtual sem placa difusora e configurado com três diferentes modelos comerciais de placa difusora, e, avaliação da interação das linhas de fluxo geradas pela placa difusora com a deformação da superfície do leito filtrante; 2) Estudo sobre as características hidrodinâmicas do escoamento ao redor dos drenos comerciais pelas análises dos resultados da aplicação da fluidodinâmica computacional na simulação do processo de escoamento de água para o módulo virtual com uma camada de leito filtrante.

4.2.1 Estudo do comportamento hidrodinâmico para placas difusoras comerciais

O estudo do comportamento hidrodinâmico para as placas difusoras comerciais foram divididos em quatro ensaios: 1) módulo sem placa difusora e sem dreno (considerada condição zero para o desenvolvimento da placa difusora; 2) módulo com placa difusora plana sem borda; 3) módulo com placa difusora com anel superior sem borda e, 4) módulo com placa difusora plana com bordas. Os resultados dessas quatro condições são apresentados e discutidos a seguir.

Ensaio 1: Referencial sem placa difusora

Com o objetivo de caracterizar a função e o efeito da presença de placa difusora no escoamento interno de filtros de areia, foi inicialmente simulado, o módulo experimental sem este acessório. A Figura 26 apresenta os resultados das simulações para essa condição, caracterizando as linhas de fluxo durante o escoamento descendente para o módulo experimental virtual, configurado com e sem leito filtrante, para as velocidades de ensaio de 0,5; 1,5 e 2,5 m s⁻¹, e na Figura 50, no **Anexo 8.3**, para 1,0 e 2,0 m s⁻¹.

A análise da Figura 26 mostra a distribuição dos vetores de velocidade e, consequentemente, das linhas de corrente resultantes do escoamento do fluido, que se localizaram predominantemente na região central do filtro, sem dissipação significativa de energia cinética no percurso da água da entrada até a superfície do leito filtrante. Essa característica fica evidenciada quando se observa no plano zx maiores intensidades de velocidades na região central do filtro (detalhe identificado pela linha tracejada no ensaio com a velocidade de 2,5 m s⁻¹).

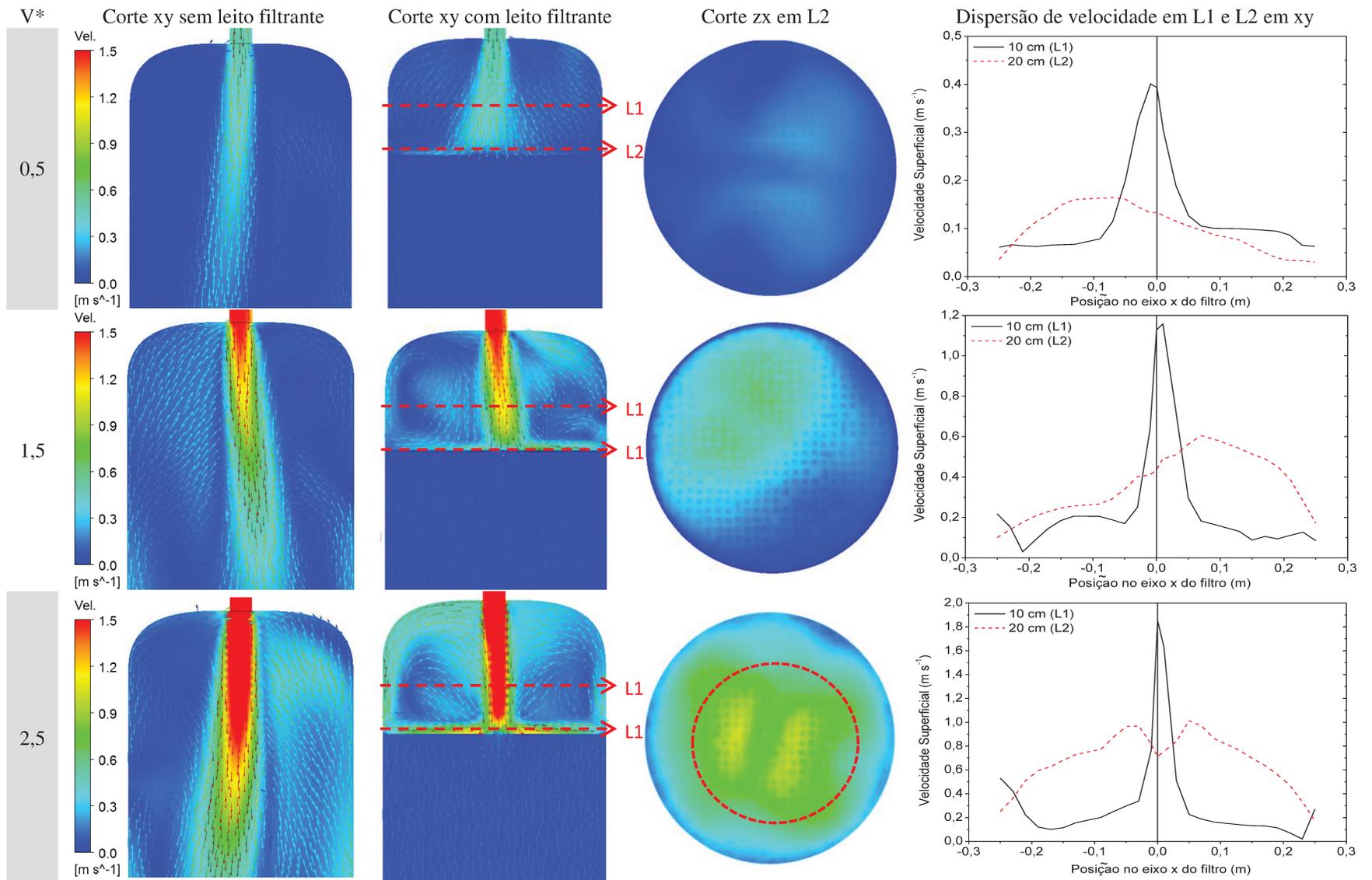


Figura 26: Perfis de velocidade e linhas de fluxo para escoamento característico no módulo experimental sem placa difusora com fluxo de água no sentido descendente. Onde: $[V^*]$ velocidade inicial utilizada na simulação em $m s^{-1}$.

Salienta-se que, na ausência de placa difusora, a camada filtrante funciona como uma superfície dissipadora de energia, distribuindo parte do fluxo de água nas demais regiões do equipamento. No entanto, esse fenômeno causa a movimentação do elemento filtrante (areia) e, conseqüentemente, escavando a região central do leito filtrante. Esses valores intensificados de velocidade de escoamento do fluido, na região central do equipamento, ficam confirmados nos gráficos de dispersão correspondentes a cada ensaio, onde nota-se que há um intervalo de aproximadamente 10 cm de distância no centro da curva, onde o valor da velocidade é aproximadamente 20% menor, em média, que o valor inicial usado nas simulações, por exemplo, para o ensaio a $1,5 \text{ m s}^{-1}$ nessa região resultou num pico de velocidade de $1,2 \text{ m s}^{-1}$.

Esses resultados mostram a principal função da placa difusora no funcionamento de filtros de areia, evidenciando que, sem este acessório, existe um potencial significativo de ocorrer movimentações de areia, do centro para as laterais do filtro, criando depressões ou canais no centro do leito filtrante em razão da interação entre a alta velocidade do fluido, encontrada sobre a superfície, e os grãos de areia.

Ensaio 2: Placa plana sem bordas

Na simulação numérica do filtro com a placa difusora plana (Figura 27 para as velocidades de ensaio de 0,5; 1,5 e $2,5 \text{ m s}^{-1}$, e na Figura 51, no **Anexo 8.3**, para 1,0 e $2,0 \text{ m s}^{-1}$) observa-se que a instalação desse acessório no módulo resultou em uma redução aproximada de 84% do valor da velocidade de escoamento na região central da superfície porosa, para as três velocidades ensaiadas, em relação à condição sem placa difusora.

Por outro lado, o uso desse modelo de placa difusora plana sem bordas determinou uma distribuição heterogênea da velocidade ao longo da superfície filtrante, direcionando as linhas de fluxo para as paredes do equipamento e gerando uma intensificação do módulo da velocidade nessas regiões, evidenciada pela linha tracejada em destaque na Figura 27 para o ensaio com velocidade de $0,5 \text{ m s}^{-1}$. Adicionalmente, esse direcionamento das linhas de correntes proporcionou a formação de vórtices abaixo e nos dois lados da placa difusora e sobre a superfície porosa, como podem ser visualizados pelo perfil dos vetores de velocidade nos mapas em xy e observados nos gráficos de distribuição de velocidade ao longo do eixo x.

Quando se analisa a distribuição, gráficos de dispersão de velocidade na distância L1 é possível notar um comportamento radial característico, com uma região de redução de valores,

com largura aproximada de 10 cm seguida de uma área com acréscimo de velocidade, entre 0,25 a 0,1 m à esquerda e a direita do centro. Havendo, entretanto, uma inversão desse comportamento em L2, com os valores de velocidade decrescendo onde em L1 há um acréscimo. Este fenômeno caracteriza a formação de vórtices, escoamento giratório, com linhas de corrente apresentando um padrão circular ao redor de um centro de rotação, neste caso localizado entre L1 e L2 e a 15 cm de cada extremidade do equipamento.

Ao avaliar a simulação no plano zx para a distância L2, verifica-se que existem três regiões com intensificações de velocidade, em destaque com linhas tracejadas para ensaio velocidade de $1,5 \text{ m s}^{-1}$. Essas regiões são áreas ou pontos onde há movimentação de areia em razão dos vórtices formados durante o escoamento do fluido, obrigando as linhas de fluxo a tangenciar o leito filtrante. Pode-se observar a existência no centro do equipamento de um ponto de menor velocidade, onde ocorre a deposição de partículas de areia movimentadas pelos vórtices. Esse comportamento foi comprovado, por Mesquita et al. (2012), que caracterizou filtros de areia com o mesmo modelo de placa difusora e identificou que a movimentação da camada de areia após o escoamento de água no equipamento, com o aparecimento de cumes de deposição de areia movimentada das regiões dos vórtices. Esse fenômeno foi também identificado e comprovado nos ensaios de deformação da superfície filtrante, apresentados a seguir.

As Tabelas 7 e 8 apresentam os resultados gráficos dos ensaios de deformação superficial do leito filtrante, constituída de uma amostra do perfil da superfície escaneada, e os valores numéricos de cinco pontos de cotas estimadas ao longo de quatro diagonais dispostas sobre essa superfície.

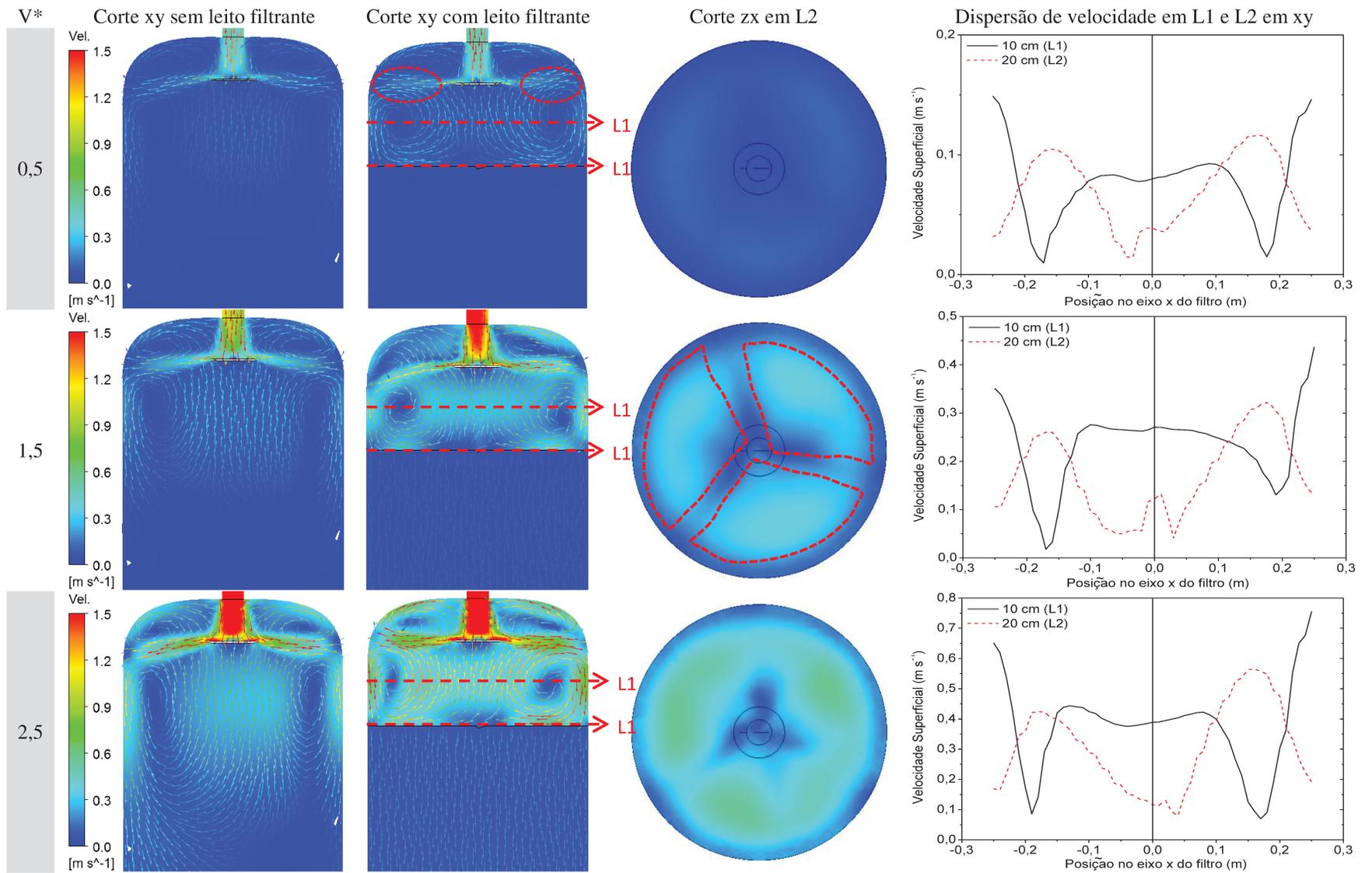
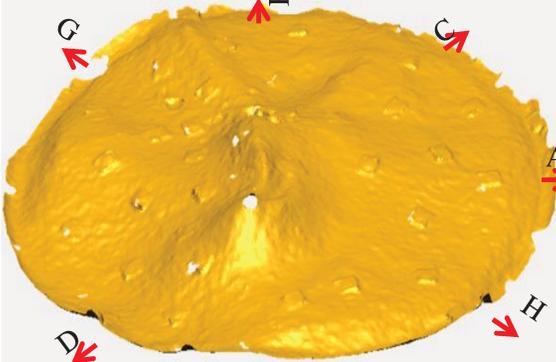
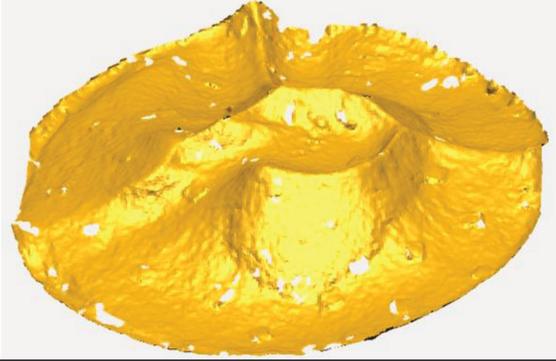
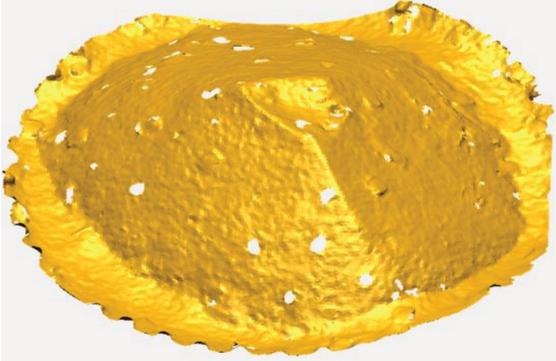


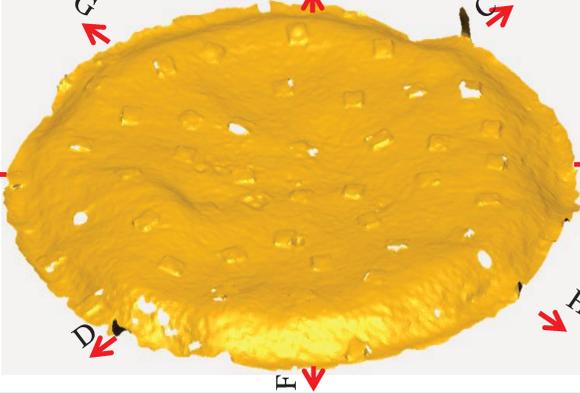
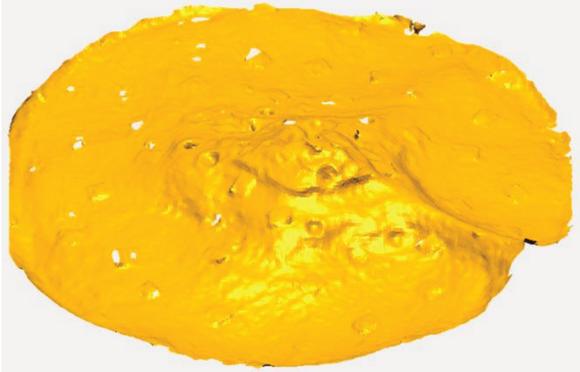
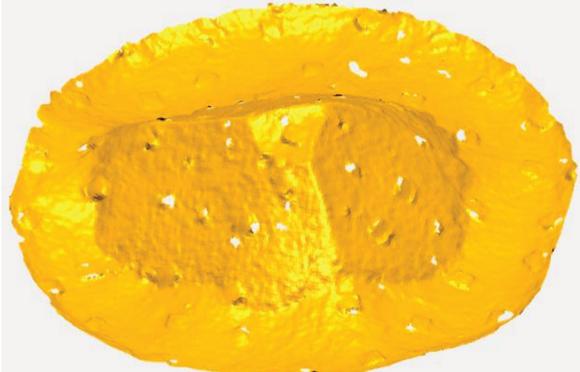
Figura 27: Perfis de velocidade e linhas de fluxo para escoamento característico no módulo experimental com placa difusora plana e fluxo de água no sentido descendente. Onde: $[V^*]$ velocidade inicial utilizada na simulação em $m s^{-1}$.

Tabela 7: Análise da deformação superficial do leito filtrante resultante do escoamento de água no sentido descendente sob a interação da placa difusora plana sem borda e com o leito filtrante a 10 cm de distância do acessório.

| Superfície do leito filtrante | D* | Cotas (mm) | | | | |
|---|----|------------|-------|--------|-------|-------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Velocidade de 0,5 (m s ⁻¹) | | | | | | |
|  | AB | +10,0 | +25,2 | +56,1 | +23,1 | +5,9 |
| | CD | +8,2 | +27,8 | +56,1 | +27,8 | +3,2 |
| | EF | +9,8 | +22,2 | +56,1 | +24,2 | +6,8 |
| | GH | +7,6 | +18,9 | +56,1 | +18,1 | +6,4 |
| Velocidade de 1,5 (m s ⁻¹) | | | | | | |
|  | AB | +25,5 | +74,6 | +48,8 | +68,1 | -25,0 |
| | CD | +24,7 | +75,3 | +48,8 | +58,7 | -23,7 |
| | EF | +24,5 | +75,3 | +48,8 | +61,3 | -22,9 |
| | GH | +23,4 | +54,3 | +48,8 | +55,3 | -22,6 |
| Velocidade de 2,5 (m s ⁻¹) | | | | | | |
|  | AB | -15,0 | +78,3 | +114,3 | +78,8 | +13,4 |
| | CD | -14,7 | +78,7 | +114,3 | +78,4 | +12,8 |
| | EF | -15,1 | +70,1 | +114,3 | +78,8 | +13,1 |
| | GH | -14,6 | +79,0 | +114,3 | +78,3 | +12,9 |

Nota: ^[D] diagonal direcionada na superfície do leito filtrante. Valores seguidos do símbolo de soma (+) caracteriza elevação acima do plano de referência e de subtração (-) abaixo desse plano.

Tabela 8: Análise da deformação superficial do leito filtrante resultante do escoamento de água no sentido descendente sob a interação da placa difusora plana sem borda e com o leito filtrante a 20 cm de distância do acessório.

| Superfície do leito filtrante | | D* | Cotas (mm) | | | | |
|---|----|------|------------|-------|-------|-------|---|
| | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Velocidade de 0,5 (m s ⁻¹) | | | | | | | |
|  | AB | +5,6 | +13,8 | +9,8 | +16,2 | +7,8 | |
| | CD | +6,4 | +14,2 | +9,8 | +14,1 | +6,8 | |
| | EF | +4,9 | +13,6 | +9,8 | +15,2 | +5,2 | |
| | GH | +7,2 | +14,8 | +9,8 | +16,2 | +9,1 | |
| Velocidade de 1,5 (m s ⁻¹) | | | | | | | |
|  | AB | 0,0 | +25,4 | +55,0 | +25,0 | -8,3 | |
| | CD | +6,0 | +22,0 | +55,0 | +25,3 | +16,3 | |
| | EF | +7,4 | +27,2 | +55,0 | +40,0 | +24,0 | |
| | GH | +6,8 | +26,8 | +55,0 | +42,0 | +23,2 | |
| Velocidade de 2,5 (m s ⁻¹) | | | | | | | |
|  | AB | +6,4 | +62,3 | +94,5 | +67,4 | +19,5 | |
| | CD | +6,1 | +62,7 | +94,5 | +67,6 | +19,2 | |
| | EF | +5,9 | +57,6 | +94,5 | +69,0 | +18,7 | |
| | GH | +6,7 | +56,8 | +94,5 | +68,5 | +18,1 | |

Nota: ^[D] diagonal direcionada na superfície do leito filtrante. Valores seguidos do símbolo de soma (+) caracteriza elevação acima do plano de referência e de subtração (-) abaixo desse plano.

Ao analisar os dados das Tabelas 7 e 8, observa-se que a placa difusora plana causou durante o escoamento de água no sentido descendente uma deformação acentuada na superfície

filtrante, com a movimentação de grãos de areia ocorrendo predominantemente, das regiões próximas à parede para o centro do corpo do equipamento, comprovando a formação de vórtices acima dessa superfície, com a criação de um cone com aproximadamente 10 cm de altura, na região central da superfície. Esse comportamento foi intensificado proporcionalmente com o aumento da velocidade, como podemos observar o cume central maior para os resultados em 2,5 m s⁻¹ em relação aos demais ensaios, justificados pelos vórtices formados e com maiores valores de velocidade tangencial. Nota-se também que a redução da altura entre a placa difusora e o leito filtrante, isto é diminuição do espaço para dissipação de energia cinética, propiciou um aumento no efeito da movimentação, como se pode observar na análise das superfícies da Tabela 7 em relação à Tabela 8, com elevações aproximadamente 1 cm maiores. Esses resultados concordam com os resultados encontrados durante as simulações numéricas dessa placa difusora, e também com Mesquita et al. (2012) que identificaram e registraram, por fotografia, esse mesmo efeito para um equipamento comercial que utiliza esse modelo de placa difusora.

Ensaio 3: Placa difusora plana sem bordas e com anel superior

A Figura 28 apresenta os resultados das simulações para as condições de módulo virtual configurado com o modelo de placa difusora plana com um anel superior (Figura 16) para as velocidades de ensaio de 0,5; 1,5 e 2,5 m s⁻¹, e na Figura 52, no **Anexo 8.3**, para 1,0 e 2,0 m s⁻¹. Observa-se pela figura que, o acréscimo do anel superior ao modelo de placa plana simples não resultou em mudanças significativas do comportamento do escoamento do fluido no interior do filtro, em comparação ao modelo de placa plana. Similarmente ao modelo anterior, essa configuração determinou uma redução significativa da energia cinética, porém, não distribuiu o fluido homogeneamente sobre o leito filtrante, direcionando-o igualmente para as paredes do equipamento, e gerando a formação de vórtices sobre a superfície do meio poroso. Observa-se, também, no perfil de velocidade do eixo zx, que essa placa apresentou a mesma tendência à movimentação das partículas de areia das extremidades da camada com acúmulo na região central do equipamento (detalhe destacado pelas linhas tracejadas que mostram os pontos de intensificação da velocidade), como identificado para a placa difusora plana sem bordas.

Analisando as curvas de distribuição, L1 e L2, respectivamente, a 10 e 20 cm da placa difusora, dos gráficos de dispersão de velocidade, é possível notar um comportamento radial entre os pontos 0,2 e 0,1 m à esquerda e direita, nas extremidades do equipamento. Este fenômeno caracteriza a formação de vórtices, escoamento giratório, com linhas de corrente

apresentando um padrão circular ao redor de um centro de rotação. Esse comportamento é comprovado pelos perfis de velocidades encontrados nos resultados das simulações com leito filtrante, onde se observa pelos vetores de velocidade, a formação do vórtice abaixo de L1.

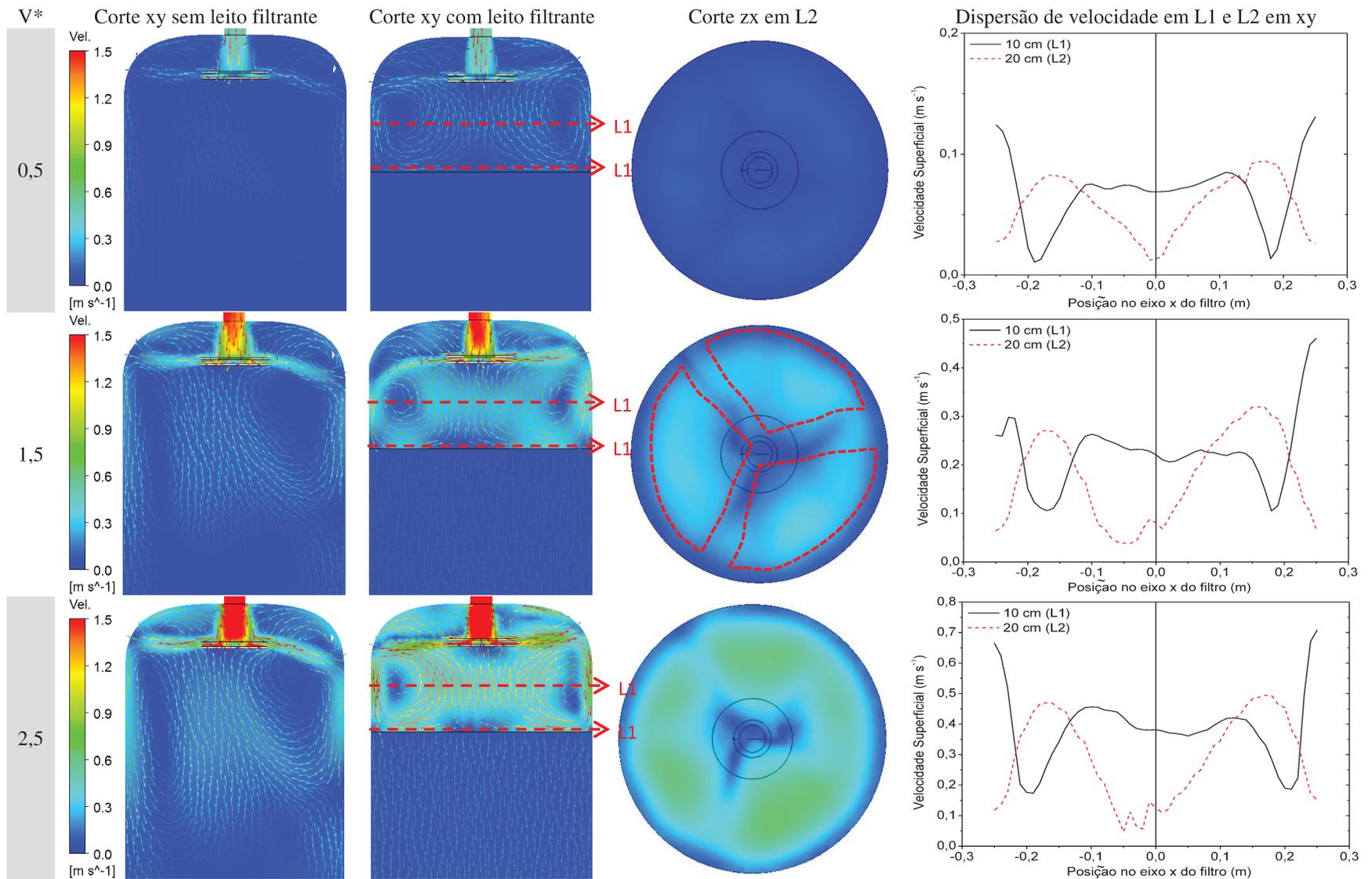
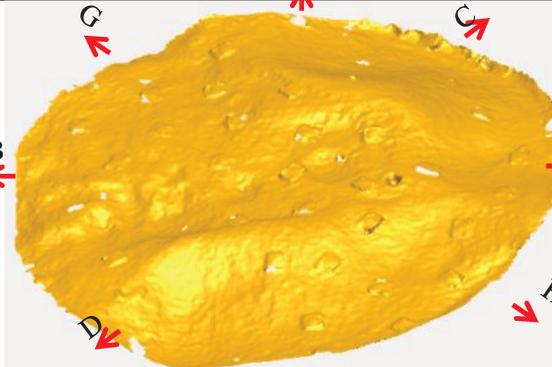
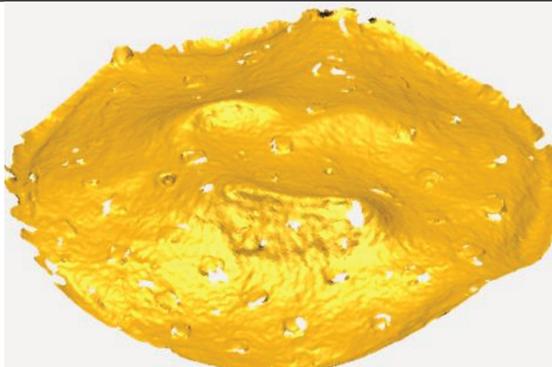
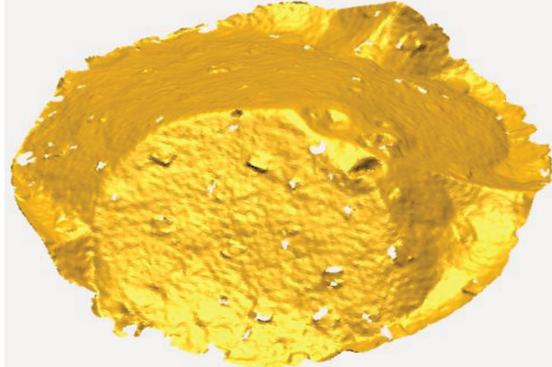


Figura 28: Perfis de velocidade e linhas de fluxo para escoamento característico no módulo experimental com placa difusora plana com anel superior e fluxo de água no sentido descendente. Onde: $V^{[*]}$ velocidade inicial utilizada na simulação em $m s^{-1}$.

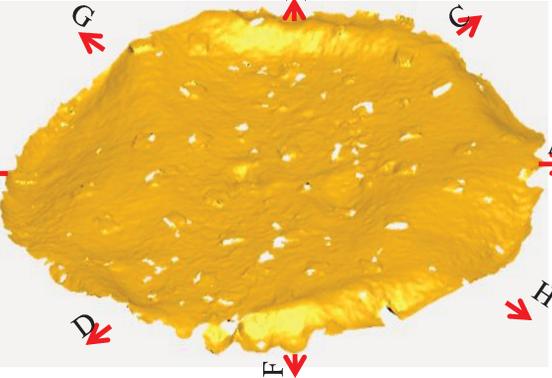
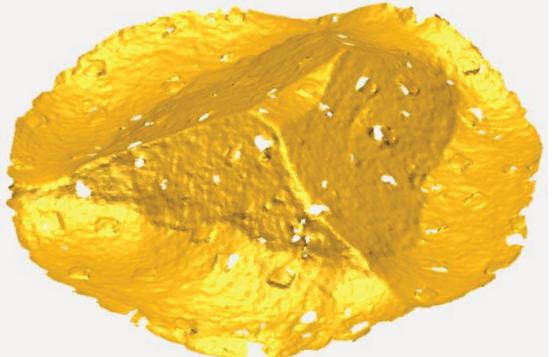
As Tabelas 9 e 10 mostram os resultados encontrados durante os ensaios laboratoriais de caracterização da deformação da superfície do leito filtrante para o módulo experimental configurado com a placa difusora plana sem bordas e com anel superior.

Tabela 9: Análise da deformação superficial do leito filtrante resultante do escoamento de água no sentido descendente sob a interação da placa difusora plana sem borda e com anel superior e com o leito filtrante a 10 cm de distância do acessório.

| Superfície do leito filtrante | D* | Cotas (mm) | | | | |
|---|----|------------|-------|--------|-------|-------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Velocidade de 0,5 (m s ⁻¹) | | | | | | |
|  | AB | +20,0 | +20,1 | +19,0 | +17,9 | +3,4 |
| | CD | +11,8 | +26,0 | +19,0 | +20,4 | +11,2 |
| | EF | +16,2 | +23,4 | +19,0 | +33,7 | +16,5 |
| | GH | +8,2 | +16,4 | +19,0 | +30,8 | +24,6 |
| Velocidade de 1,5 (m s ⁻¹) | | | | | | |
|  | AB | +19,0 | +25,0 | +79,0 | +75,0 | +20,0 |
| | CD | +18,5 | +27,2 | +79,0 | +77,6 | +23,3 |
| | EF | +33,1 | +35,4 | +79,0 | +81,6 | +16,5 |
| | GH | +11,1 | +83,2 | +79,0 | +77,2 | +26,5 |
| Velocidade de 2,5 (m s ⁻¹) | | | | | | |
|  | AB | +25,1 | +69,8 | +111,2 | +65,4 | +27,6 |
| | CD | +12,1 | +63,2 | +111,2 | +76,2 | +31,3 |
| | EF | +17,1 | +67,6 | +111,2 | +66,7 | +23,4 |
| | GH | +6,1 | +65,1 | +111,2 | +61,2 | +18,2 |

Nota: ^[D] diagonal direcionada na superfície do leito filtrante. Valores seguidos do símbolo de soma (+) caracteriza elevação acima do plano de referência e de subtração (-) abaixo desse plano.

Tabela 10: Análise da deformação superficial do leito filtrante resultante do escoamento de água no sentido descendente sob a interação da placa difusora plana sem borda e com anel superior e com o leito filtrante a 20 cm de distância do acessório.

| Superfície do leito filtrante | D* | Cotas (mm) | | | | |
|---|----|------------|-------|-------|-------|-------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Velocidade de 0,5 (m s ⁻¹) | | | | | | |
|  | AB | +7,6 | +13,9 | +14,2 | +14,0 | +5,0 |
| | CD | +10,3 | +14,6 | +14,2 | +13,6 | +11,8 |
| | EF | +16,3 | +12,8 | +14,2 | +13,4 | +9,7 |
| | GH | +11,8 | +13,1 | +14,2 | +12,8 | +6,8 |
| Velocidade de 1,5 (m s ⁻¹) | | | | | | |
|  | AB | -11,3 | 46,0 | +50,0 | +49,4 | +7,2 |
| | CD | +4,8 | 44,0 | +50,0 | +26,0 | +6,8 |
| | EF | +41,0 | +46,0 | +50,0 | +33,4 | +17,6 |
| | GH | +8 | +34,0 | +50,0 | +38,2 | +11,4 |
| Velocidade de 2,5 (m s ⁻¹) | | | | | | |
|  | AB | +18,0 | +50,0 | +95,0 | +50,0 | +5,0 |
| | CD | +17,0 | +54,7 | +95,0 | +55,8 | +4,8 |
| | EF | +8,2 | +55,2 | +95,0 | +55,7 | +2,2 |
| | GH | +15,2 | +57,2 | +95,0 | +56,2 | +6,5 |

Nota: ^[D] diagonal direcionada na superfície do leito filtrante. Valores seguidos do símbolo de soma (+) caracteriza elevação acima do plano de referência e de subtração (-) abaixo desse plano.

Observa-se que os efeitos identificados nas simulações, com a intensificação do escoamento na direção das paredes do equipamento e a interação da elevada velocidade com os grãos de areia concentrada nesses pontos, foram confirmados com os resultados do escaneamento

das superfícies deformadas no escoamento com sentido coincidente ao processo de filtração (descendente). Para esse modelo de placa também foi verificado um incremento proporcional desse comportamento com o aumento da velocidade e com a redução da altura entre a placa difusora e o leito filtrante. Os resultados apresentados nas Tabelas 9 e 10 mostram correlação aos encontrados pelas simulações, e comprovando que a adição do anel superior não causou nenhum efeito positivo significativo, na interação entre placa difusora e superfície filtrante.

Ensaio 4: Placa difusora plana com bordas

Os resultados das simulações do modelo de placa que possui a base plana com bordas laterais são apresentados na Figura 29 para as velocidades de ensaio de 0,5; 1,5 e 2,5 m s⁻¹, e na Figura 53 do **Anexo 8.3**, para 1,0 e 2,0 m s⁻¹. Pode-se observar nessas figuras que a estrutura diferenciada desse modelo provocou uma redução significativa da energia cinética e determinou a formação de linhas de fluxo predominantemente na direção da calota superior do filtro. A partir dessa região, as linhas de fluxo seguiram uma trajetória paralela às paredes do equipamento até a superfície do leito filtrante, formando vórtices sobre ela, e mostrando potencial em movimentar os grãos de areia nas direções predominantes ao fluxo. No entanto, destaca-se que as formações dos vórtices ocorreram próximos e/ou acima de L1, diferentemente dos demais modelos ensaiados, reduzindo a intensidade de movimentação do elemento filtrante, como pode ser observado nos perfis das superfícies escaneadas apresentadas nas Tabelas 11 e 12. Este efeito foi resultante da mudança da direção das linhas de fluxo que antes eram direcionadas direto para as paredes laterais do equipamento e, com o acréscimo das bordas laterais, foram projetadas para a calota superior do filtro, proporcionando uma maior trajetória, e, também, maior oportunidade de dissipação de energia cinética até a superfície filtrante.

Esse comportamento de movimentação na superfície da camada filtrante foi comprovada por Ponciano de Deus et al. (2013) que avaliou em laboratório o efeito da forma e dimensões da placa difusora no comportamento hidráulico de filtros de areia. Esses autores registraram a ocorrência da superfície deformada, resultante da interação do escoamento do fluido sob a interferência da placa difusora plana com bordas.

A caracterização da deformação da superfície do leito filtrante para o módulo experimental configurado com a placa difusora plana com bordas é apresentada nas Tabelas 11 e 12, que evidencia uma movimentação diferenciada do leito filtrante para esse modelo com relação aos outros modelos de placa.

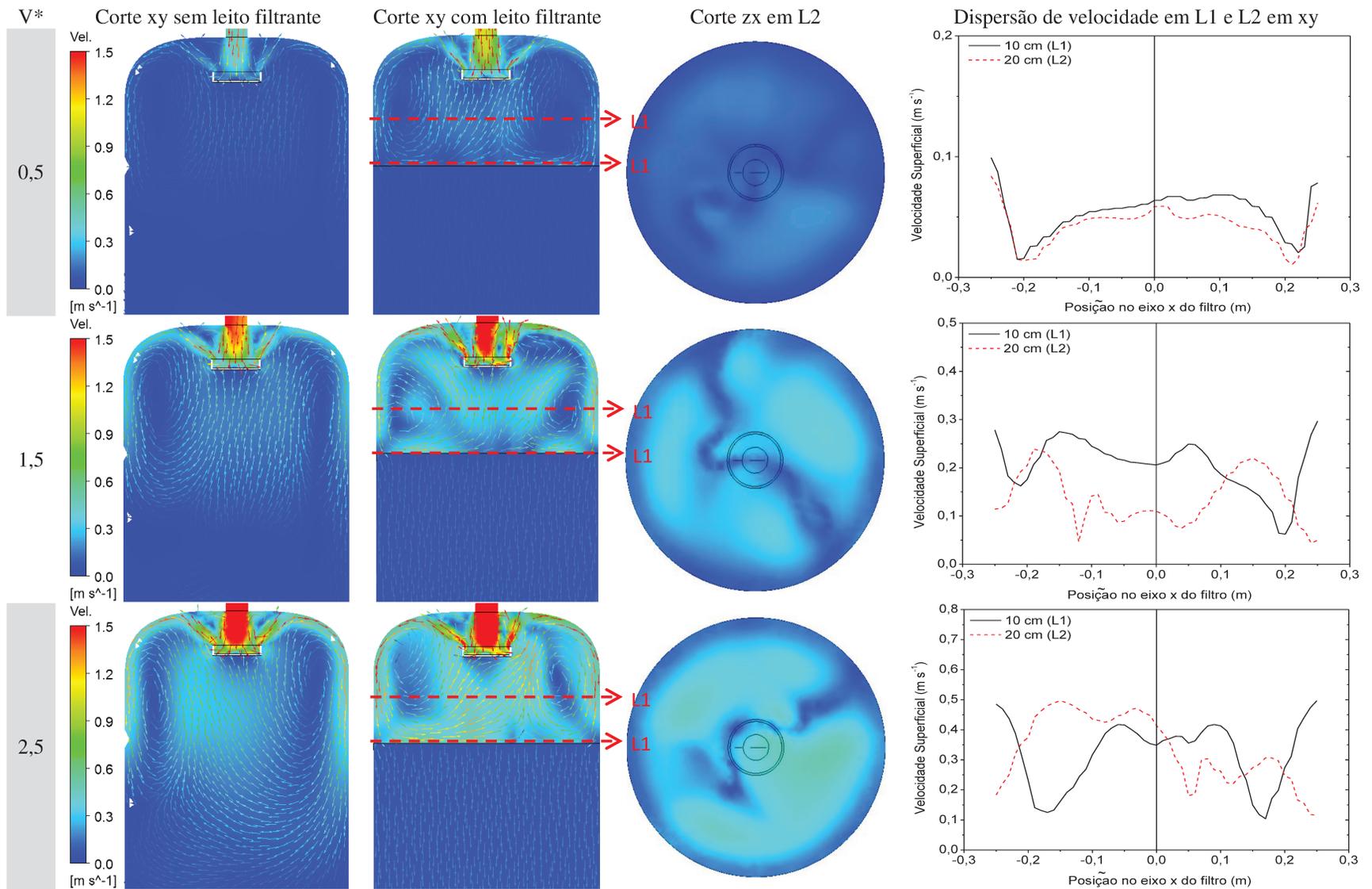
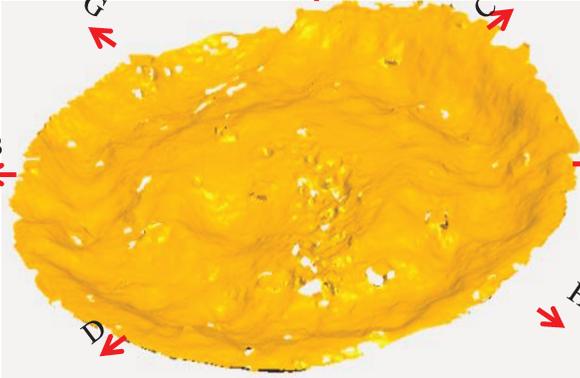
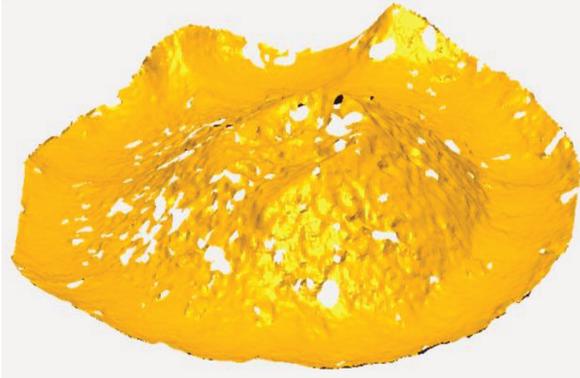


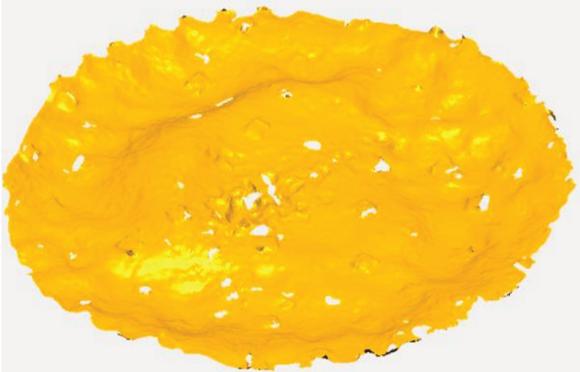
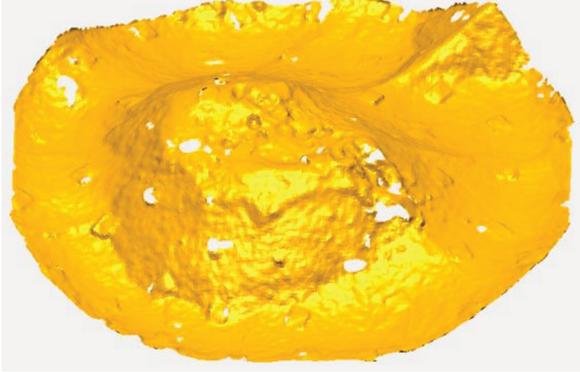
Figura 29: Perfis de velocidade e linhas de fluxo para escoamento característico no módulo experimental com placa difusora plana com bordas e fluxo de água no sentido descendente. Onde: $[V^*]$ velocidade inicial utilizada na simulação em $m s^{-1}$.

Tabela 11: Análise da deformação superficial do leito filtrante resultante do escoamento de água no sentido descendente sob a interação da placa difusora plana com borda e com o leito filtrante a 10 cm de distância do acessório.

| Superfície do leito filtrante | | D* | Cotas (mm) | | | | |
|---|----|-------|------------|-------|-------|-------|---|
| | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Velocidade de 0,5 (m s ⁻¹) | | | | | | | |
|  | AB | +26,3 | +8,3 | +2,5 | +6,0 | 0,0 | |
| | CD | +25,8 | +7,8 | +2,5 | +7,6 | +6,0 | |
| | EF | +19,2 | +6,8 | +2,5 | +3,6 | +15,6 | |
| | GH | +14,2 | +8,1 | +2,5 | +3,1 | +17,8 | |
| Velocidade de 1,5 (m s ⁻¹) | | | | | | | |
|  | AB | +11,0 | -16,5 | +16,5 | -31,8 | +5,8 | |
| | CD | +13,3 | -21,9 | +16,5 | -30,5 | +4,1 | |
| | EF | +16,7 | -15,8 | +16,5 | -14,1 | +6,3 | |
| | GH | +12,5 | -29,8 | +16,5 | -13,8 | +2,1 | |
| Velocidade de 2,5 (m s ⁻¹) | | | | | | | |
|  | AB | +15,0 | +81,6 | +67,5 | +72,1 | +16,0 | |
| | CD | +19,2 | +81,2 | +67,5 | +71,6 | +12,6 | |
| | EF | +14,6 | +80,2 | +67,5 | +75,4 | +11,6 | |
| | GH | +16,2 | +62,7 | +67,5 | +76,1 | +18,9 | |

Nota: ^[D] diagonal direcionada na superfície do leito filtrante. Valores seguidos do símbolo de soma (+) caracteriza elevação acima do plano de referência e de subtração (-) abaixo desse plano.

Tabela 12: Análise da deformação superficial do leito filtrante resultante do escoamento de água no sentido descendente sob a interação da placa difusora plana com borda e com o leito filtrante a 20 cm de distância do acessório.

| Superfície do leito filtrante | | D* | Cotas (mm) | | | | |
|---|--|--|------------|-------|-------|-------|-------|
| | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|  | | Velocidade de 0,5 (m s ⁻¹) | | | | | |
| | | AB | +9,1 | +5,6 | -2,5 | +6,4 | +1,2 |
| | | CD | +10,0 | -10,0 | -2,5 | -12,0 | +3,6 |
| | | EF | +8,6 | -12,6 | -2,5 | -11,3 | +2,8 |
| | | GH | +13,6 | +8,2 | -2,5 | -14,1 | +8,2 |
|  | | Velocidade de 1,5 (m s ⁻¹) | | | | | |
| | | AB | +10,5 | -10,2 | -5,0 | -10,1 | +4,5 |
| | | CD | +11,2 | -11,2 | -5,0 | -8,9 | +6,2 |
| | | EF | +10,8 | -10,9 | -5,0 | -8,2 | +5,8 |
| | | GH | +13,8 | -12,1 | -5,0 | -4,8 | +9,2 |
|  | | Velocidade de 2,5 (m s ⁻¹) | | | | | |
| | | AB | +5,4 | +50,0 | +60,1 | +62,1 | +1,2 |
| | | CD | +61,1 | +42,3 | +60,1 | +56,2 | +8,2 |
| | | EF | +8,9 | +38,6 | +60,1 | +61,2 | +11,2 |
| | | GH | +31,2 | +46,3 | +60,1 | +58,6 | +18,8 |

Nota: ^[D] diagonal direcionada na superfície do leito filtrante. Valores seguidos do símbolo de soma (+) caracteriza elevação acima do plano de referência e de subtração (-) abaixo desse plano.

Observa-se que para as velocidades de 0,5 e 1,5 m s⁻¹, há formação de uma depressão circular na superfície do leito filtrante, concentrada em um raio próximo do centro do módulo abaixo da projeção da placa difusora. No entanto, o aumento do valor da velocidade determinou a formação de uma elevação na região central do leito filtrante, evidenciando a movimentação das partículas de areia das paredes do filtro para a região central. Observam-se nas simulações numéricas que houve a formação desses vórtices e que os mesmos apresentaram-se mais deslocados da parede do filtro, em relação aos outros dois modelos de placa difusora ensaiados, podendo ser essa a razão da escavação concentrada próxima à região central, e que com o aumento da velocidade de simulação os efeitos se prolongaram por toda a superfície do leito filtrante.

Esses efeitos concordam com os apresentados por Ponciano de Deus et al. (2013) que identificou a formação de depressões e elevações em ensaios realizados com o mesmo modelo de placa. Salienta-se que esse modelo de placa difusora plana com bordas reduziu a deformação do leito em comparação aos modelos sem bordas, como pode ser observado nos valores numéricos das cotas desses ensaios, mostrando o efeito positivo da adição da borda no sistema de difusão de água.

As simulações numéricas possibilitaram analisar o processo hidrodinâmico com a visualização das linhas de fluxo formadas durante os processos de filtração, e identificar os padrões de funcionamento de cada modelo de placa difusora, tais como: interferência do defletor sobre a camada superficial do leito filtrante. Subsequentemente, os testes laboratoriais comprovaram os indicativos identificados durante as simulações, mostrando, sobre as superfícies os efeitos das linhas de fluxo causados durante o escoamento.

4.2.2 Estudo do comportamento hidrodinâmico para drenos comerciais

Buscando informações que contribuíssem com a proposta de um modelo de dreno que apresentasse desempenho adequado tanto para escoamentos no sentido coincidente ao processo de filtração como de retrolavagem, foram realizadas simulações do comportamento hidrodinâmico de drenos com as seguintes configurações: dreno cilíndrico, dreno cônico e fundo falso ranhurado.

A Figura 30 apresenta os mapas de velocidade no perfil do eixo xy do módulo virtual, com destaque na região próxima aos drenos, resultados das simulações numéricas desenvolvidas,

para o escoamento no sentido coincidente ao processo de filtração, descendente, com leito poroso para os modelos de drenos escolhidos. Nessas figuras, as linhas representam os resultados das velocidades de simulação de 0,05, 0,15 e 0,25 m s⁻¹. Esses mapas destacam os campos de vetores de velocidade na dimensão em y, que caracterizam as linhas de correntes e a trajetória do escoamento do aflente no sentido descendente possibilitando observar a região efetiva de atuação de cada dreno e as áreas de contato dreno-camada filtrante.

Ao avaliar o escoamento causado pelo dreno cilíndrico é possível observar que essa geometria proporcionou a formação de zonas mortas ou de estagnação, isto é, uma região onde não há um fluxo efetivo de escoamento, destacada por linhas tracejadas na parte superior do dreno para a velocidade de 0,15 m s⁻¹. Esse mesmo comportamento foi observado por Santos et al. (2013) ao ensaiar esse modelo de crepina cilíndrica, utilizando túnel de vento como metodologia, e observaram que nessa mesma região havia um ponto que causava dispersão do fluido desviando a trajetória da fumaça para a região de contorno do dreno. Esse comportamento também foi observado nos drenos cônicos, devido às áreas sem saídas ou aberturas livres para o escoamento de fluido, nas partes superiores laterais. Os projetos desses dois modelos de dreno privilegiam o escoamento na parte lateral do acessório, excluindo a parte superior e reduzindo a área disponível ao fluxo de fluido.

Esse efeito de dispersão das linhas de fluxo na parte superior dos drenos, além de proporcionar um aumento na perda de pressão no processo de filtração, implica na não uniformidade de escoamento ao longo do corpo da crepina, tornando sua parte inferior a área preferencial ao fluxo e reduzindo a área de efetividade do acessório, destacada por linhas contínuas na figura (SANTOS et al., 2013). Além disso, é possível visualizar que a falta de abertura nessa região causa um aumento na trajetória das linhas de fluxo até serem assimiladas pelos drenos.

Analisando o comportamento do escoamento descendente no módulo virtual instalado com o fundo falso ranhurado, observa-se que o mesmo proporcionou a formação de linhas de fluxo perpendiculares, possibilitando um menor caminho a ser percorrido na trajetória do fluido. Nota-se, também, que não houve a formação áreas de estagnação sobre o acessório de drenagem.

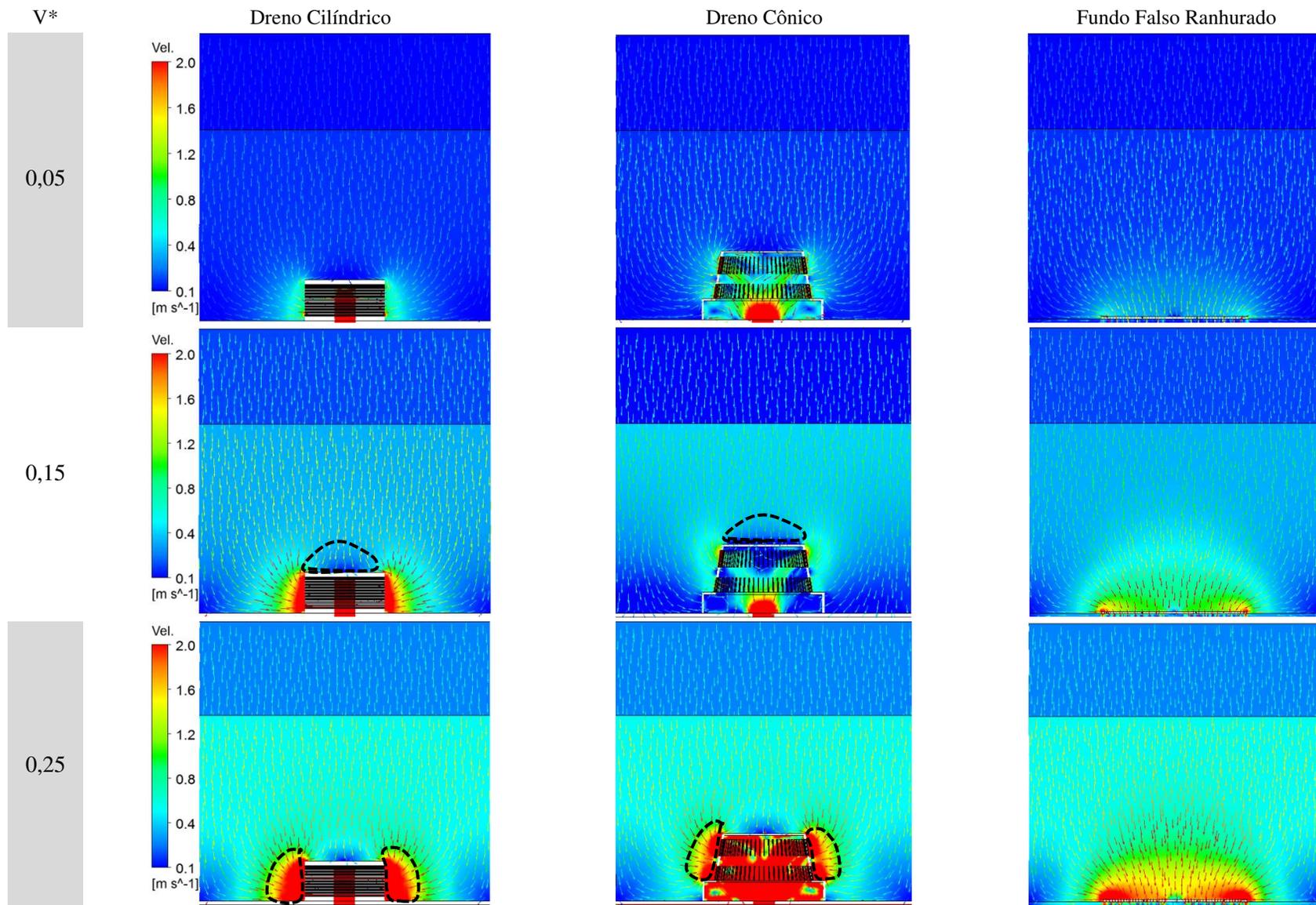


Figura 30: Perfil de escoamento característico na região delimitada por um dreno com o fluxo descendente (filtragem) encontrado nas simulações para os modelos de drenos ensaiados. Onde: $[V^*]$ velocidade inicial utilizada na simulação em $m\ s^{-1}$.

A Figura 31 apresenta os resultados das simulações do escoamento ascendente (retrolavagem) nos modelos de drenos selecionados (cilíndrico, cônico e fundo falso ranhurado). Pode se observar que, para os drenos cilíndricos e cônicos, as características de escoamento se são semelhantes, com formação de pontos de estagnação na parte superior dos drenos e a intensificação de escoamento nas laterais do acessório, concordando com os resultados encontrados por Santos et al. (2013). Estes autores sugerem que tal comportamento implicaria em maior perda de pressão no sistema, devido ao caminho mais longo da trajetória das linhas, em contraste uma movimentação unicamente vertical destas linhas.

Salcedo (2010) sugere que essa disposição de linhas de fluxo possibilita maior remoção de impurezas aderidas aos grãos de areia, pois há atuação de maiores forças de cisalhamento durante o fluxo de água em torno das partículas e por um maior período de tempo. Por outro lado, Salcedo et al. (2011) indicam que esse comportamento das linhas de fluxo causam, para baixas velocidade, uma limitação no volume e na altura da camada filtrante revolvida. Os autores ainda destacam que, em contraste, o aumento do valor da velocidade produz linhas de fluxo que tenderiam mais rapidamente à verticalização, o que pode gerar um arranjo desuniforme do material filtrante, devido aos processos que antecedem a fluidização do leito, como o estado de leito borbulhante, que pode ser transposto com maior rapidez.

Adicionalmente, é possível inferir que na projeção dessas zonas de estagnação não haverá um escoamento com velocidade significativa para proporcionar a movimentação efetiva do leito filtrante o que não causará a fluidização desse leito, permitindo a formação de agregados (acúmulos de misturas fortemente aderidas de impureza com material filtrante). Esse efeito propicia um aumento da pressão interna e redução da área efetiva de filtração nos sucessivos ciclos após a retrolavagem e pode, conseqüentemente, reduzir a eficiência de remoção em função do acréscimo da velocidade intersticial entre os grãos de areia, o que irá transportar impurezas já aderidas a esses grãos de areia para o sistema de irrigação.

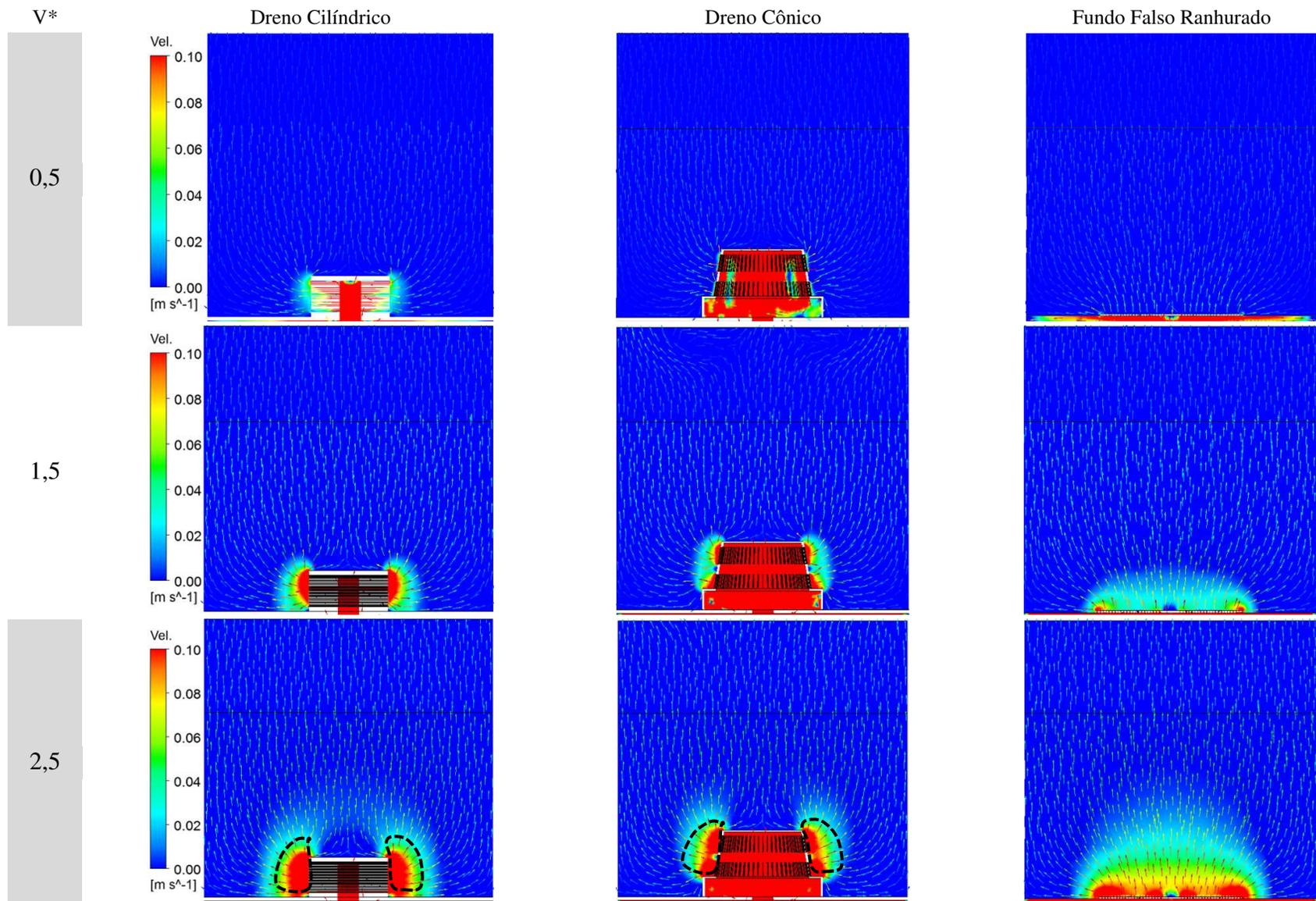


Figura 31: Perfil do escoamento característico na região delimitada por um dreno com o fluxo ascendente (retrolavagem) encontrado nas simulações para os modelos de drenos ensaiados. Nota: $V^{[*]}$ velocidade inicial utilizada na simulação em $m\ s^{-1}$.

A partir do comportamento verificado nas simulações dos modelos cilíndrico e cônico, foi analisada a possibilidade de se optar por um modelo de dreno do tipo fundo falso ranhurado no protótipo de filtro a ser dimensionado. Os resultados desse modelo de dreno mostrou que a configuração proposta atingia os resultados desejados, como ausência de zonas de estagnação e aumento de área em contato direto com o leito poroso o que permite maiores interações fluido e material filtrante, em relação aos demais equipamentos ensaiados. Pode-se observar que, este sistema de drenagem não cria linhas de fluxo lateralmente ao eixo, reduzindo a área efetiva de atuação do equipamento sendo necessário, nesse caso, a redução da distância entre os drenos. Contudo, esse modelo de dreno apresentava algumas desvantagens como, dificuldade no processo de fabricação estrutural, construção complexa das ranhuras (slots), e restrição na manutenção preventiva e/ou corretiva, como possíveis trocas por rupturas, limpezas e outras, devido à condição de ser uma estrutura fixa ou permanente ao fundo falso.

4.3 Projeto e dimensionamento de novos acessórios

4.3.1 Projeto da placa difusora

Após a análise dos resultados obtidos com a simulação do comportamento hidrodinâmico de modelos comerciais de placas difusoras e de outras propostas que surgiram no processo de desenvolvimento, buscou-se definir um protótipo diferenciado de placa difusora que provocasse maior dissipação de energia cinética na entrada do filtro, determinando uma distribuição homogênea das linhas de fluxo sobre a superfície da camada porosa e com redução na formação de vórtices para minimizar a movimentação dos grãos de areia da superfície do leito filtrante.

Ainda no desenvolvimento do protótipo da placa difusora, foram aplicados outros critérios, como:

- Redução de áreas do equipamento que causam interferência ao escoamento do fluido, modificadoras das linhas de fluxo;
- Redução da velocidade próxima à parede do equipamento;

Após a análise de diferentes propostas de placa difusora que atendessem os critérios assumidos nesse estudo, chegou ao modelo apresentado na Figura 32, com as dimensões já otimizadas.

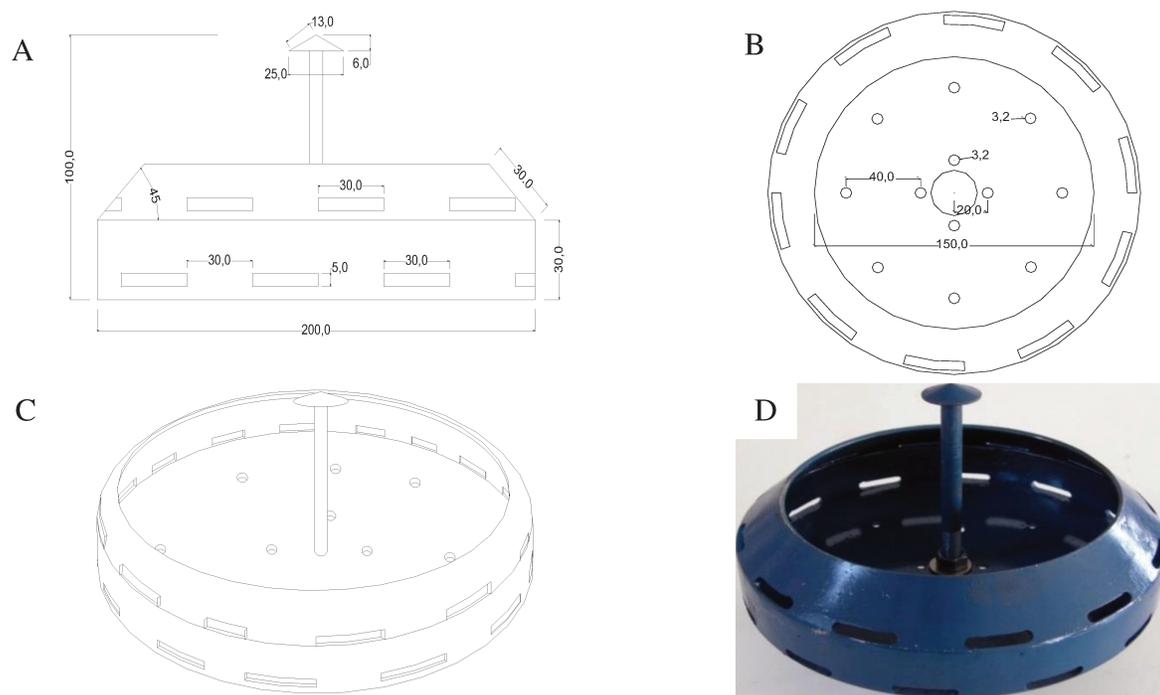


Figura 32: Esquema estrutural da placa difusora proposta. Onde: ^[A] Vista frontal, ^[B] Vista superior, ^[C] Perspectiva lateral, ^[D] Imagem da placa difusora construída. (Dimensões em mm)

Esse protótipo de placa difusora apresenta a base plana com bordas laterais e três particularidades de projeto. A primeira é a presença de uma peça cônica, denominada “mini defletor”, instalada a 10 cm de altura da base, que tem a função de reduzir a velocidade do escoamento do fluido antes de atingir a base plana da placa, criando uma dissipação adicional de energia na parte superior da placa e melhorando a distribuição das linhas de fluxo. A segunda particularidade é a proposta de uma borda lateral superior com uma angulação interna, possibilitando direcionar e centralizar as linhas de fluxo para a região central de escoamento, possibilitando maior probabilidade de dissipar energia cinética e direcionamento das linhas de fluxo para o centro da placa. Finalmente, a terceira característica que diferencia das demais placas difusoras, é a presença de aberturas retangulares nas bordas laterais e de orifícios na base da placa, visando dividir a vazão de filtragem durante o processo de escoamento, distribuindo radial e perpendicularmente as linhas de fluxo em regiões ou áreas que não eram efetivamente potencializadas nos demais modelos de placas difusoras e reduzindo o efeito da vazão principal no escoamento sobre o leito filtrante.

A Figura 33 apresenta os resultados das simulações do comportamento hidrodinâmico do modelo de placa difusora proposto para as velocidades de ensaio de 0,5; 1,5 e 2,5 m s^{-1} , e na

Figura 54, no **Anexo 8.3**, para as velocidades de 1,0 e 2,0 m s⁻¹. Observa-se nas figuras que a proposta do “mini defletor” atingiu o objetivo pretendido de reduzir a velocidade do fluido antes do contato com a base da placa difusora, como pode ser visto no detalhe da linha tracejada no plano xy para o ensaio com leito poroso e velocidade de 1,5 m s⁻¹, pelas diferentes intensidades de cores, que representam os valores de velocidades. Adicionalmente, o acessório possibilitou direcionar algumas linhas de fluxo para fora da base principal da placa.

Analisando a adição da borda lateral inclinada, observa-se que a mesma redirecionou parte do fluxo de fluido para região central do escoamento, formando, assim, uma zona de transformação de energia, cinética em potencial, causando também uma nova trajetória de escoamento ao fluido. As inovações incorporadas a esse modelo, (“mini defletor”, bordas laterais, borda lateral superior, as aberturas laterais nas bordas e os orifícios na base da placa), permitiram reduzir a intensidade da interação do fluido com a parede do equipamento, como pode ser visto pelos vetores de velocidade nos mapas do eixo xy, diferente do aumento da velocidade do fluido e mudanças na sua trajetória observada nos demais modelos ensaiados.

A proposta da presença de aberturas laterais e de orifícios na base e nas bordas da placa permitiu aumentar a uniformização da distribuição do fluido no escoamento sobre a camada porosa, como pode ser observado na curva L2 dos gráficos de dispersão de velocidade. Analisando esses gráficos observa-se, ainda, que em L1, na região central, houve uma intensificação dos valores de velocidade em função dos orifícios na base plana da placa difusora, mostrando que esse elemento foi efetivo ao propósito de distribuir linhas de fluxo perpendicular a superfície do leito filtrante. Ressaltando que, em relação aos demais modelos ensaiados, essa região não era utilizada para distribuir linhas de fluxo.

A interação das singularidades existentes no novo modelo de placa difusora possibilitou a redução da formação de vórtices no interior do filtro próximo à superfície do leito filtrante, e na diminuição, de aproximadamente 95%, da velocidade média, como pode ser observado pelos valores médios de velocidades resultantes no interior do equipamento, apresentados pela Tabela 13, localizados na referência de L2 sobre a superfície do leito filtrante, obtidos nas simulações matemáticas dos diferentes modelos de placa difusora avaliados. Observa-se nessa tabela que para as três velocidades ensaiadas apresentadas, o modelo projetado diminuiu o valor da velocidade sobre a superfície filtrante na ordem de 83% em relação aos demais equipamentos ensaiados, determinando assim uma maior dissipação de energia cinética.

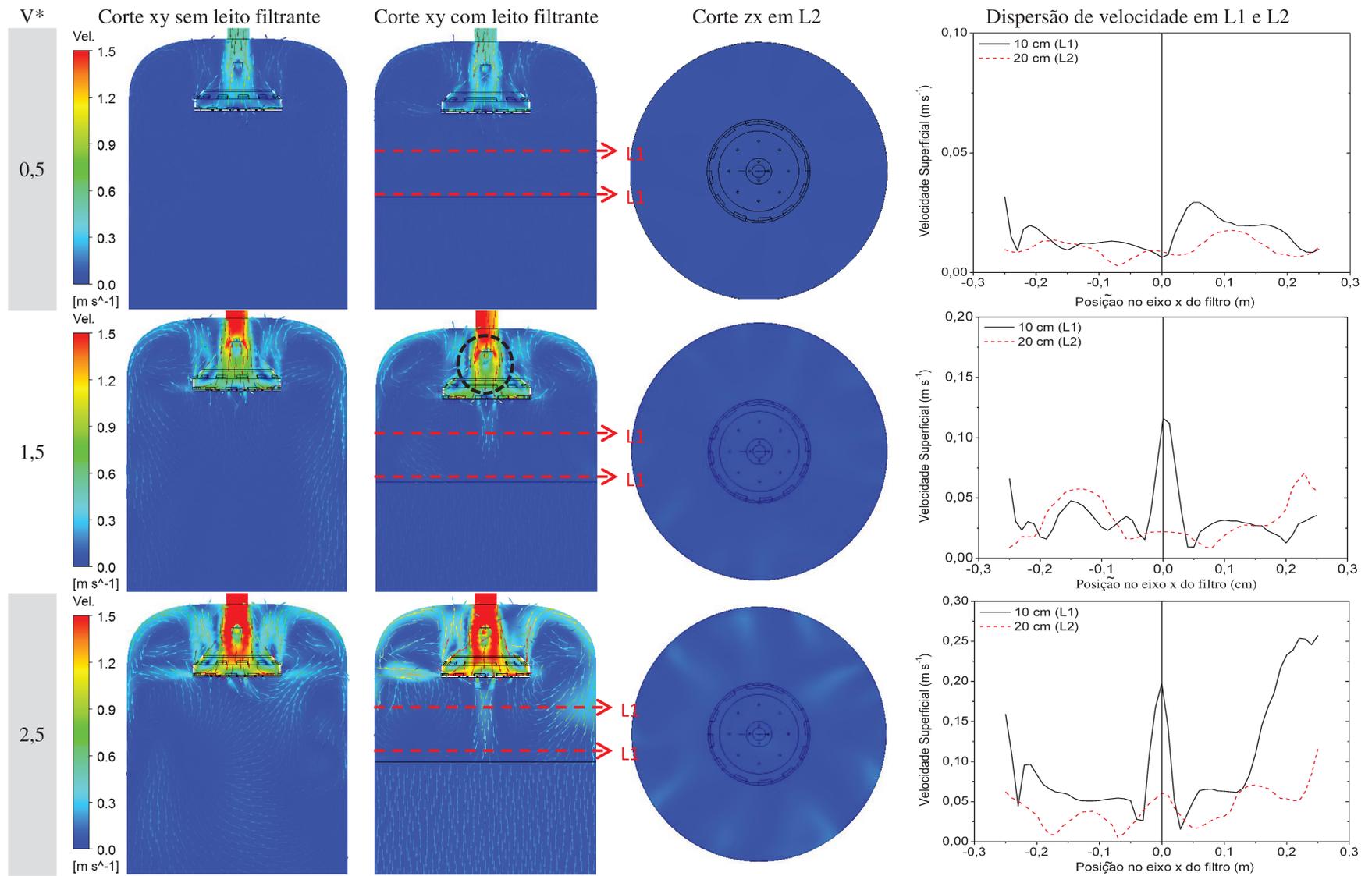


Figura 33: Perfis de velocidade e linhas de fluxo para escoamento característico no módulo experimental com placa difusora projetada e fluxo de água no sentido descendente. Onde: V^* velocidade inicial utilizado na simulação em $m s^{-1}$.

Tabela 13: Velocidade média no plano xz localizado em L2, sobre o leito filtrante, obtida nas simulações numéricas para os modelos de placa difusora avaliada.

| Modelo de Placa Difusora | $\frac{V_{Sim.}(0,5 \text{ m s}^{-1})}{\overline{V_{Res.}} \text{ (m s}^{-1}\text{)}}$ | $\frac{V_{Sim.}(1,5 \text{ m s}^{-1})}{\overline{V_{Res.}} \text{ (m s}^{-1}\text{)}}$ | $\frac{V_{Sim.}(2,5 \text{ m s}^{-1})}{\overline{V_{Res.}} \text{ (m s}^{-1}\text{)}}$ |
|--------------------------|--|--|--|
| Plana sem Bordas | 0,072 | 0,225 | 0,347 |
| Plana com Anel Superior | 0,063 | 0,207 | 0,382 |
| Plana com Bordas | 0,056 | 0,170 | 0,295 |
| Projetado | 0,012 | 0,035 | 0,054 |

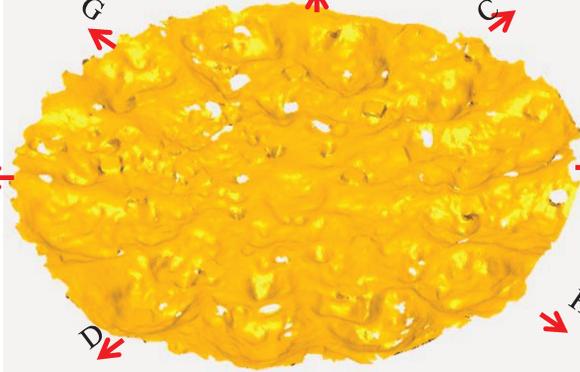
Nota: $^{[V_{Sim.}]}$ Velocidade inicial usada na simulação. $^{[\overline{V_{Res.}}]}$ Velocidade resultante do processo de simulação.

Como o incremento da velocidade de entrada não causou mudanças significativas na velocidade resultante sobre a superfície do leito filtrante, esse modelo de placa tem o potencial de operar em maiores velocidade de filtração com efeitos hidráulicos insignificantes, referentes à deformação do leito sobre a superfície filtrante.

As Tabelas 14 e 15 apresentam os resultados dos ensaios de deformação superficial para o módulo experimental instalado com a placa difusora projetada. Analisando os resultados pode-se observar que a geometria e configuração de placa proposta praticamente não gerou movimentação significativa de material filtrante para as diferentes velocidades utilizadas e espessura do leito filtrante. Esse comportamento comprova os resultados obtidos nas simulações numéricas, que mostraram que esse modelo de placa difusora reduziu a formação de vórtices sobre a superfície do leito filtrante. Esse resultado é produto da interação das partes que contemplam o acessório, “mini defletor”, borda superior e perfurações, que interagem simultaneamente e promovem a distribuição mais homogênea, em relação aos demais modelos testados nessa pesquisa, sobre todo o diâmetro do equipamento.

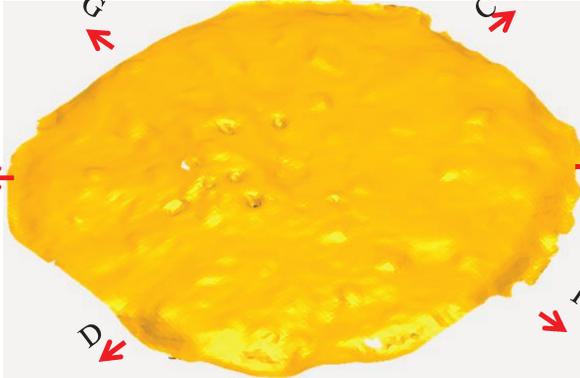
Salienta-se que os resultados encontrados nesses ensaios se aplicam ao equipamento com diâmetro semelhante ou maiores ao módulo experimental, ou seja, de 50 cm. Portanto, se for considerado corpos de filtros com menores diâmetros, o efeito da deformação superficial da camada filtrante pode ser intensificado em razão da interação das linhas de fluxo com a parede do equipamento que neste caso ficaria mais próxima à placa difusora e, conseqüentemente, dos jatos de maiores intensidades de velocidade.

Tabela 14: Análise da deformação superficial do leito filtrante resultante do escoamento de água no sentido descendente sob a interação da placa difusora projetada e com o leito filtrante a 10 cm de distância do acessório.

| Superfície do leito filtrante | D* | Cotas (mm) | | | | |
|---|----|------------|------|------|------|------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Velocidade de 0,5 (m s ⁻¹) | | | | | | |
|  | AB | +12,0 | +7,9 | +3,1 | 0,0 | +6,5 |
| | CD | +6,1 | +6,1 | +3,1 | +1,2 | +4,8 |
| | EF | +4,2 | +5,8 | +3,1 | +2,4 | +3,6 |
| | GH | +6,2 | +4,4 | +3,1 | +3,1 | +2,8 |
| Velocidade de 1,5 (m s ⁻¹) | | | | | | |
|  | AB | +3,1 | 0,0 | -1,2 | +1,1 | -2,1 |
| | CD | +2,1 | +0,6 | -1,2 | +3,6 | +0,9 |
| | EF | +1,2 | +0,8 | -1,2 | +5,3 | +1,1 |
| | GH | +1,6 | 0,0 | -1,2 | +3,7 | +1,3 |
| Velocidade de 2,5 (m s ⁻¹) | | | | | | |
|  | AB | -10,1 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | -5,0 |
| | CD | -8,7 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | -5,9 |
| | EF | -6,7 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | -6,2 |
| | GH | -4,2 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | -3,6 |

Nota: ^[D] diagonal direcionada na superfície do leito filtrante. Valores seguidos do símbolo de soma (+) caracteriza elevação acima do plano de referência e de subtração (-) abaixo desse plano.

Tabela 15: Análise da deformação superficial do leito filtrante resultante do escoamento de água no sentido descendente sob a interação da placa difusora projetada e com o leito filtrante a 20 cm de distância do acessório.

| Superfície do leito filtrante | D* | Cotas (mm) | | | | |
|---|----|------------|------|------|------|------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Velocidade de 0,5 (m s ⁻¹) | | | | | | |
|  | AB | -5,4 | 0,0 | 0,0 | +5,2 | -3,6 |
| | CD | -5,2 | 0,0 | 0,0 | +5,6 | -2,8 |
| | EF | -4,8 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | -2,2 |
| | GH | -3,8 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | -1,8 |
| Velocidade de 1,5 (m s ⁻¹) | | | | | | |
|  | AB | 0,0 | -3,3 | +5,0 | 0,0 | +2,2 |
| | CD | +1,8 | -3,5 | +5,0 | -1,2 | +2,8 |
| | EF | +2,4 | -2,8 | +5,0 | 0,0 | -2,2 |
| | GH | 0,0 | 0,0 | +5,0 | 0,0 | 0,0 |
| Velocidade de 2,5 (m s ⁻¹) | | | | | | |
|  | AB | +0,8 | -0,4 | 0,0 | -0,8 | -0,4 |
| | CD | -2,8 | 0,0 | 0,0 | -1,6 | -0,8 |
| | EF | -0,5 | 0,0 | 0,0 | -2,1 | -1,0 |
| | GH | -6,8 | -2,2 | 0,0 | -1,6 | 0,2 |

Nota: ^[D] diagonal direcionada na superfície do leito filtrante. Valores seguidos do símbolo de soma (+) caracteriza elevação acima do plano de referência e de subtração (-) abaixo desse plano.

4.3.2 Projeto e dimensionamento do dreno

Após a análise das características de escoamento dos drenos comerciais avaliados (cilíndrico, cônico e fundo falso ranhurado) e do estudo de outras propostas utilizando CFD, foi proposto um modelo de dreno cônico circular, que se assemelha com um tipo conhecido comercialmente como “cuca”, mas com algumas distinções, como; aberturas laterais orientadas na horizontal e sem bordas de acoplamento, além do ângulo do arco, como podem ser visto na Figura 34.

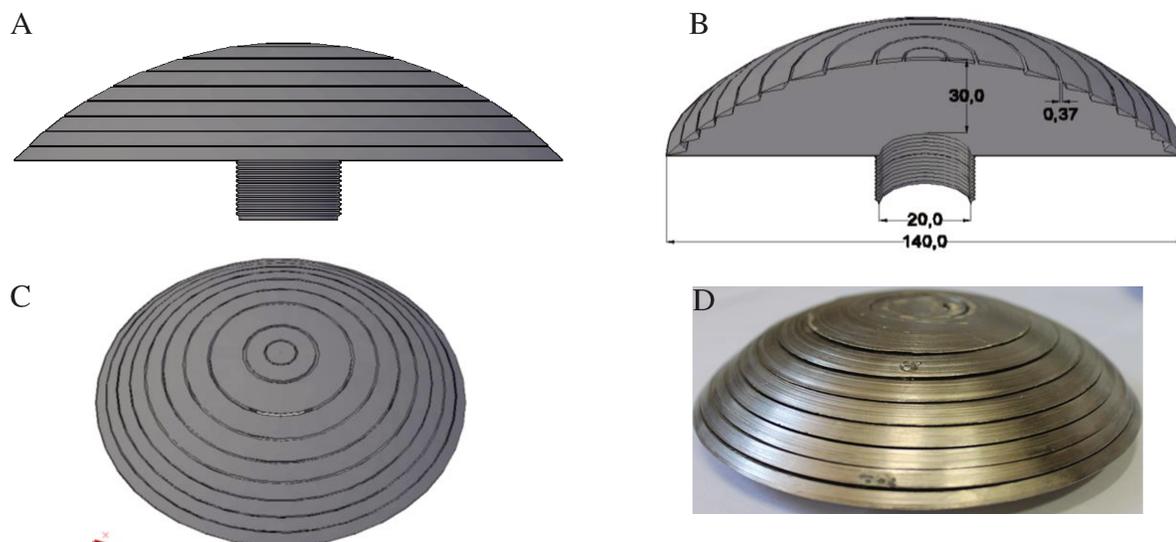


Figura 34: Projeto estrutural do dreno proposto. Onde: ^[A] vista frontal, ^[B] corte xy em perspectiva, ^[C] vista superior, ^[D] Imagem do dreno construído.

O modelo foi desenvolvido buscando proporcionar uma maior área de contato entre o sistema de drenagem e o material filtrante, possibilitando a formação de linhas de fluxo em todas as direções dessa região de contato e, conseqüentemente, reduzindo regiões de estagnação de linhas de fluxo, resultando em uma distribuição homogênea das linhas e promovendo uniformidade na expansão e fluidização do leito filtrante. Nas Figuras 35 e 36, são apresentados os resultados das simulações para o modelo de dreno proposto na presença de leito filtrante e com escoamentos nos sentidos descendente e ascendente (filtragem e retrolavagem), respectivamente. Essas figuras são formadas por mapas do perfil de velocidade encontrados nesses escoamentos e detalhadas pelos vetores dessa variável na dimensão y, formando as linhas de fluxo características de cada escoamento proporcionado pelo modelo de crepina.

Ao analisar a Figura 35 observa-se que a maioria das linhas de escoamento durante o processo de escoamento descendente (filtragem) está perpendicular ao dreno, o que diminui o

potencial de ocorrer turbulência nas entradas dos slots, reduzindo o efeito de perda de pressão. Destaca-se, também, que toda a área do dreno é efetivamente utilizada para o sistema de drenagem, detalhe destacado em linhas tracejadas no mapa para a simulação de velocidade $2,5 \text{ m s}^{-1}$, não apresentando zonas de estagnação ao escoamento.

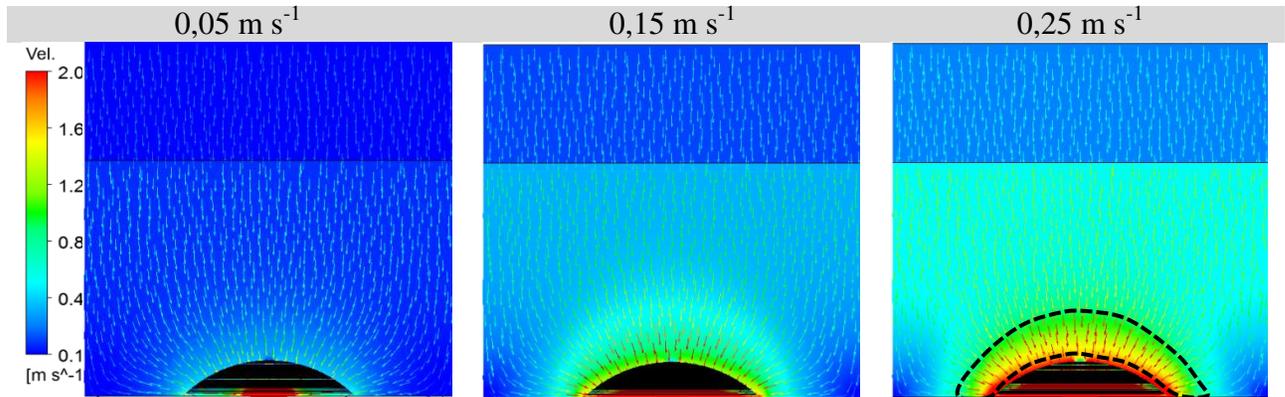


Figura 35: Escoamento característico na região delimitada pelo dreno projetado com o fluxo no sentido descendente (filtragem).

Ao analisar a Figura 36, que caracteriza o escoamento no sentido ascendente (retrolavagem), observa-se, também, que o perfil de escoamento do fluido foi predominantemente perpendicular, não apresentando regiões de estagnação. Destaca-se que, em função da disposição horizontal das aberturas ou *slots*, houve um prolongamento lateral da trajetória das linhas de fluxo, possibilitando uma maior área de atuação por unidade de dreno, como pode ser observado no detalhe com linha tracejada para a o ensaio de $1,5 \text{ m s}^{-1}$. Foi observado também, que o modelo proposto distribui o fluxo uniformemente em todo raio atuante, que propiciará uma fluidização igual em toda a área interna do filtro.

Após a análise dos resultados das simulações construiu-se protótipos desse modelo de dreno que foram submetidos a ensaios laboratoriais para testar sua eficiência na expansão da camada porosa durante o processo de retrolavagem. Ressalta-se que, durante esses ensaios, o módulo experimental estava configurado como mostra o arranjo espacial proposto na Figura 45.

Nos ensaios experimentais, buscou-se identificar a velocidade mínima de fluidização (V_{mf}), que mostra o momento de transição entre o regime de leito estático (fixo) e em movimento, quando as primeiras partículas de areia iniciavam o movimento ascendente conjuntamente com parte superior da camada. Esse tipo de regime não apresenta um intervalo de ocorrência

específico e a definição do momento exato de ocorrência era pouco perceptível, em função do levantamento homogêneo do leito ao aumento da velocidade.

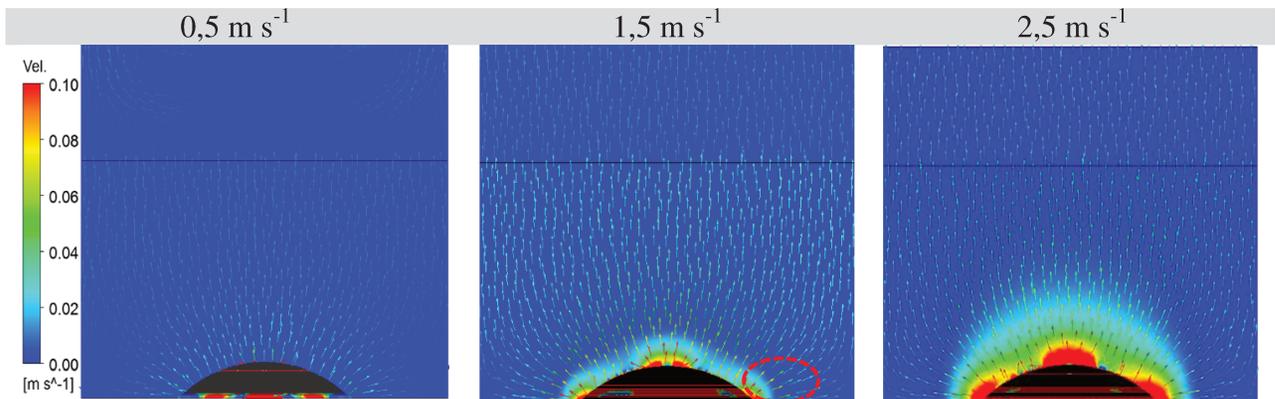


Figura 36: Escoamento característico na região delimitada pelo dreno projetado com o fluxo no sentido ascendente (retrolavagem).

Segundo Salcedo (2010) o regime de camada fixa se caracteriza pela estática do meio filtrante, isso é sem movimentação de partículas, pois as baixas velocidades superficiais não conseguem movimentar a camada que conserva a sua altura inicial (L) de preenchimento e mantém a porosidade constante nessa etapa inicial. A Figura 37 mostra imagens que caracterizam esses dois regimes de escoamento exemplificando a dificuldade de identificar seus comportamentos.

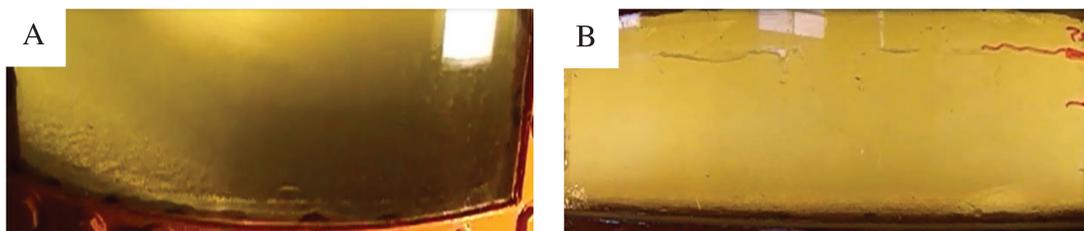


Figura 37: Detalhe dos regimes de escoamento, ^[A] leito fixo e ^[B] início da fluidização. (Foto: Marcio Mesquita)

Com o acréscimo da velocidade de entrada observou-se que a camada sofria perturbações até o momento em que grãos de areia flutuam sobre a superfície, chamado de regime particulado, que ocorre quando a velocidade aplicada provoca a movimentação dos grãos de areia e o início da expansão do leito, por efeito da passagem da água pelos espaços intersticiais da camada (Figura 38A). Logo após esse regime, apareciam na superfície os primeiros indícios de movimentação na forma de jatos borbulhantes ou bolhas (Figura 38B), caracterizando o

aparecimento do regime de camada borbulhante. Salienta-se que a camada borbulhante foi visualizada de forma momentânea e rara.

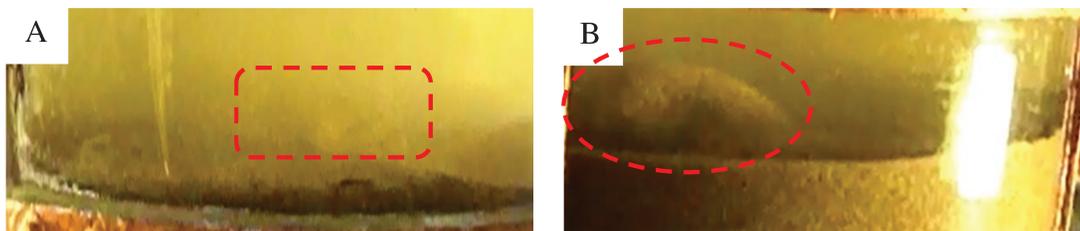


Figura 38: Detalhe dos regimes de escoamento, ^[A] leito particulado e ^[B] borbulhante. (Foto: Marcio Mesquita)

Para Salcedo (2010), a ocorrência do regime borbulhante, em alguns casos, marca o limite entre o final do regime de fluidização particulada e o início do regime de transporte de partículas. O autor sugere que, quando os jatos borbulhantes ocorrem durante o regime de fluidização particulada as características de movimentação e turbulência, ajudam a eliminar e a desgrudar materiais aderidos de difícil remoção. Entretanto, esse regime pode apresentar desvantagens, pois possibilita o levantamento acelerado das partículas de menor diâmetro facilitando a perda ou saída delas do interior do filtro. O aparecimento de borbulhas nas camadas podem ser intensificado ou até mesmo mantido em estado permanente, dada à disposição do arranjo dos drenos nos filtros (sistema de drenagem), pois, essas configurações podem criar fluxos predominantes em regiões preferenciais, isto é, locais onde se concentra maior número de linhas de escoamento canalizadas em determinadas áreas do leito filtrante.

A Figura 39 mostra detalhes do leito fluidizado e expandido em 25%. Destaca-se que durante os ensaios de caracterização e após a camada passar pelo regime borbulhante, ela se expandia de forma homogênea (Figura 39A), sem apresentar zonas específicas de escoamento isolado de fluxo ou caminhos preferenciais. Esse comportamento foi verificado até se atingir expansões de 25% e 50%, valores máximos antes de ocorrer à eliminação de material filtrante pelo sistema de tubulação. A Figura 39B mostra o leito expandido em 25% e, como pode ser observado, totalmente fluidizado e homogêneo, comprovando a hipótese destacada no tópico 4.3.2 de que o dreno projetado distribuía uniformemente o fluxo em toda a área do filtro propiciando uma expansão homogênea.

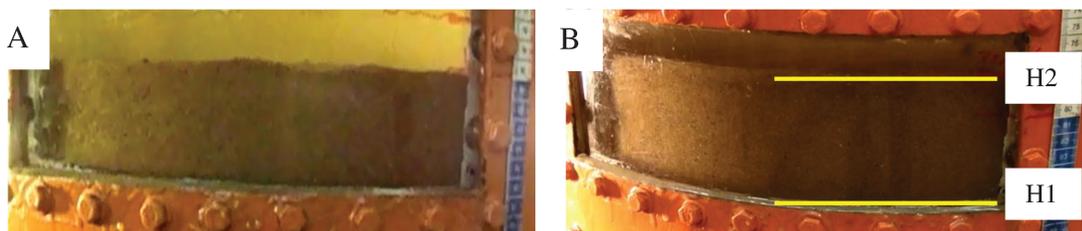


Figura 39: Detalhe dos regimes de escoamento, ^[A] leito fluidizado e ^[B] expandido a 25%. Nota: H1 altura inicial e H2 altura final atingida após atingir a expansão de 25% de leito fluidizado. (Foto: Marcio Mesquita)

A Tabela 16 apresenta os valores médios da velocidade superficial para os três intervalos granulométricos ensaiados e seus respectivos valores de perda de pressão. Salienta-se que os valores de velocidade superficial foram determinados pelo monitoramento da velocidade na tubulação de entrada do fluido e utilizando os conceitos da equação da continuidade calcularam-se os valores correspondentes no interior do protótipo. Destaca-se, também, que durante os ensaios houve dificuldade em identificar os regimes de escoamento em função da homogeneidade em que a camada se expandia.

Tabela 16: Valores de velocidade superficial (Vel.) para os diferentes regimes de expansão do leito filtrante e a correspondente perda de pressão (kPa) para o módulo experimental configurado com os drenos projetados instalados.

| Regimes de escoamento | G1 (0,5 a 1,0 mm) | | G2 (0,8 a 1,2 mm) | | G3 (1,0 a 1,5 mm) | |
|-----------------------|------------------------------|-------------|------------------------------|-------------|------------------------------|-------------|
| | Vel. (m s ⁻¹) | Hf (kPa) | Vel. (m s ⁻¹) | Hf (kPa) | Vel. (m s ⁻¹) | Hf (kPa) |
| V_{mf} | 0,007 | 7,06 | 0,011 | 6,05 | 0,015 | 9,10 |
| Particulado | 0,010 | 8,82 | 0,015 | 9,30 | 0,022 | 15,00 |
| Borbulhante | 0,014 | 12,00 | 0,018 | 12,52 | 0,028 | 19,62 |
| Fluidizado | 0,018 | 16,14 | 0,020 | 13,70 | 0,030 | 25,40 |
| Expandido em 25% | 0,020 | 18,21 | 0,023 | 17,76 | 0,033 | 30,86 |

Ao comparar os resultados encontrados com Salcedo (2010) verifica-se que os drenos projetados apresentaram reduções nos valores de velocidade superficial para se atingir os diferentes regimes de escoamento durante a retrolavagem. Esse comportamento mostra que com a redução dos valores de velocidade, a lavagem do leito filtrante dependerá menos do sistema de bombeamento e, conseqüentemente, disponibilizaria mais vazão ao sistema de irrigação durante as inversões de retrolavagem de algum equipamento, maximizando, assim, a eficiência do conjunto de filtragem utilizado. Adicionalmente, acredita-se que com a homogeneização do leito

haverá maiores eficiências na limpeza do leito filtrante, por possibilitar maior probabilidade de atrito entre grãos de areia e desprendimento de impurezas das partículas e, conseqüentemente, maiores durações no tempo de filtragem.

Essas afirmações estão de acordo com Salcedo (2010) que afirmou que o funcionamento ótimo dos filtros no processo da retrolavagem depende da homogeneidade do levantamento da camada desde o início da mínima fluidização, que vai afetar a realização de uma limpeza efetiva tanto da superfície como em profundidade da camada de areia.

Assim, baseando-se nos resultados apresentados nessa seção da pesquisa, fica evidente que o modelo de protótipo de dreno e o arranjo do sistema de drenagem proposto, resultaram em melhores desempenhos hidráulicos em relação aos demais equipamentos ensaiados.

4.4 Projeto e avaliação hidráulica de um protótipo de filtro

4.4.1 Partes e montagem do protótipo de filtros

O protótipo de filtro foi projetado e construído seguindo padrões comerciais indicados por Mesquita (2010). Dessa forma, o equipamento se caracterizava por ter corpo cilíndrico, uma tubulação no tampão superior na posição vertical centralizada, duas tubulações no tampão inferior, uma na vertical e outra na horizontal, que funcionam como entrada e saída de água dependendo do sentido de escoamento do fluido (ascendente ou descendente), duas aberturas para manutenção interna e manuseio da camada de areia, instaladas respectivamente, na parte superior próxima a entrada de água e outra na lateral do corpo do filtro, um fundo falso para instalação dos drenos, soldado logo abaixo da intersecção da entrada lateral de manutenção, com toda estrutura construída em aço doce 1020. A Figura 40 mostra o projeto estrutural do protótipo com as suas dimensões.

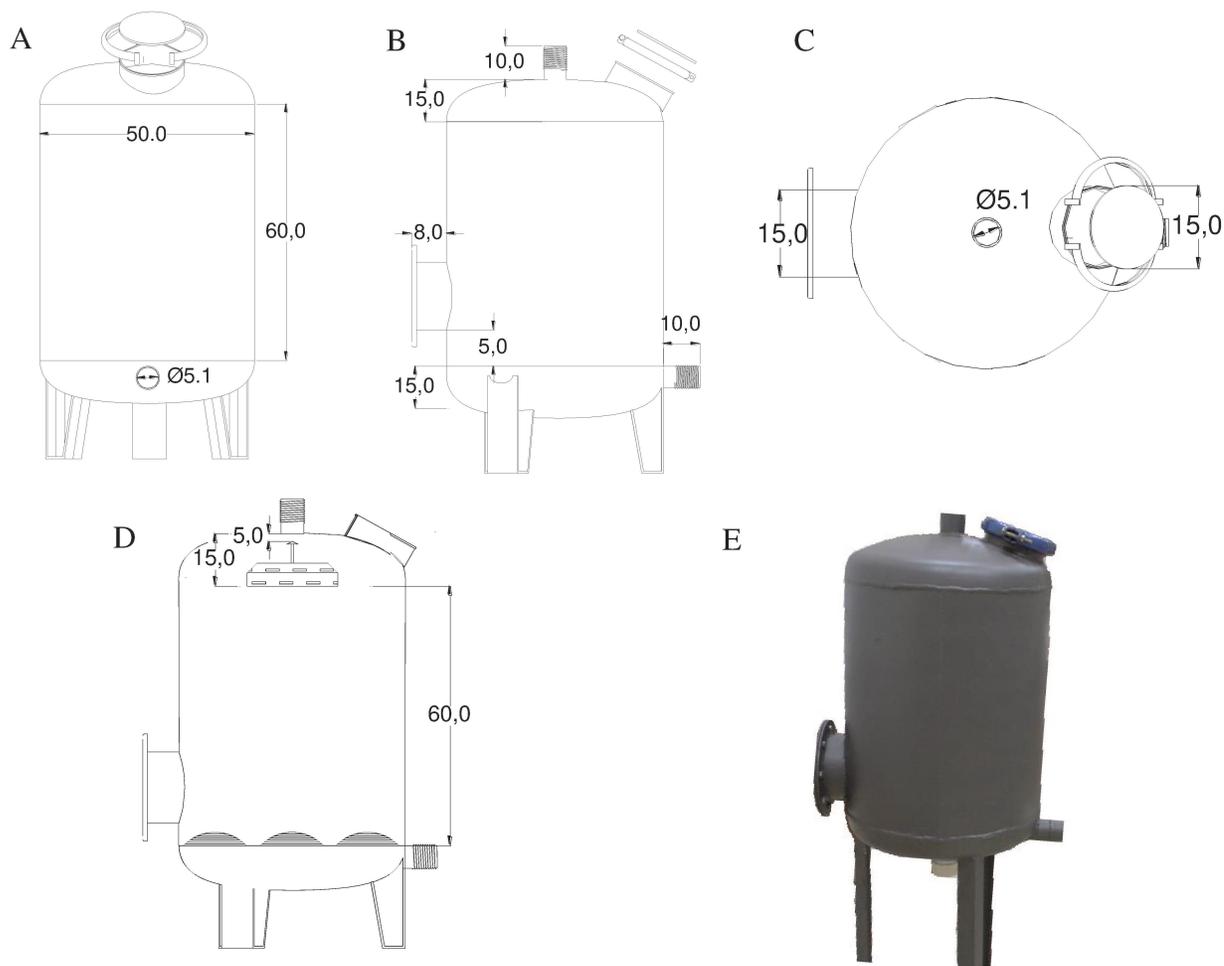


Figura 40: Esquema estrutural do protótipo. Nota: ^[A] Vista frontal, ^[B] Vista lateral, ^[C] Vista superior, ^[D] Corte xy, ^[E] Imagem do protótipo construído.

A Figura 41 mostra detalhes do projeto da placa difusora projetada e selecionada para uso no protótipo de filtro, com destaque para as aberturas laterais e os furos na base da placa, e também para o “mini defletor” instalado em prolongamento superior da base da placa, características consideradas diferenciadas dos modelos comerciais existentes.

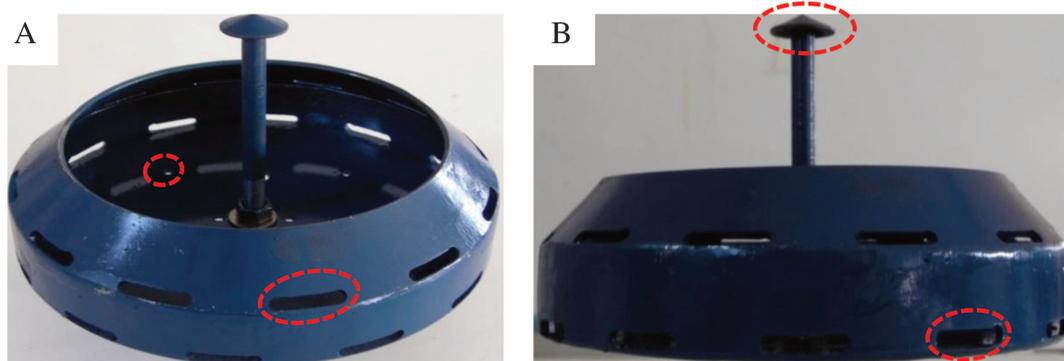


Figura 41: Placa difusora projetada. Nota: ^[A] Perspectiva superior, ^[B] Vista frontal. (Foto: Marcio Mesquita)

A instalação definitiva da placa difusora no corpo do filtro é mostrada na Figura 42, ficando disposta a 15 cm de distância da base superior da calota, valor definido para permitir uma separação de 5 cm entre a entrada do fluido e o mini defletor.

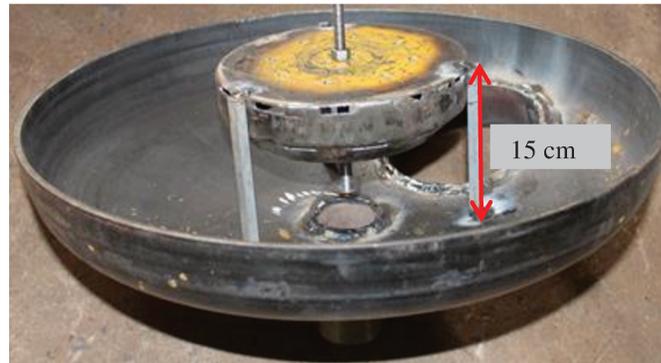


Figura 42: Detalhe da instalação da placa difusora. (Foto: Marcio Mesquita)

A Figura 43 mostra detalhes de uma peça de dreno que foi projetado, construído e instalado no protótipo de filtro. Os drenos foram construídos a partir da união de anéis usinados em aço doce 1020. O detalhe [B] dessa figura mostra que os anéis foram unidos internamente por “pingos” de solda buscando-se praticidade na execução do processo de fabricação e para evitar o acréscimo de outras estruturas que pudessem promover perturbações durante o escoamento do fluido. Salienta-se que esse acessório pode ser construído de outros materiais como, por exemplo, o polipropileno ou poliestireno, inox ou outros materiais resistentes às forças hidrodinâmicas atuantes no processo de filtração e retrolavagem, e que possuam a facilidade de moldagem e fabricação em escala.

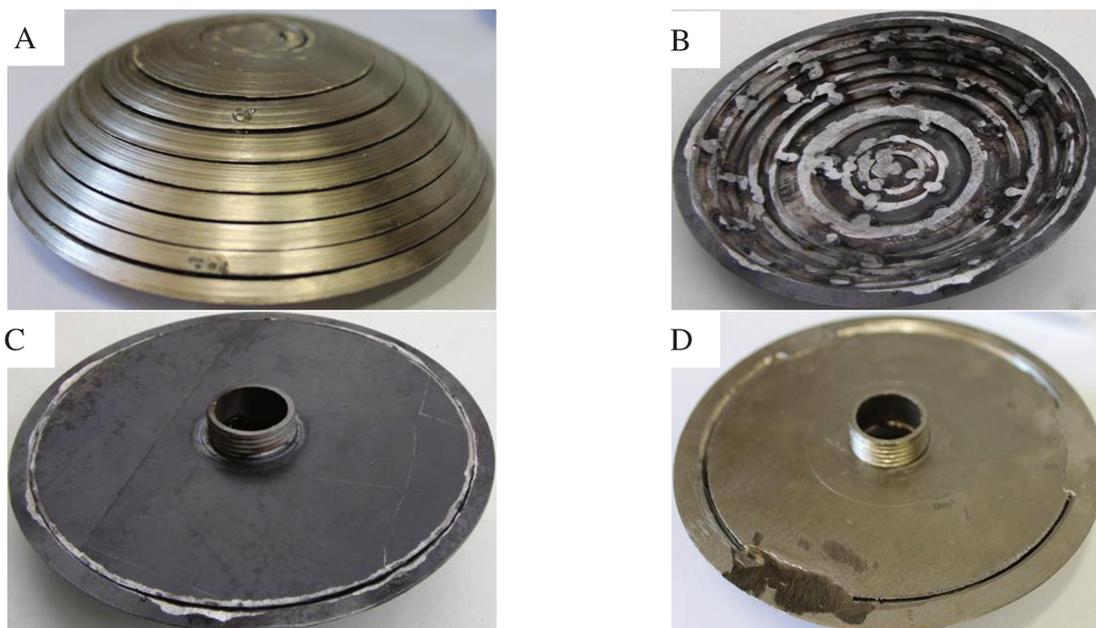


Figura 43: Dreno projetado. Nota: ^[A] vista frontal, ^[B] corte interno detalhe da união dos anéis, ^[C] perspectiva vista inferior, ^[D] detalhe da distinção do banho químico visto pelo plano inferior. (Foto: Marcio Mesquita)

As características dimensionais do dreno seguem na Tabela 17. Destaca-se que foram construídos drenos com dois diâmetros distintos, denominados D1 e D2, visando facilitar o arranjo do sistema de drenagem e maximizar a área de ação de cada dreno no protótipo.

Tabela 17: Características dimensionais dos drenos projetados.

| Característica | D1 | D2 |
|--|-------|-------|
| Diâmetro da base (cm) | 14,00 | 8,00 |
| Altura interna do equipamento (cm) | 3,00 | 3,00 |
| Área total do dreno para drenagem- A_{TD} (cm ²) | 8,44 | 4,58 |
| Altura livre da abertura (slot) (cm) | 0,037 | 0,037 |
| Número de aberturas por dreno | 9 | 9 |
| Número de drenos no protótipo | 6 | 1 |

Nota: ^[A]_{TD} somatório das áreas individuais de cada slot (abertura livre para passagem de água filtrada).

Os drenos foram rosqueados no fundo falso do protótipo e os locais de suas instalações foram definidos a partir de um arranjo espacial indicado pela metodologia de polígonos de Thiessen (TUCCI, 2009), utilizada para representação da área de atuação de estações meteorológica (Figura 44A). Esse método de definição da área de atuação dos drenos foi utilizado por Burt (2010) na caracterização física de filtros de areia avaliados em testes laboratoriais. Adicionalmente, considerou-se nesse arranjo, a partir dos resultados das simulações, que cada dreno atua em uma distância de 2 cm com velocidade média com potencial

de arraste da partícula de areia. Na figura está destacado o valor numérico da área hachurada como sendo de região atuante de cada dreno, que foi posteriormente corrigida devido aos resultados das simulações. A Figura 44B, mostra região hachurada em azul, que é a efetiva zona de atuação dos drenos dimensionados, e em preto, área com menor escoamento de linhas de corrente nos dois sentidos, ascendente e descendente. Salienta que esse arranjo permitiu uma área de atuação efetiva de 84%, tanto nos processos de filtração e retrolavagem.

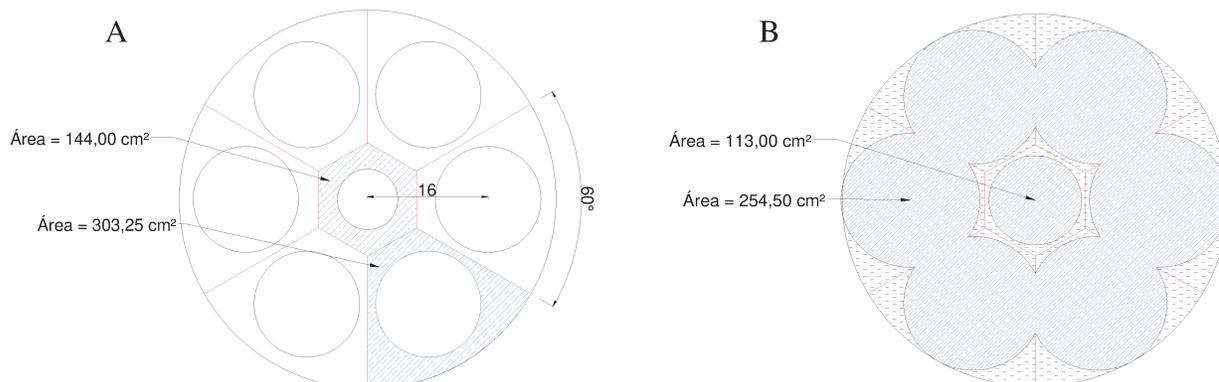


Figura 44: Arranjo da instalação dos drenos no fundo falso do protótipo. Nota: ^[A] arranjo destacado, com os polígonos de Thiessen, a área de atuação de cada dreno; ^[B] correção da área de atuação de cada dreno.

A Figura 45 mostra detalhe os drenos instalados segundo o arranjo dimensionado para o protótipo. Ressalta-se que essa imagem foi obtida com os drenos instalados no fundo falso do módulo experimental, devido a possibilidade de capturar a imagem pela facilidade de sua desmontagem.



Figura 45: Detalhe do fundo falso com drenos rosqueados e instalados de acordo com o arranjo espacial proposto. (Foto: Marcio Mesquita)

A Tabela 18 mostra as características dimensionais do sistema de drenagem do equipamento dimensionando, resultado do arranjo estrutural proposto para o protótipo de filtro.

Tabela 18: Características dimensionais do sistema de drenagem do protótipo de filtro

| Característica | Protótipo |
|--|-----------|
| Área superficial do protótipo- A_{sup} . (cm ²) | 1963,50 |
| Área atuante por linhas de fluxo- A_{ALF} (cm ²) | 1640,00 |
| Porcentagem de área superficial atuante- P_{ASA} | 84% |
| Área de drenagem total do protótipo- A_{DT} (cm ²) | 55,22 |
| Área efetiva de drenagem- A_{ED} (cm ² cm ⁻²) | 0,028 |

Onde: $[A_{sup}]$ área superficial disponível para o leito filtrante; $[A_{ALF}]$ área onde há maior atuação das linhas de fluxo durante o escoamento descendente e ascendente; (P_{ASA}) porcentagem de A_{sup} . com maior atuação das linhas de fluxo; $[A_{DT}]$ área total dos drenos disponível para drenagem; $[A_{ED}]$ razão entre A_{DT} e A_{sup} .

4.4.2 Avaliação hidráulica do protótipo de filtro

A partir dos valores médios de perda de pressão do protótipo em função da velocidade de escoamento do afluente, para as condições sem e com leito filtrante, e subtraindo-se os valores de perda de pressão distribuídas das tubulações e localizadas das conexões, que estão apresentados nas Tabelas 19, 20, 21 e 22, confeccionaram-se as curvas apresentadas nas Figuras 46, 47 e 48. Os dados experimentais correspondentes aos ensaios laboratoriais são apresentados nas Tabelas 35, 36, 37 e 38 no **Anexo 8.4**.

Tabela 19: Valores médios de perda de pressão (kPa) em função da velocidade de escoamento (m s⁻¹) para protótipo de filtro vazio (sem leito filtrante) para os escoamentos nas direções coincidentes à filtragem e retrolavagem.

| Velocidade (m s ⁻¹) | Filtragem* | | | Retrolavagem** | | |
|------------------------------------|------------|----------|------|----------------|----------|------|
| | Hf (kPa) | σ | CV | Hf (kPa) | σ | CV |
| 0,5 | 1,97 | 0,05 | 0,03 | 1,58 | 0,19 | 0,13 |
| 1,0 | 2,81 | 0,24 | 0,09 | 2,14 | 0,09 | 0,04 |
| 1,5 | 3,15 | 0,39 | 0,12 | 2,78 | 0,07 | 0,02 |
| 2,0 | 4,08 | 0,56 | 0,14 | 3,99 | 0,57 | 0,14 |
| 2,5 | 5,44 | 0,39 | 0,07 | 4,95 | 0,69 | 0,14 |

Onde: processo de escoamento coincidente ao processo de filtragem* e retrolavagem**.

Tabela 20: Valores médios de perda de pressão (kPa) em função da velocidade de escoamento ($m s^{-1}$) para protótipo de filtro com leito filtrante nas alturas H1 e H2, respectivamente, 30 e 45 cm, e formado com granulometria 0,5 a 1,0 mm, para os escoamentos nas direções coincidentes à filtração e retrolavagem. .

| Vel. | Filtração | | | | | | Retrolavagem | | | | | |
|------|------------|----------|------|------------|----------|------|--------------|----------|------|------------|----------|------|
| | H1 (30 cm) | | | H2 (45 cm) | | | H1 (30 cm) | | | H2 (45 cm) | | |
| | Hf | σ | CV | Hf | σ | CV | Hf | σ | CV | Hf | σ | CV |
| 0,5 | 4,33 | 0,17 | 0,04 | 5,44 | 0,16 | 0,03 | 4,27 | 0,29 | 0,07 | 5,16 | 0,16 | 0,03 |
| 1,0 | 8,22 | 0,26 | 0,03 | 9,41 | 0,16 | 0,02 | 8,66 | 0,71 | 0,08 | 9,57 | 0,36 | 0,04 |
| 1,5 | 12,96 | 0,20 | 0,02 | 15,76 | 0,34 | 0,02 | 12,94 | 0,69 | 0,05 | 13,00 | 0,75 | 0,06 |
| 2,0 | 17,92 | 1,78 | 0,10 | 24,85 | 0,05 | 0,00 | 18,21 | 1,45 | 0,08 | 20,43 | 2,91 | 0,14 |
| 2,5 | 25,73 | 0,48 | 0,02 | 33,54 | 0,64 | 0,02 | 25,79 | 1,01 | 0,04 | 30,57 | 2,24 | 0,07 |

Onde: processo de escoamento coincidente ao processo de filtração* e retrolavagem**. ^[Vel.] Velocidade em $m s^{-1}$ e Hf em kPa

Tabela 21: Valores médios de perda de pressão (kPa) em função da velocidade de escoamento ($m s^{-1}$) para protótipo de filtro com leito filtrante nas alturas H1 e H2, respectivamente, 30 e 45 cm, e formado com granulometria 0,8 a 1,2mm, para os escoamentos nas direções coincidentes à filtração e retrolavagem.

| Vel. | Filtração* | | | | | | Retrolavagem** | | | | | |
|------|------------|----------|------|------------|----------|------|----------------|----------|------|------------|----------|------|
| | H1 (30 cm) | | | H2 (45 cm) | | | H1 (30 cm) | | | H2 (45 cm) | | |
| | Hf | σ | CV | Hf | σ | CV | Hf | σ | CV | Hf | σ | CV |
| 0,5 | 3,47 | 0,05 | 0,01 | 4,47 | 0,26 | 0,06 | 4,23 | 0,43 | 0,10 | 4,03 | 0,62 | 0,15 |
| 1,0 | 5,46 | 0,56 | 0,10 | 5,89 | 0,25 | 0,04 | 5,78 | 0,55 | 0,09 | 5,77 | 0,98 | 0,17 |
| 1,5 | 8,44 | 0,39 | 0,05 | 9,86 | 0,04 | 0,00 | 8,64 | 0,61 | 0,07 | 9,29 | 0,87 | 0,09 |
| 2,0 | 13,97 | 0,30 | 0,02 | 14,47 | 0,79 | 0,05 | 13,65 | 0,87 | 0,06 | 13,90 | 0,53 | 0,04 |
| 2,5 | 17,28 | 1,44 | 0,08 | 20,02 | 0,77 | 0,04 | 19,80 | 2,28 | 0,12 | 20,06 | 0,59 | 0,03 |

Onde: processo de escoamento coincidente ao processo de filtração* e retrolavagem**. ^[Vel.] Velocidade em $m s^{-1}$ e Hf em kPa

Tabela 22: Valores médios de perda de pressão (kPa) em função da velocidade de escoamento ($m s^{-1}$) para protótipo de filtro com leito filtrante nas alturas H1 e H2, respectivamente, 30 e 45 cm, e formado com granulometria 1,0 a 1,5mm, para os escoamentos nas direções coincidentes à filtração e retrolavagem.

| Vel. | Filtração* | | | | | | Retrolavagem** | | | | | |
|------|------------|----------|------|------------|----------|------|----------------|----------|------|------------|----------|------|
| | H1 (30 cm) | | | H2 (45 cm) | | | H1 (30 cm) | | | H2 (45 cm) | | |
| | Hf | σ | CV | Hf | σ | CV | Hf | σ | CV | Hf | σ | CV |
| 0,5 | 2,35 | 0,18 | 0,08 | 2,66 | 0,00 | 0,00 | 2,59 | 0,18 | 0,07 | 3,07 | 0,13 | 0,04 |
| 1,0 | 3,77 | 0,21 | 0,06 | 4,12 | 0,23 | 0,05 | 4,93 | 0,26 | 0,05 | 5,10 | 0,62 | 0,12 |
| 1,5 | 6,10 | 0,1 | 0,02 | 6,14 | 0,46 | 0,07 | 8,98 | 0,48 | 0,05 | 9,19 | 0,54 | 0,06 |
| 2,0 | 9,11 | 0,51 | 0,06 | 9,54 | 0,39 | 0,04 | 14,10 | 0,14 | 0,01 | 14,10 | 1,11 | 0,08 |
| 2,5 | 13,34 | 0,43 | 0,03 | 13,92 | 1,45 | 0,10 | 16,71 | 0,00 | 0,00 | 17,22 | 1,93 | 0,11 |

Onde: processo de escoamento coincidente ao processo de filtração* e retrolavagem**. ^[Vel.] Velocidade em $m s^{-1}$ e Hf em kPa

A Figura 46 mostra as curvas dos valores médios de perda de pressão do protótipo vazio, com escoamentos nos sentidos coincidente ao processo de filtragem e retrolavagem, em função da velocidade da água na tubulação de entrada (Figura 46A) e evidencia a comparação dos intervalos de confiança de 95% para esses dados (Figura 46B). Observa-se pela Figura 46A, que a perda de pressão é proporcional ao aumento da velocidade, com comportamento exponencial evidenciado pelo valor de R^2 igual 0,98, e de $P < 0,001$, em ambos os sentidos de escoamento, filtragem e retrolavagem, além de indicarem correlação significativa das variáveis experimentais. Esse comportamento foi semelhante ao encontrado por Burt (2010), Salcedo (2010) e Mesquita et al. (2012).

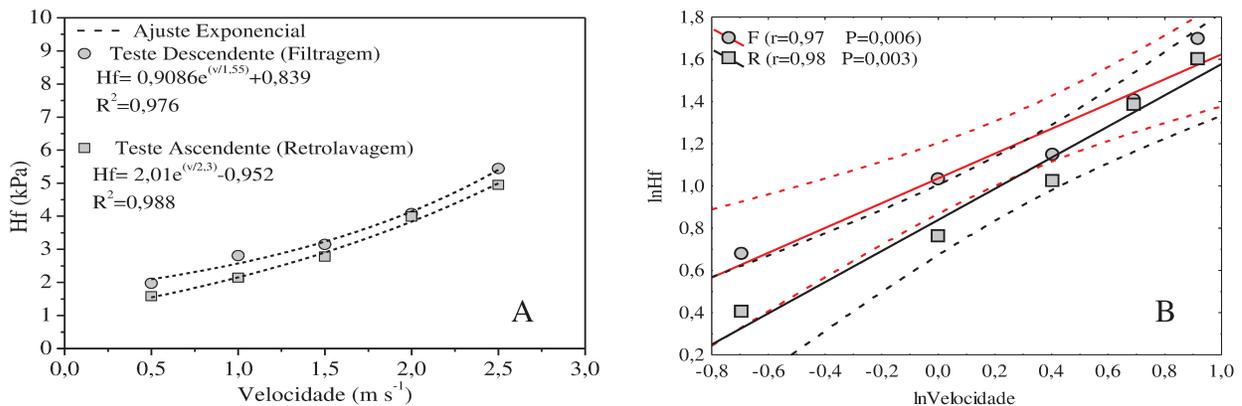


Figura 46: ^[A] Variação de perda de pressão (kPa) para o protótipo vazio em função da velocidade (m s⁻¹) para o escoamento coincidente aos processos de filtragem e retrolavagem. ^[B] Intervalo de confiança a 95% para os dois processos de escoamento. Nota: ^[F] escoamento no sentido coincidente ao processo da filtragem e ^[R] da retrolavagem.

Pela Figura 46 é possível observar que a perda de pressão durante o processo de escoamento descendente (filtragem) apresentou maiores valores do que o sentido ascendente (retrolavagem). Contudo, observa-se pela análise no intervalo de confiança que não há diferenças significativas para os valores de 2,0 e 2,5 m s⁻¹. Esse comportamento da perda de pressão ser maior para a filtragem em relação à retrolavagem, está em concordância com os resultados encontrados por Burt (2010), quando analisou cinco tipos diferentes de filtros de areia, e contrário ao estudo de Mesquita et al. (2012), que avaliaram três tipos de filtros de areia comercial, e encontraram maiores valores para o processo de retrolavagem. A discordância do efeito encontrado em relação ao fenômeno obtido por Mesquita et al. (2012) pode ser justificada pela interação que os modelos dos acessórios causam no escoamento, o que torna difícil a identificação de uma tendência.

Ao analisar o valor de perda de pressão para o escoamento descendente (filtragem) no protótipo vazio na velocidade de $1,5 \text{ m s}^{-1}$, que corresponde a taxa de filtração (relação entre a vazão de escoamento do fluido pela área do equipamento) de $54 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, encontrou-se o valor de 3,2 kPa, enquanto Burt (2010) obteve para condições correlatas, aproximadamente, 12,8; 9,7; e 7,2 kPa, respectivamente, para três diferentes modelos de filtros. Em outro estudo, Mesquita et al. (2012) deparou com valores de 9,7; 2,8 e 2,8 kPa para três modelos de equipamento ensaiados na taxa de filtração de $60 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. Esses valores mostram que a perda de pressão do protótipo foi menor em relação à maioria dos demais equipamentos avaliados, exceto para dois filtros ensaiados por Mesquita et al. (2012), como apresentado na Tabela 23.

Tabela 23: Relação de perdas de pressão para diferentes filtros ensaiados vazios com o escoamento descendente, coincidente ao processo de Filtragem.

| Fonte | Modelo | A_{ED} ($\text{cm}^2 \text{cm}^{-2}$) | TF ($\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{h}^{-1}$) | Hf (kPa) | TF ($\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{h}^{-1}$) | Hf (kPa) | TF ($\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{h}^{-1}$) | Hf (kPa) |
|---------------------------|------------|--|--|-------------|--|-------------|--|-------------|
| Projetado | - | 0,028 | 18,0 | 2,0 | 54,0 | 3,2 | 90,0 | 5,4 |
| MESQUITA et al. (2012) | F1 | 0,056 | | 3,4 | | 9,7 | | 23,1 |
| | F2 | 0,061 | 20,0 | 1,1 | 60,0 | 2,8 | 100,0 | 7,3 |
| | F3 | 0,044 | | 1,2 | | 2,8 | | 6,7 |
| BURT (2010) | Arkal | 0,017 | | 3,5 | | 12,8 | | |
| | Flow-Guard | 0,016 | 29,2 | 2,9 | 58,4 | 9,7 | - | - |
| | Lakos | 0,035 | | 2,2 | | 7,2 | | |

Nota: ^[TF] taxa de filtração (relação entre a vazão de escoamento do fluido pela área do equipamento)

Contudo, para o escoamento ascendente (retrolavagem) (Tabela 24), a perda de pressão do protótipo foi de 2,8 kPa, enquanto para Mesquita et al. (2012) foram encontrados 11,9; 5,1; 10,3 kPa, e por (BURT 2010) 10,3 e 6,9 kPa, mostrando que os acessórios projetados reduziram a sua contribuição no processo de perda de pressão para essa condição de taxa de filtração.

Tabela 24: Relação de perdas de pressão para diferentes filtros ensaiados vazios com o escoamento ascendente, coincidente ao processo de Retrolavagem.

| Fonte | Modelo | A_{ED} ($\text{cm}^2 \text{cm}^{-2}$) | TF ($\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{h}^{-1}$) | Hf (kPa) | TF ($\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{h}^{-1}$) | Hf (kPa) | TF ($\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{h}^{-1}$) | Hf (kPa) |
|---------------------------|------------|--|--|-------------|--|-------------|--|-------------|
| Projetado | - | 0,028 | 18,0 | 1,6 | 54,0 | 2,8 | 90,0 | 5,0 |
| MESQUITA et al. (2012) | F1 | 0,056 | | 1,8 | | 11,9 | | 32,1 |
| | F2 | 0,061 | 20,0 | 1,4 | 60,0 | 5,1 | 100,0 | 12,8 |
| | F3 | 0,044 | | 1,7 | | 10,3 | | 25,1 |
| BURT (2010) | Arkal | 0,017 | | 3,4 | | 10,3 | | |
| | Flow-Guard | 0,016 | 29,2 | 2,8 | 58,4 | - | - | - |
| | Lakos | 0,035 | | 2,7 | | 6,9 | | |

Nota: ^[TF] taxa de filtração (relação entre a vazão de escoamento do fluido pela área do equipamento)

A Figura 47 apresenta as curvas dos valores médios de perda de pressão (kPa) em função da velocidade (m s^{-1}) para os ensaios de caracterização hidráulica do protótipo para o escoamento descendente, coincidente ao processo de filtração, para os três intervalos granulométricos (G1, G2 e G3) e para duas alturas da camada filtrante (H1 e H2). Também são disponibilizados para cada condição de ensaio, os gráficos que mostram os intervalos de confiança a 95% de significância dos dados linearizados, com o objetivo de comparar os efeitos das alturas H1 e H2 no processo de perda de pressão. O **Anexo 8.5** apresenta as análises de variância das funções exponenciais das curvas mostradas nos gráficos, Tabelas 39, 40, 41, 42, 43, 44, e 45. As equações de perda de pressão características de cada ajuste são apresentadas na Tabela 53 no **Anexo 8.6**.

Nota-se na Figura 47, que o comportamento do filtro na presença do leito filtrante seguiu a mesma tendência encontrada nos ensaios com o protótipo vazio, isto é, as curvas mostraram ajuste exponencial e o fenômeno de perda de pressão foi proporcional ao aumento da velocidade. Destaca-se que o aumento da altura do leito filtrante aumentou a perda de pressão, efeito que está de acordo com os resultados descritos por Burt (2010) e Mesquita A et al. (2012). Esses aumentos foram aproximadamente de 5 % para os ensaios com G1 e G2, e de 1 % em G3, areia mais grossa, nos ensaios com taxa de filtração a $54 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ que correlaciona-se a uma velocidade de escoamento de $1,5 \text{ m s}^{-1}$, como pode ser observado na Tabela 25, que apresenta os valores de porcentagem da contribuição da camada porosa na perda de pressão em diferentes ensaios. Contudo, ao observar os intervalos de confiança, nota-se que o efeito da altura do leito filtrante não foi significativo na perda de pressão para as granulometrias G2 e G3. Mesquita et al. (2012), identificou durante os ensaios que a perda de pressão foi diretamente proporcional ao aumento da espessura da camada porosa, para as três granulometrias G1, G2 e G3.

A contribuição dos acessórios projetados na perda de pressão para a taxa de filtração a $54 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ e granulometria G1 (Tabela 25), foi em média de 22% (para as duas alturas) com a camada porosa contribuindo com 78%. Mesquita et al. (2012) testando três filtros de areia, para TF a $60 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ e granulometria G1, encontraram valores variando entre 62,1 e 87 % para o leito filtrante e, conseqüentemente, de 37,9 e 13 %, para estrutura física do equipamento. Arbat et al. (2011), analisando filtros de areia utilizando a simulação por fluidodinâmica computacional, identificaram que, 84,6% da perda de pressão total em filtros de areia são originados pelo leito filtrante e o restante, 15,4% pela estrutura do equipamento. Ponciano de Deus et al. (2013)

identificaram uma contribuição de 16% para a estrutura física do filtro (placa difusora plana com bordas e drenos cilíndricos) e 84% para leito filtrante.

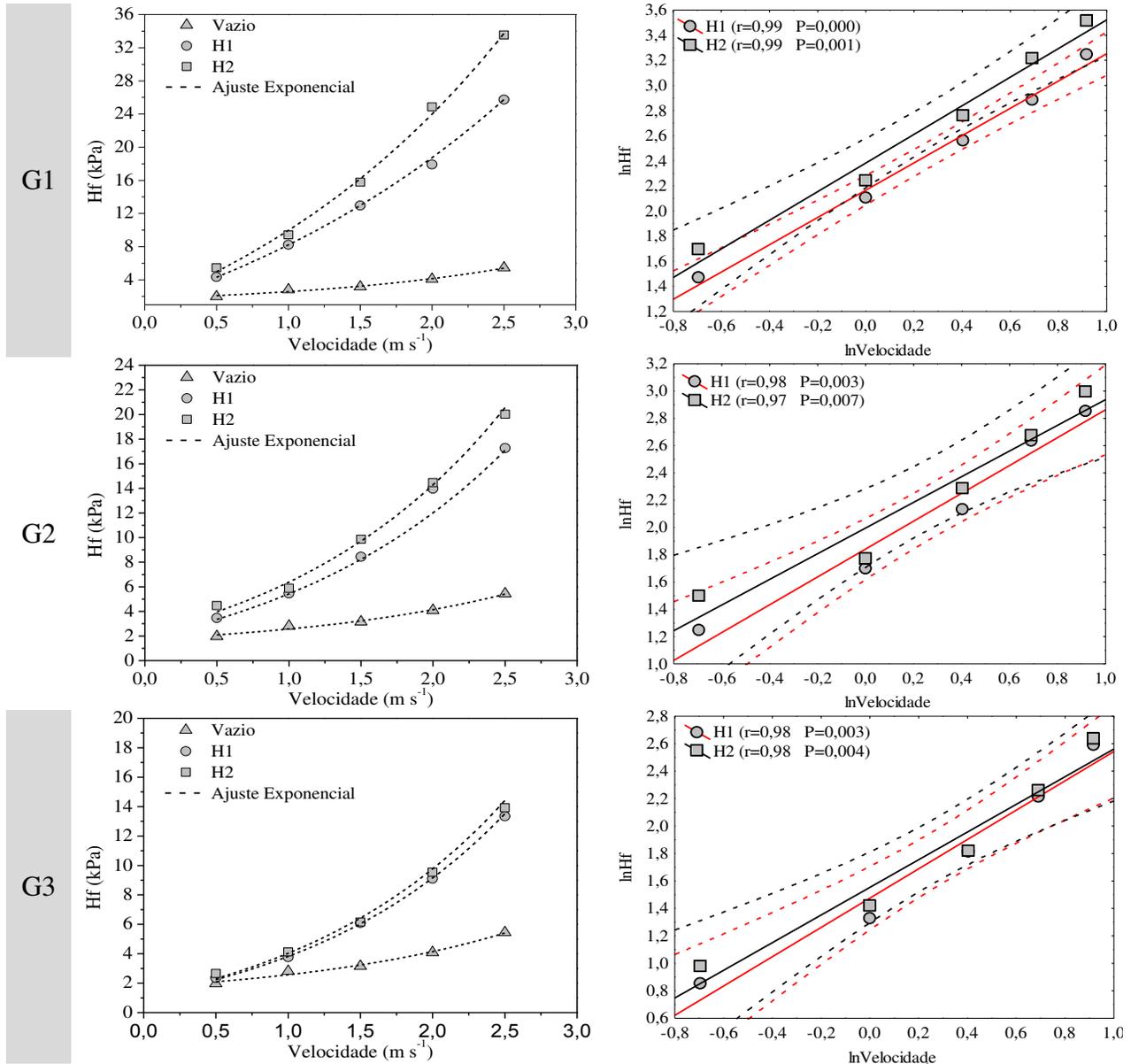


Figura 47: Variação de perda de pressão (kPa) em função da velocidade ($m s^{-1}$) para os ensaios com escoamento no sentido descendente, coincidente ao processo de filtragem para duas camadas filtrante e três granulometrias de areia (gráfico a esquerda), e, a direita, intervalo de confiança a 95% comparando o efeito da variação de altura do leito filtrante na perda de pressão. [G1, G2 e G3] intervalo granulométrico; 0,5 a 1,0; 0,8 a 1,2 e 1,0 a 1,5 mm.

As comparações entre as diferentes pesquisas mostram que o protótipo projetado apresentou maior relação de contribuição para a estrutura física. Porém destaca-se, que para essa mesma condição TF em aproximadamente $60 m^3 m^{-2} h^{-1}$ e granulometria G1, os valores absolutos

de perda de pressão foram menores para o protótipo com 12,96 e 15,76 kPa, respectivamente, para H1 e H2, enquanto Mesquita et al. (2012) encontrou para F1: 25,6 e 29,4 kPa; F2: 21,9 e 26,8 kPa, F3: 12,9 e 16,1 kPa. Ressalta-se, também, que o protótipo possui menor área aberta para drenagem, o que poderia justificar maior contribuição dos acessórios.

Tabela 25: Porcentagens de contribuição do leito filtrante na perda de pressão de filtros de areia durante o escoamento no sentido descendente (filtração) em relação à taxa de filtração e a diferentes granulometrias.

| Fonte | Modelo do Filtro | Condições de Ensaio | | | | | | |
|------------------------|------------------|--|------|------|------|------|------|------|
| | | TF ($\text{m}^3\text{m}^{-2}\text{h}^{-1}$) | G1 | | G2 | | G3 | |
| | | | H1 | H2 | H1 | H2 | H1 | H2 |
| Protótipo | - | 54 | 75,8 | 80,0 | 62,5 | 68,0 | 48,3 | 49,0 |
| MESQUITA et al. (2012) | F1 | 60 | 62,1 | 67,0 | 38,6 | 49,7 | 33,6 | 38,6 |
| | F2 | | 78,3 | 82,6 | 65,9 | 72,0 | 58,2 | 64,1 |
| | F3 | | 87,0 | 89,6 | 82,7 | 78,8 | 51,7 | 67,4 |

A Figura 48 apresenta as curvas dos valores médios de perda de pressão (kPa), resultados encontrados durante os ensaios de caracterização hidráulica do protótipo para o escoamento no sentido ascendente, coincidente ao processo de retrolavagem, para os três intervalos granulométricos (G1, G2 e G3), destacado a esquerda da figura. A Figura 48 também mostra os intervalos de confiança a 95% de significância, dos dados linearizados, com o objetivo de comparar os efeitos das alturas H1 e H2 no processo de perda de pressão do equipamento para esse sentido de escoamento. O **Anexo 8.5** apresenta as análises de variância das funções exponenciais das curvas mostradas nos gráficos, Tabelas 46, 47, 48, 49, 50, 51 e 52. As equações de perda de pressão características de cada ajuste são apresentadas na Tabela 53 no **Anexo 8.6**.

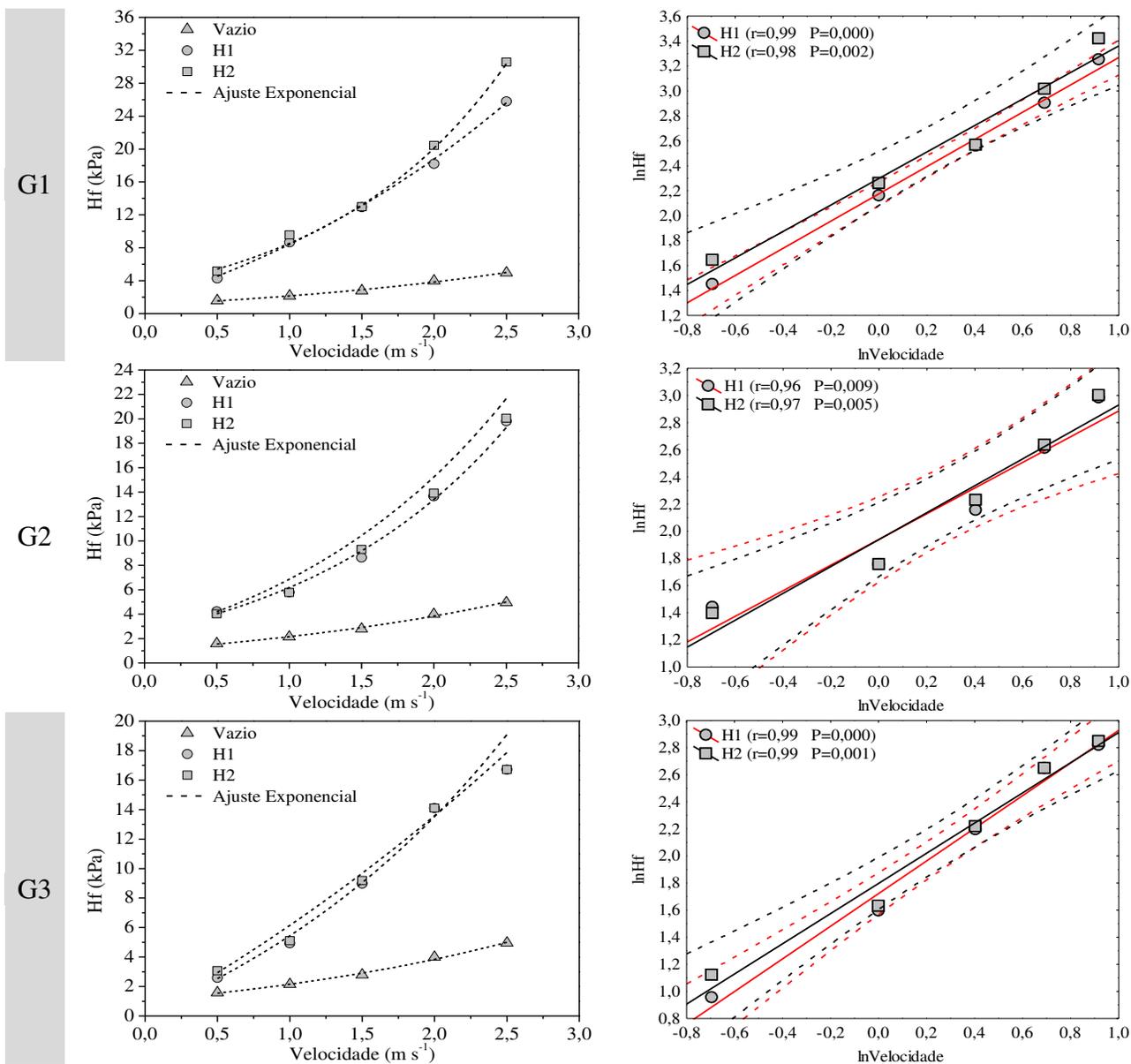


Figura 48: Variação de perda de pressão (kPa) em função da velocidade (m s⁻¹) para ensaios com escoamento no sentido ascendente, coincidente ao processo de retrolavagem, para três granulometrias de areia e duas alturas da camada filtrante (esquerda), e, a direita, intervalo de confiança a 95% comparado o efeito da variação de altura do leito filtrante na perda de pressão. [G1, G2 e G3] intervalo granulométrico; 0,5 a 1,0; 0,8 a 1,2 e 1,0 a 1,5 mm.

Ao analisar a Figura 48, observa-se que, igual ao processo no sentido descendente, a variação da perda de pressão foi proporcional ao aumento da velocidade com comportamento exponencial para as duas alturas e três granulometrias. Esse comportamento também foi encontrado por Burt (2010) e Salcedo (2010), mas com valores de perda de pressão do protótipo menores que os encontrados por esses autores, como por exemplo, Burt (2010) encontrou 86,2

kPa, aproximadamente, para o filtro modelo Arkal, enquanto Salcedo (2010) obteve 14,7 kPa para o filtro avaliado. Esses resultados mostram a redução da interferência desse modelo de dreno no escoamento do fluido durante o escoamento nesse sentido de fluxo.

Analisando os gráficos de intervalo de confiança para as três granulometrias de areia avaliadas, nota-se que não há diferenças significativas entre as alturas em todas as granulometrias ensaiadas, exceto para os valores de velocidade 0,5 e 2,5 m s⁻¹ do ensaio com G1. Essa tendência, de não alterar a perda de pressão em função do aumento do leito filtrante durante o processo de escoamento ascendente, pode ser justificado pela expansão da camada filtrante e consequente redução da sua resistência ao escoamento em função do aumento da sua porosidade. Essa tendência concorda com os resultados encontrados por Salcedo (2010).

A Figura 49 apresenta os gráficos para os intervalos de confiança (95%) comparando os valores linearizados de perda de pressão em função da velocidade de escoamento, para os processos de escoamento nas direções descendente e ascendente (filtragem e retrolavagem), considerando as três granulometrias de areia e duas alturas da camada filtrante H1 e H2.

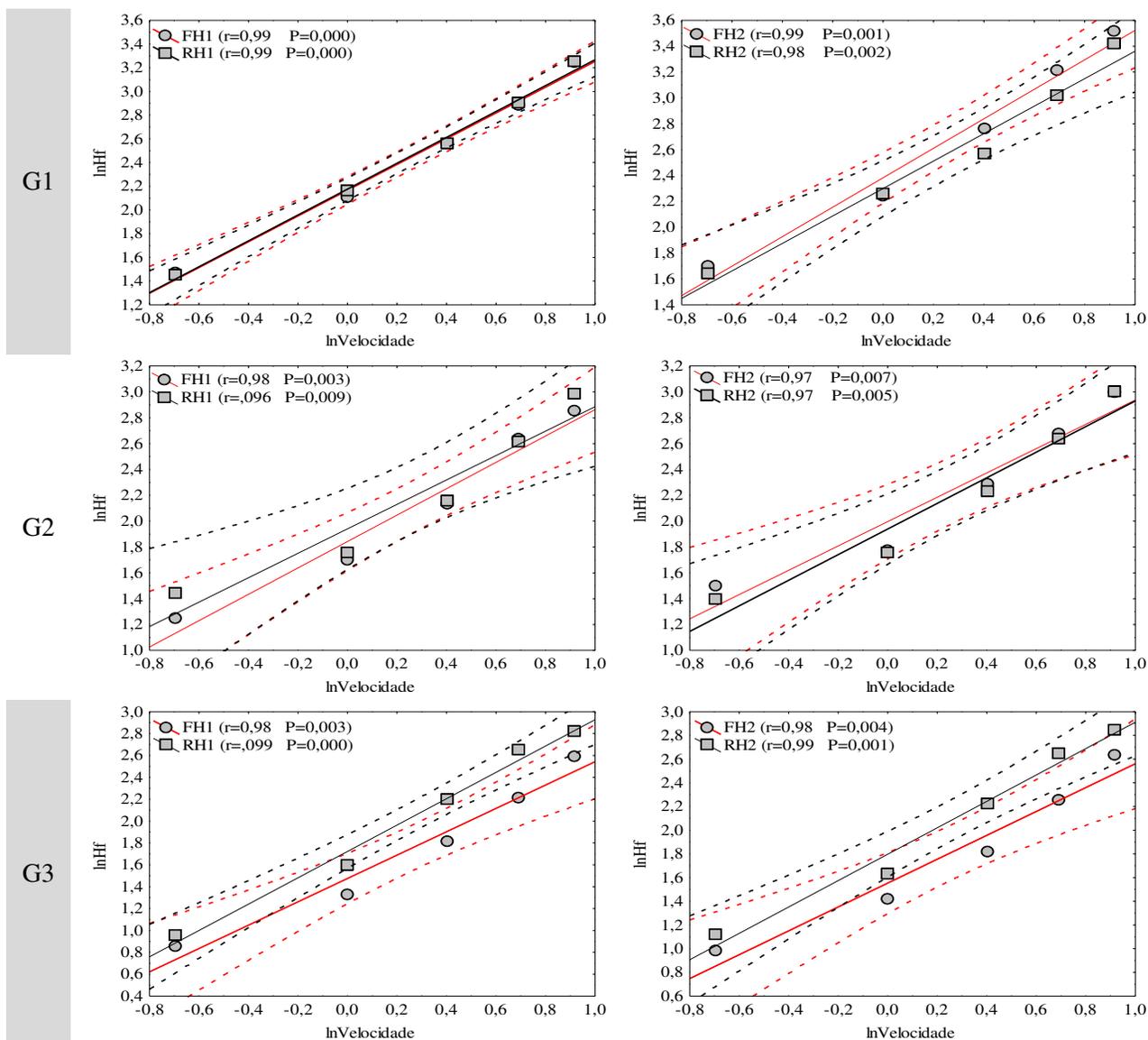


Figura 49: Comparação entre a variação de perda de pressão (kPa) em função da velocidade (m s^{-1}) para os dois sentidos de escoamento coincidente aos processos de filtragem e retrolavagem, para as três granulometrias de areia e duas alturas da camada filtrante. Nota: $^{[FH1 \text{ e } FH2]}$ escoamento no sentido coincidente filtragem com leito filtrante à altura, respectivamente, de H1 e H2; $^{[RH1 \text{ e } RH2]}$ escoamento no sentido coincidente retrolavagem com leito filtrante à altura, respectivamente, de H1 e H2. $^{[G1, G2 \text{ e } G3]}$ intervalo granulométrico; 0,5 a 1,0; 0,8 a 1,2 e 1,0 a 1,5 mm.

Os resultados apresentados na Figura 49, mostraram que não houve diferenças significativas para as duas alturas ensaiadas em G1 e G2 (granulometrias mais finas), quando se observa os pontos médios experimentais coincidentes nos dois intervalos de confiança. No entanto, mostrou-se que há diferença entre os sentidos de escoamento (filtragem e retrolavagem)

em G3, exceto para os valores em $0,5 \text{ m s}^{-1}$ de H1 que apresentaram dentro do mesmo intervalo nas duas alturas.

Os resultados dessa etapa mostraram que os acessórios projetados contribuíram para otimizar os processos de escoamento em filtros de areia. A placa difusora aumentou a dissipação de energia cinética e reduziu a formação de vórtices sobre a camada filtrante, conseqüentemente, não provocou a deformação do leito filtrante. Dentre as inovações sugeridas para a placa difusora, pode se destacar a contribuição de cada uma delas no processo de escoamento descendente; 1) a utilização do “mini defletor” possibilitou reduzir a velocidade do escoamento do fluido antes de atingir a base plana da placa difusora, criando uma região de dissipação adicional de energia e melhorando a distribuição das linhas de fluxo; 2) a borda lateral superior com angulação interna redirecionou e centralizou as linhas de fluxo para a região central de escoamento, evitando que essas fossem projetadas para a parede do equipamento, dissipando energia cinética antes da superfície filtrante; 3) as aberturas retangulares nas bordas laterais e superiores e orifícios na base plana da placa, possibilitaram a divisão do fluxo do fluido durante o processo de escoamento, nas direções radial e perpendicular, e a formação de linhas de fluxo nas demais regiões e áreas do filtro, aumentando a homogeneidade de distribuição da placa difusora. O modelo de dreno proposto possibilitou uma maior área de contato entre o sistema de drenagem e o material filtrante, formando linhas de fluxo em todas as direções nessa região de contato e, conseqüentemente, reduziu as áreas de estagnação de linhas de fluxo durante os dois processos de escoamento, ascendente e descendente, resultando em uma distribuição homogênea das linhas, e, com o auxílio do arranjo do sistema de drenagem proposto, promovendo uniformidade na expansão e fluidização do leito filtrante durante o processo de lavagem da camada. Além disso, os resultados da caracterização hidráulica do protótipo mostraram que o equipamento apresentou uma redução na participação no processo de perda de pressão.

5 CONCLUSÕES

Considerando os resultados obtidos nos objetivos específico dessa pesquisa pode-se concluir que:

- Para as condições predeterminadas de ensaios, a modelagem matemática parametrizada simulou adequadamente o comportamento do escoamento em filtros de areia, confirmando ser uma ferramenta essencial e indispensável ao desenvolvimento e otimização de projetos de equipamentos hidráulicos para a irrigação;
- A técnica de fluidodinâmica computacional (CFD) mostrou-se adequada e válida para aplicação em projetos de novos componentes estruturais de filtros de areia, assim como para estudos sobre a dinâmica de funcionamento do equipamento.
- O modelo de placa difusora projetada reduziu significativamente a energia cinética e aumentou a homogeneidade da distribuição das linhas de fluxo sob a superfície do leito poroso;
- A utilização do “mini defletor” como um sistema adicional de dissipação de energia cinética na placa difusora, se mostrou adequada, assim como, o emprego das bordas laterais e superiores para redirecionar as linhas de fluxo das paredes do equipamento para a região central, reduzindo a formação de vórtices sobre a superfície do leito filtrante;
- O uso do princípio de fragmentação das linhas de fluxo, isto é, dividir o fluxo do fluido durante o processo de escoamento, de forma radial e perpendicular, com uso de aberturas retangulares nas bordas laterais e superiores e orifícios na base plana da placa, possibilitou utilizar toda a área transversal do filtro efetivamente para a distribuição do afluente e resultar no aumento da homogeneidade de distribuição da placa difusora;
- A proposta de um dreno com maior área efetiva de contato com material filtrante permitiu a formação de linhas de fluxo radiais à região de atuação do dreno e, conseqüentemente, reduzindo as regiões de estagnação sem linhas de fluxo;
- A proposta de configuração do dreno determinou que, durante o escoamento no sentido descendente (filtragem), as linhas de fluxo fossem formadas perpendiculares

ao dreno, diminuindo a ocorrência de turbulência nas entradas dos slots e, reduzindo o efeito de perda de pressão;

- O arranjo espacial do sistema de drenagem proposto, visando à maximização da área efetiva de atuação de cada dreno, empregando a metodologia de polígonos de Thiessen, possibilitou uma fluidização uniforme e homogênea, sem apresentar caminhos preferenciais de escoamentos isolados. Esses resultados possibilita controlar a velocidade de retrolavagem do filtro sem eliminar material filtrante pelo sistema de tubulação de saída,
- O sistema de drenagem proposto reduziu os valores de velocidade de fluidização, o que possibilita, durante a retrolavagem, menor dependência do sistema de bombeamento e, conseqüentemente, disponibilizar mais vazão ao sistema de irrigação durante as inversões de retrolavagem de algum equipamento;
- O protótipo de filtro de areia projetado reduziu a perda de pressão em relação aos equipamentos comerciais e para as condições de testes a que foram submetidos.

A hipótese dessa pesquisa em utilizar a ferramenta de CFD no projeto das dimensões, formato e o arranjo estrutural da placa difusora e de drenos em filtros de areia visando à homogeneização das linhas de fluxo, buscando a redução da perda de pressão durante os processos de filtração e retrolavagem, da deformação superficial da camada filtrante e maior homogeneidade de fluidização do leito durante a retrolavagem, foi validada.

6 RECOMENDAÇÕES

O desenvolvimento dessa pesquisa permitiu uma série de reflexões sobre o tema pesquisado que, são indicadas para análise em futuros trabalhos, como:

- Os ensaios com água limpa permitem uma análise específica da hidráulica de escoamento em filtros de areia, no entanto, seria oportuno considerar a caracterização do comportamento operacional do protótipo de filtro em condições reais de campo na presença de concentrações típicas de sedimentos na água, visando definir padrões operacionais, e determinar a eficiência dos processos de filtração e retrolavagem;
- A dinâmica do processo de retrolavagem em filtros rápidos ainda necessita de mais informações, principalmente, no que diz respeito ao processo de desprendimento de partículas aderidas e na sua eficiência de limpeza. Dessa forma, é preciso desenvolver ensaios com diferentes configurações e angulações de fundos falsos e sistema de drenagem;
- A simulação computacional mostrou-se uma ferramenta essencial e indispensável ao desenvolvimento e otimização de filtros de areia. Dessa forma, essa metodologia poderia ser utilizada em estudos para simular: o fluxo de água em filtros de areia no regime escoamento transiente, buscando identificar outros detalhes desse fenômeno; e o escoamento com o fluido com sedimentos e partículas de impurezas de diferentes tamanhos.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN INSTITUTE OF AERONAUTICS AND ASTRONAUTICS. **Guide for the Verification and Validation of Computational Fluid Dynamics Simulations**. AIAA G-077-1998.

AMERICAN SOCIETY AGRICULTURAL AND BIOLOGICAL ENGINEERS - ASABE ANSI/ASAE S539 **Media Filters for Irrigation—Testing and Performance Reporting March 1994 (R2008)**.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS—ASME. 2007 ASME Boiler & Pressure Vessel Code. **VIII Division 1. Rules for Construction of Pressure Vessels**. 2007.

ANSYS, INC. CFX-12 User's Guide, 2009.

ARAÚJO, F. **Modelagem da turbulência aplicada ao escoamento sobre uma placa plana inclinada**. 2012, 125f. Dissertação (Mestre em Ciências em Engenharia Mecânica) - Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2012.

ARBAT, G., PUJOL, T., PUIG-BARGUÉS, J., DURAN-ROS, M., BARRAGÁN, J., MONTORO, L., RAMIREZ DE CARTAGENA, F. Using computational fluid dynamics to predict head losses in the auxiliary elements of a microirrigation sand filter. **Transactions of the ASABE**, v.54, n.4, 1367–1376, 2011.

ARBAT, G., PUJOL, T., PUIG-BARGUÉS, J., DURAN-ROS, M., MONTORO, L., BARRAGÁN, J., RAMÍREZ DE CARTAGENA, F. An experimental and analytical study to analyze hydraulic behavior of nozzle-type underdrains in porous media filters. **Agricultural Water Management**, v. 126, p. 64–74, 2013.

BURT, C. M. Media tanks for filtration part I: tank sizing and media selection. **Irrigation Journal**, p. 15 - 17, 1994.

BURT, C.M., STYLES, S.W., 2007. Filtration (solids removal). In: Burt, C.M., Styles, S.W. (Eds.), **Drip and Microirrigation Design and Management for Tress, Vines and Field Crops Practice Plus Theory**. ITRC, BRAE and CalPoly, San Luis Obispo, California, p. 175–222.

BURT, C. M. **Hydraulics of commercial sand media filters tanks used for agricultural drip irrigation: criteria for energy efficiency**. Irrigation Training and Research Center ITRC. Report N. R10-001 September 2010. Disponível em: www.itrc.org/reports/mediafilters.htm. Acesso em: Novembro de 2013.

CÁRDENAS, Sebastian Moreno. **Avaliação fluidodinâmica do HDT em regime contracorrente com o uso de fluidodinâmica computacional – CFD**. 2012. 110f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2012.

CASTRO, C. J. R. O. **Simulação da interação casco-propulsor de uma embarcação usando mecânica dos fluidos computacional (CFD)**. 2006. 307f. Dissertação (Mestre em Engenharia Naval e Oceânica) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2006.

CHENG, Y. and ZHU, J. X. CFD modelling and simulation of hydrodynamics in liquid-solid circulating fluidized beds. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, v.83, 2005.

CHOO, C.U. and TIEN, C. Analysis of the transient behavior of deep-bed filtration. **J. Colloid Interface Sci.**, v.169, p.13–33, 1995.

CLEASBY, J.L.; LOGSDON, G. S. Granular Bed and Precoat Filtration. In: AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION. **Water quality and treatment – handbook of community water supplies**. 5. ed. USA: McGraw Hill Inc., 1999.

COLES, D.E.; HIRST, E.A. **Proceedings on Computational Turbulent Boundary Layers**, v. 2. Stanford University Press, Stanford, CA, USA, 1968.

DAVIDSON, L. **An Introduction to Turbulence Models**. Department of Thermo and Fluid Dynamics. Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2003.

DAVIS, J. A., AND STEWART, M. Predicting globe control valve performance. Part I: CFD modeling. **ASME J. Fluids Eng.**, v.124, p.772–777, 2002.

DI BERNARDO, L., DANTAS, A. B.: **Métodos e técnicas de tratamento de água**. Rima, 2005.

FAN, L.W., HAI, R.T. AND LU, Z.X. CFD study on hydraulic performance of subsurface flow constructed wetland: effect of distribution and catchment area. **Korean Journal of Chemical Engineering**, v.26, n.5, p.1272-1278, 2009.

FERREIRA, L. **Simulação de grandes escalas de escoamentos turbulentos usando modelagem dinâmica**. 2006, 164f. Dissertação (Mestre em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Ilha Solteira, 2006.

FERZIGER, J.H. e PERIC, M. **Computational Methods for Fluid Dynamics**, 3 Ed. Berlin, Germany, Springer,2002.

FORTUNA, A. O. **Técnicas computacionais para dinâmica dos fluidos: conceitos básicos e aplicações**. 1ª ed., São Paulo: Editora da universidade de São Paulo, 426p, 2000.

FRANCO, A., VALERA, D. L., PEÑA, A., PÉREZ, A.M., Aerodynamic analysis and CFD simulation of several cellulose evaporative cooling pads used in mediterranean greenhouses. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.76, p.218-230, 2011.

HAMAN, D. Z.; SMAJSTRLA, A.G.; ZAZUETA, F.S. **Media filters for trickle irrigation in Florida**. Fact Sheet AE-57. IFAS. University of Florida. 5p. 1994.

JONES, W.P., LAUNDER, B.E. The prediction of linearization with a two equation model of turbulence. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 15, p. 301-314, 1972.

KIM, J. On the structure of pressure fluctuations in simulated turbulent channel flow. **Journal Fluid Mechanics**, v.205, p. 421-451, 1989.

KIM, Y. S., and WHITTLE, A. J.: Filtration in a porous granular medium: 1. simulation of pore-scale particle deposition and clogging. **Transport in Porous Media**, v.65, p.53–87, 2006.

KOLMOGOROV, A. N. Equations of turbulent motion of an incompressible fluid. **Izvestia Academy of Sciences, USSR: Physics**, v.6, n.1 e 2, p.56-58, 1942.

KUNDU, P.K.; COHEN I.M. **Fluid Mechanics**. 2 ed., San Diego, CA, Academic Press, 2002.

LAKOS. **Separators and Filtration systems**. Disponível em http://www.lakos.com/downloads/literature/LS-brochures-English/LS-500_SST_Brochure.pdf> Acesso em Novembro/2009.

LAUNDER, B.E.; SPALDING, D.B. The numerical computation of turbulent flows. **Comp. Meth. Appl. Mech. Eng.**, v. 3, p. 269-289, 1974.

LEE, B., BITOG, J. P. P., HONG, S. W., SEO, I. H., KWON, K. S., BARTZANAS, T., KACIRA, M., The past, present and future of CFD for agro-environmental applications. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.93, p.168-183, 2013.

LI, Y., PEILING, Y., XU, T., REN, S., LIN, X., WEI, R., XU, H. CFD and digital particle tracking to assess flow characteristics in the labyrinth flow path of a drip irrigation emitter. **Irrigation Science**, v.26, p.427–438, 2008.

LÓPEZ. L.P. **Simulación numérica de un lecho fluido bidimensional para la determinación de la Velocidad de mínima fluidización**. 2009, 82f. Monografía - Escuela politécnica superior, Universidad Carlos III de Madrid, Madrid, 2009.

MALISKA, C. R. **Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional**. 2ª edição, rev.ampl. 2004.

MANZANO, Juan Juárez. **Análisis del inyector Venturi y mejora de su instalación en los sistemas de Riego localizado**. 2008, 250f. Tese (Dotorado) - Departamento de Ingeniería Rural y Agroalimentaria, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2008.

MARTIGNONI, W. P., BERNARDO, S., QUINTANI, C. L. Evaluation of cyclone geometry and its influence on performance parameters by computational fluid dynamics (CFD). **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v.24, n.1, p. 83-94, 2007.

MESQUITA, Marcio. **Efeito dos componentes hidráulicos e da granulometria e altura da camada filtrante na perda de carga em filtros de areia utilizados na irrigação localizada**.

2010, 119f. Dissertação (Mestre em Engenharia Agrícola) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.

MESQUITA, M.; TESTEZLAF, R.; RAMIREZ, J.C.S. The effect of media bed characteristics and internal auxiliary elements on sand filter head loss. **Agricultural Water Management**, v.115, p.178-185, 2012.

NAKAYAMA, F. S., BOMAN, B. J., PITTS, D. J.: Maintenance. In: LAMM, F. R., AYARS, J. E., NAKAYAMA, F. S. (Eds.), **Microirrigation for crop production**. Design, Operation, and Management. Amsterdam, Elsevier. 389p. 2007.

NORTON, T., SUN, D. W., GRANT, J., FALLON, R., DODD, V. Applications of computational fluid dynamics (CFD) in the modelling and design of ventilation systems in the agricultural industry: a review. **BioResource Technology**, v. 98, p.2386-2414, 2007.

OLIVEIRA, J. E. S., LIMA e SILVA, A. L. F., SOUZA, F. J., GUIMARÃES, G., SILVEIRA-NETO, A. Análise comparativa entre diferentes metodologias de modelagem da turbulência: URANS, DES e LES. **14° POSMEC-Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica/Universidade Federal de Uberlândia**, v. 1, 2004.

OLIVEIRA, D. C., ALMEIDA, C. A. K., VIEIRA, L. G. M., DAMASCENO J. J. R., BARROZO, M. A. S. Influence of geometric dimensions on the performance of a filtering hydrocyclone: an experimental and CFD study. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v.26, n.3, p.575-582, 2009.

PALAU-SALVADOR, G., ARVIZA-VALVERDE, J., GONZÁLEZ-ALTOZANO, P., ROYUELA-TOMAS, A., PROVENZANO, G. Evaluating pressure losses in drip irrigation laterals using computational fluid dynamic techniques CFD. **Proc., European Ageing Conf., Leuven**, Belgium. 2004.

PALAU-SALVADOR, G., SANCHIS, L. H., GONZÁLEZ-ALTOZANO, P., ARVIZA-VALVERDE, J. Real local losses estimation for on-line emitters using empirical and numerical procedures. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 132, n. 6, p. 522-530, 2006.

PIZARRO CABELLO. F. **Riegos localizados de alta frecuencia**. 3.ed. Madrid: Mundi Prensa, 513 p. 1996.

PONCIANO de DEUS, F., TESTEZLAF, R. MESQUITA, M. Efeito das dimensões da placa difusora no comportamento hidráulico de um modelo comercial de filtro de areia. **Eng. Agríc.**, v.33, n.3, p 560-568, 2013.

POPE, S. **Turbulent Flows**. 1ª ed. Cambridge University Press, 2000

PROVENZANO, G., AND PUMO, D. Experimental analysis of local pressure losses for microirrigation laterals. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.130, n.4, p.318-324, 2004.

QI, W. K., GUO, Y. L., XUE, M., LI, Y. Y. Hydraulic analysis of an upflow sand filter: tracer experiments, mathematical model, and CFD computation. **Chemical Eng. Science**, v.104, p.460-472, 2013.

QINGSONG, W. L., GANG, L., JIE, S. YUSHENG, D. WENCHU, e SHUHUAI, Y. Evaluations of emitter clogging in drip irrigation by two phase flow simulations and laboratory experiments. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.63, n.2, p.294-303, 2008.

RAVINA, I.; PAZ, E.; SOFER, Z.; MARCU, A.; SCHISCHA, A.; SAGI, G. Control of emitter clogging in drip irrigation with reclaimed wastewater. **Irrigation Science**, v. 13, p. 129 - 139, 1992.

RONG, L., ELHADIDI, B., KHALIFA, E.H., NIELSEN, P.V., ZHANG, G. Validation of CFD simulation for ammonia emissions from an aqueous solution. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.75, p.261-271, 2011.

SAHA, A.K., WU, W., ZHANG, G., BJERG, B. Assessing effect of wind tunnel sizes on air velocity and concentration boundary layers and on ammonia emission estimation using computational fluid dynamics (CFD). **Computers and Electronics in Agriculture**, v.78, p.49-60, 2011.

SALCEDO, J. C. R., **Efeito das características granulométricas e da altura da camada filtrante no processo de retrolavagem em filtros de areia**. 2010, 159 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Agrícola) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.

SALCEDO, J.C.; TESTEZLAF, R.; MESQUITA, M. Processo da retrolavagem em filtros de areia usados na irrigação localizada. **Engenharia Agrícola**, v.31, n.6, p.1226-1237, 2011.

SANTOS, M. B., MESQUITA, M., TESTEZLAF, R. Aplicação de túnel de vento na avaliação de linhas de fluxo geradas por crepinas de filtros de areia. **Engenharia Agrícola**, v.33, n.3, p. 548-559, 2013.

SCHALDACH, G., BERGER, L., RAZILOV, I., BERNDT, H. Computer simulation for fundamental studies and optimization of ICP spray chambers. ISAS (Institute of Espectrochemistry and Applied Spec-troscopy) Currente Research Reports, Berlin, Germany, 2000.

SCHLICHTING, H., & GERSTEN, K. **Boundary layer theory**. 8 ed. Berlin: Springer Verlag., 564p. 1999

SILVA JR., João Lameu. **Investigação do Escoamento Bifásico Gás-Líquido em uma Coluna de Bolhas Retangular por meio da Técnica CFD**. 2011, 151f. Dissertação (Mestre em Engenharia Química) - Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2011.

- STERN, F., ROBERT, V. W., HUGH, W. C., ERIC, G. P. Verification and Validation os CFD Simulations. IIHR Report No. 407. Iowa Institute of Hydraulic Research. 1999.
- TESTEZLAF, R. Filtros de areia aplicados à irrigação localizada: teoria e prática. **Engenharia Agrícola**, v. 28, n. 3, p. 604-613, 2008.
- TESTEZLAF, R., SALCEDO, J. C. R., MESQUITA, M. Água pura. **Cultivar**, n. 122, p. 28-31, 2012.
- TESTEZLAF, R, DEUS, F. P., MESQUITA, M. Filtros de areia: erros e falhas. **Irrigazine**, v. 34, p.28 - 30, 2013.
- TROOIEN, T.P., HILLS, D.J. Application of biological effluent. In: LAMM, F.R., AYARS, J.E., NAKAYAMA, F.S. (Eds.), **Microirrigation for Crop Production** (Design, Operation and Management). Elsevier, Amsterdam, pp. 329–356, 2007.
- TUCCI, C. E. M. **Hidrologia. Ciência e Aplicação**. 4^a ed. Porto Alegre. UFRGS e da USP. 2009.
- VERMEREIN. L.; JOBLING. G.A. **Localized Irrigation**. Paper 36. Rome, Italy: FAO. 1984. 203p.
- VERSTEEG, H.K & MALALASEKERA, W. **An introduction to CFD. The Finite Volume Method**. Pearson Prentice Hall. England. 1995.
- WARSI, Z.U.A. **Fluid Dynamics: Theoretical and Computational Approaches**. CRC Press, Washington, DC, 1993.
- WEBER. JR.W.J. **Control de la calidad del agua. Procesos fisicoquímicos**. Ed Reverte. Versión Español. Barcelona. 1979.
- WEI, Q.S., SHI, Y.S., DONG, W.C., LU, G., HUANG, S.H. Study on hydraulic performance of drip emitters by computational fluid dynamics. **Agricultural Water Management**, v.84, n.1, p. 130–136, 2006.
- WENDT, J. F.: **Computational Fluid Dynamics**. Von Karman Institute Book. Springer. Berlin. 1992.
- WILCOX, D. C. **Turbulence Modeling for CFD**. 3^a ed., San Diego, Califórnia. DCW, 544p., 2006.
- WILSON, S.D., DYSON, R.W., TEW, R.C., DEMKO, R. **Experimental and computational analysis of unidirectional flow through stirling engine heater head**. NASA/TM-2006-214246, 10p.

ZHANG, J., ZHAO, W. H., WEI, Z. Y., TANG, Y. P., LU, B. H. Numerical and experimental study on hydraulic performance of emitters with arc labyrinth channels. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 56. p.120-129, 2007.

ZHANG J, ZHAO W., TANG Y., LU B. Anti-clogging performance evaluation and parameterized design of emitters with labyrinth channels. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.74, p.120-129, 2010.

8 ANEXOS

8.1 Valores experimentais e simulados de perda de pressão, do módulo experimental, usados nas análises de validação da fluidodinâmica computacional.

Tabela 26: Valores de perda de pressão (kPa) em função da velocidade de escoamento (m s^{-1}) para módulo experimental simulado nas diferentes configurações.

| Vel. (m s^{-1}) | Sem Dreno | | | Com Dreno Cônico | |
|-------------------------------|--------------------|----------------------|---------------------------------|----------------------|---------------------------------|
| | Sem placa difusora | Placa difusora Plana | Placa difusora Plana com Bordas | Placa difusora Plana | Placa difusora Plana com Bordas |
| 0,5 | 1,1 | 1,2 | 1,2 | 10,8 | 11,4 |
| 1,0 | 4,6 | 4,7 | 4,8 | 47,7 | 48,0 |
| 1,5 | 11,4 | 10,5 | 10,8 | 107,6 | 106,6 |
| 2,0 | 19,9 | 18,6 | 19,1 | 188,2 | 188,3 |
| 2,5 | 29,9 | 29,0 | 29,9 | 254,7 | 253,9 |

Tabela 27: Valores de perda de pressão (kPa) em função da velocidade de escoamento (m s^{-1}) para módulo experimental vazio (sem material filtrante) configurado na condição sem placa difusora e sem dreno.

| V (m s^{-1}) | Hf (kPa) | | | | σ | CV % |
|----------------------------|----------|------|------|-----------|----------|---------|
| | R1 | R2 | R3 | \bar{X} | | |
| 0,5 | 1,3 | 1,1 | 0,9 | 1,1 | 0,2 | 18,2 |
| 1,0 | 4,0 | 5,1 | 3,7 | 4,3 | 0,7 | 16,8 |
| 1,5 | 12,6 | 12,3 | 11,7 | 12,2 | 0,5 | 4,0 |
| 2,0 | 21,3 | 22,8 | 20,4 | 21,5 | 1,2 | 5,5 |
| 2,5 | 34,8 | 33,2 | 32,5 | 33,5 | 1,2 | 3,5 |

Tabela 28: Valores de perda de pressão (kPa) em função da velocidade de escoamento (m s^{-1}) para módulo experimental vazio (sem material filtrante) configurado na condição com placa difusora e sem dreno.

| Vel. (m s^{-1}) | Placa Difusora Plana sem Bordas | | | | | | Placa Difusora com Bordas | | | | | |
|-------------------------------|---------------------------------|------|------|-----------|----------|---------|---------------------------|------|------|-----------|----------|---------|
| | Hf (kPa) | | | | σ | CV % | Hf (kPa) | | | | σ | CV % |
| | R1 | R2 | R3 | \bar{X} | | | R1 | R2 | R3 | \bar{X} | | |
| 0,5 | 1,2 | 1,6 | 0,98 | 1,2 | 0,3 | 24,1 | 1,0 | 1,6 | 1,5 | 1,4 | 0,3 | 23,5 |
| 1,0 | 4,8 | 4,1 | 4,0 | 4,3 | 0,4 | 9,9 | 3,8 | 4,8 | 5,3 | 4,6 | 0,8 | 16,1 |
| 1,5 | 11,8 | 11,4 | 10,9 | 11,4 | 0,4 | 3,8 | 12,4 | 11,9 | 10,9 | 11,7 | 0,8 | 6,4 |
| 2,0 | 21,5 | 21,7 | 21,2 | 21,4 | 0,3 | 1,1 | 21,5 | 21,7 | 20,2 | 21,1 | 0,8 | 3,7 |
| 2,5 | 34,4 | 33,4 | 32,9 | 33,6 | 0,8 | 2,2 | 35,6 | 35,1 | 26,7 | 32,5 | 5,0 | 15,5 |

Tabela 29: Valores de perda de pressão (kPa) em função da velocidade de escoamento (m s^{-1}) para módulo experimental vazio (sem material filtrante) configurado na condição com placa difusora e com dreno cônico.

| Vel. (m s^{-1}) | Placa Difusora Plana sem Bordas | | | | | | Placa Difusora Plana com Bordas | | | | | |
|-------------------------------|---------------------------------|-------|-----------|----------|-----|---------|---------------------------------|-------|-----------|----------|-----|---------|
| | Hf (kPa) | | | | | CV % | Hf (kPa) | | | | | CV % |
| R1 | R2 | R3 | \bar{X} | σ | R1 | | R2 | R3 | \bar{X} | σ | | |
| 0,5 | 10,8 | 11,8 | 10,8 | 11,1 | 0,6 | 5,1 | 10,8 | 9,8 | 13,7 | 11,4 | 2,2 | 17,8 |
| 1,0 | 50,0 | 47,1 | 46,1 | 47,7 | 2,0 | 4,3 | 52,0 | 47,1 | 45,1 | 48,1 | 3,5 | 7,3 |
| 1,5 | 108,6 | 108,9 | 104,9 | 107,6 | 2,3 | 2,1 | 104,9 | 104,0 | 110,8 | 106,5 | 3,7 | 3,5 |
| 2,0 | 188,3 | 193,2 | 183,4 | 188,3 | 4,9 | 2,6 | 180,4 | 196,1 | 188,3 | 188,3 | 7,9 | 4,2 |
| 2,5 | 256,0 | 261,5 | 252,0 | 256,6 | 4,9 | 1,9 | 254,0 | 255,0 | 253,0 | 254,0 | 1,0 | 0,4 |

Nota: ^[V] velocidade de ensaio (m s^{-1}); ^[R1, R2 e R3] repetições de ensaios;

8.2 Análise de variância dos ajustes característicos dos ensaios de comparação entre a perda de pressão experimental e simulada para o módulo experimental ensaiado em diferentes configurações.

Tabela 30: Análise de variância dos ajustes característicos dos ensaios de comparação entre a perda de pressão experimental e simulada para o módulo experimental configurado na condição sem placa difusora e sem dreno.

| Fonte de Variação | G. L | S. Q. | Q. M. | F | P- valor |
|-------------------|------|----------|----------|----------|----------|
| Regressão | 1 | 557,4899 | 557,4899 | 927,3683 | 7,78E-5 |
| Resíduo | 3 | 1,8035 | 0,6012 | | |
| Total | 4 | 559,2934 | | | |

Tabela 31: Análise de variância dos ajustes característicos dos ensaios de comparação entre a perda de pressão experimental e simulada para o módulo experimental configurado na condição com placa difusora plana e sem dreno.

| Fonte de Variação | G. L | S. Q. | Q. M. | F | P- valor |
|-------------------|------|----------|----------|-----------|----------|
| Regressão | 1 | 503,6837 | 503,6837 | 1007,5451 | 6,87E-5 |
| Resíduo | 3 | 1,4997 | 0,4999 | | |
| Total | 4 | 505,1835 | | | |

Tabela 32: Análise de variância dos ajustes característicos dos ensaios de comparação entre a perda de pressão experimental e simulada para o módulo experimental configurado na condição com placa difusora plana com bordas e sem dreno.

| Fonte de Variação | G. L | S. Q. | Q. M. | F | P- valor |
|-------------------|------|----------|----------|-----------|----------|
| Regressão | 1 | 532,9456 | 532,9456 | 1202,7861 | 5,27E-5 |
| Resíduo | 3 | 1,3293 | 0,4431 | | |
| Total | 4 | 534,2749 | | | |

Tabela 33: Análise de variância dos ajustes característicos dos ensaios de comparação entre a perda de pressão experimental e simulada para o módulo experimental configurado na condição com placa difusora plana e com dreno cônico.

| Fonte de Variação | G. L | S. Q. | Q. M. | F | P- valor |
|-------------------|------|------------|------------|------------|----------|
| Regressão | 1 | 40075,8963 | 40075,8963 | 33762,8324 | 3,55E-7 |
| Resíduo | 3 | 3,5609 | 1,1869 | | |
| Total | 4 | 40079,4572 | | | |

Tabela 34: Análise de variância dos ajustes característicos dos ensaios de comparação entre a perda de pressão experimental e simulada para o módulo experimental configurado na condição com placa difusora plana com bordas e com dreno cônico.

| Fonte de Variação | G. L | S. Q. | Q. M. | F | P- valor |
|-------------------|------|-----------|-----------|---|----------|
| Regressão | 1 | 38379,928 | 38379,928 | - | - |
| Resíduo | 3 | 0 | 0 | | |
| Total | 4 | 38379,928 | | | |

8.3 Mapas de distribuição dos vetores de velocidade e das linhas de corrente resultantes do escoamento do fluido nas diferentes configurações de ensaios.

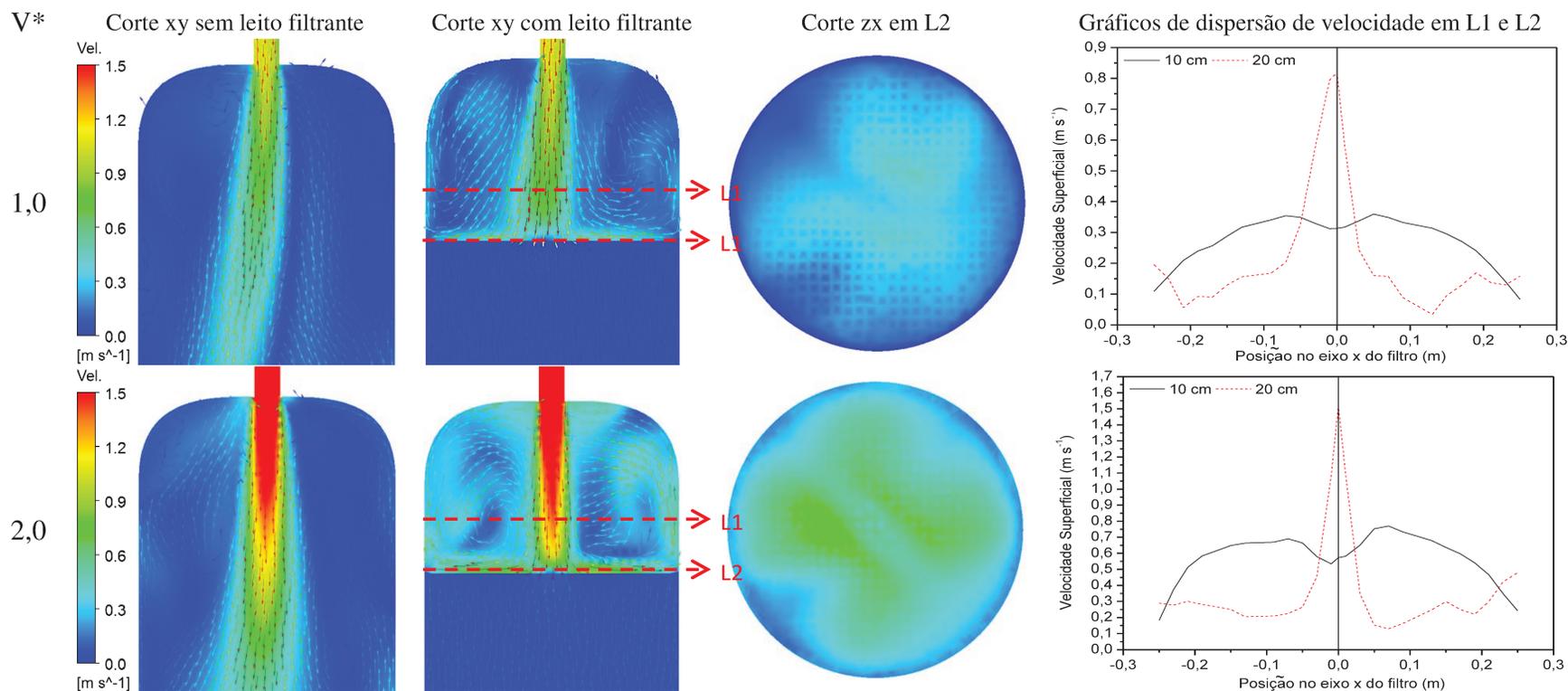


Figura 50: Perfis de velocidade e linhas de fluxo para escoamento característico no módulo experimental sem placa difusora e fluxo de água no sentido descendente. Onde: $[V^*]$ velocidade inicial utilizada na simulação em $m s^{-1}$

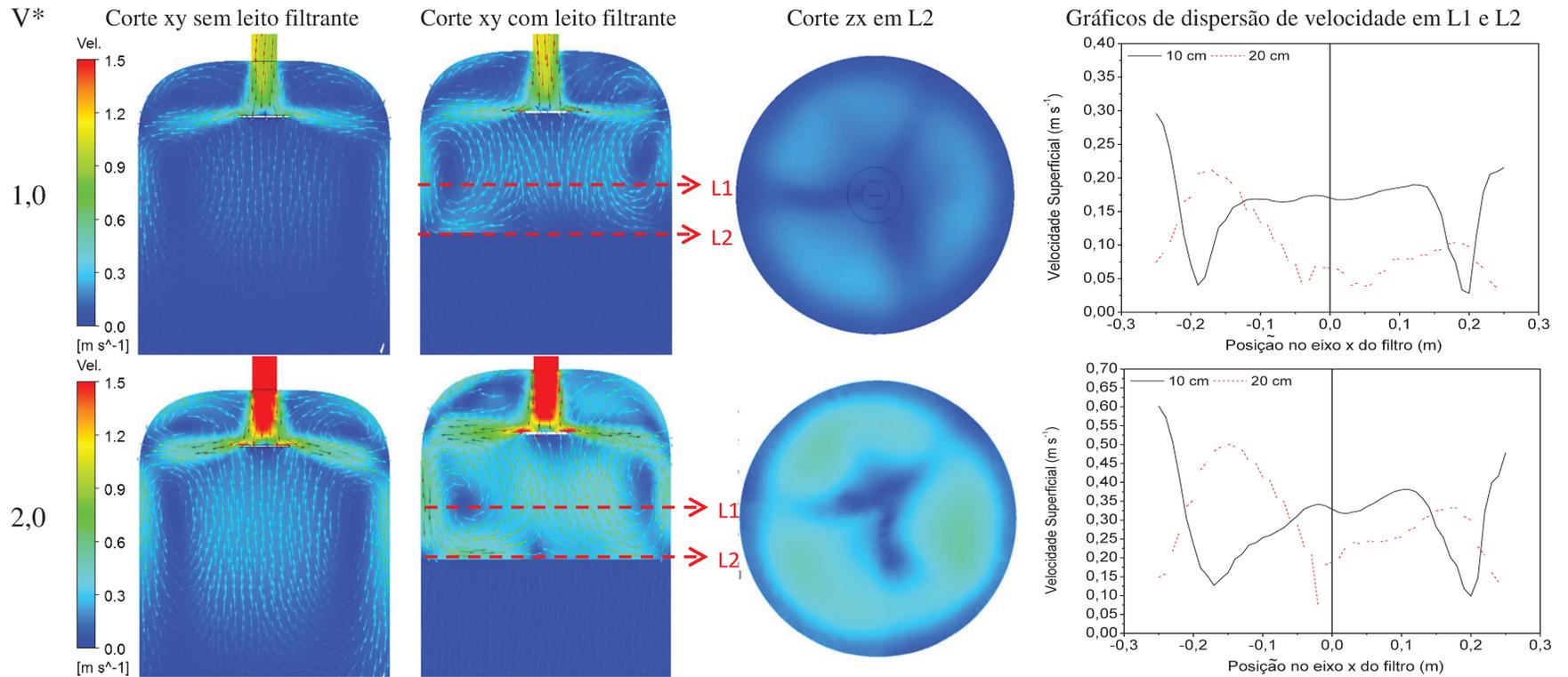


Figura 51: Perfis de velocidade e linhas de fluxo para escoamento característico no módulo experimental com placa difusora plana sem bordas e fluxo de água no sentido descendente. Onde: $[V^*]$ velocidade inicial utilizada na simulação em $m s^{-1}$

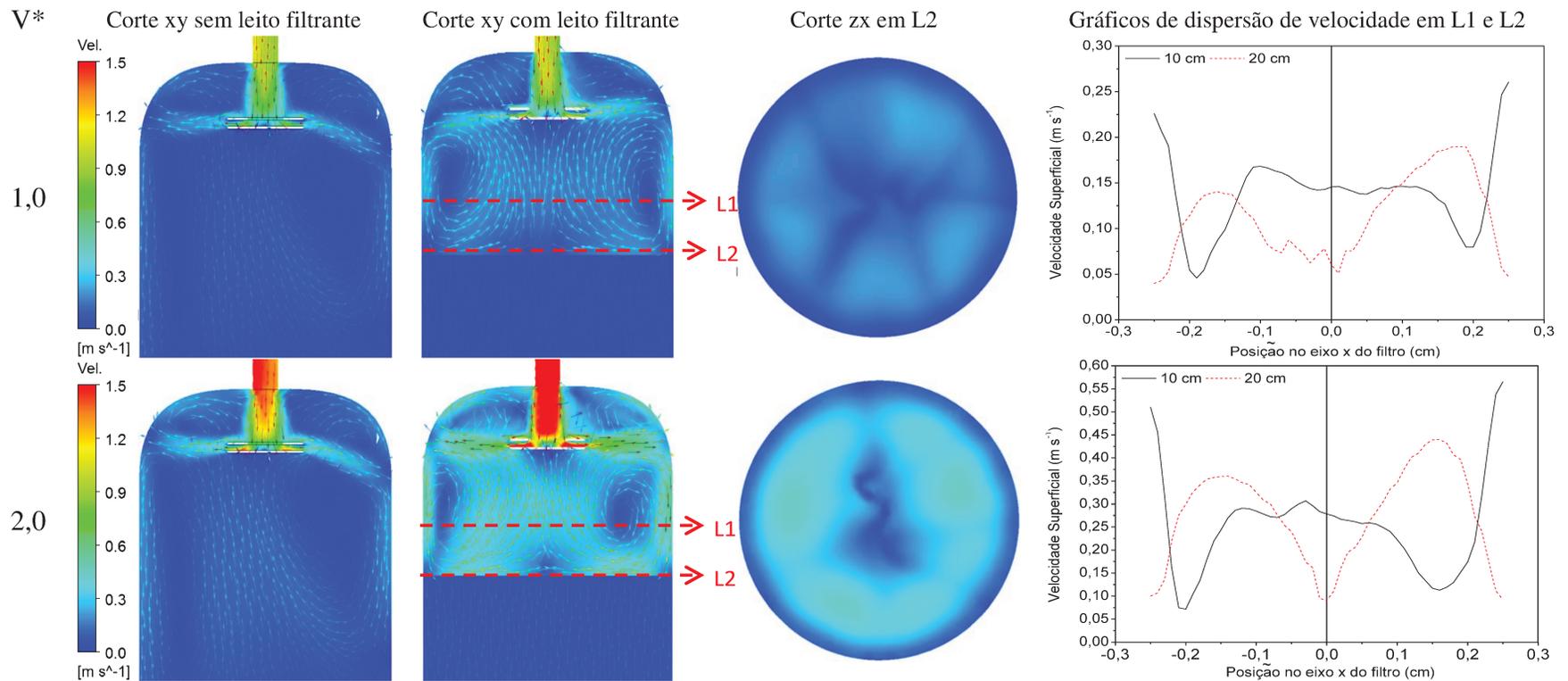


Figura 52: Perfis de velocidade e linhas de fluxo para escoamento característico no módulo experimental com placa difusora plana com anel superior e fluxo de água no sentido descendente. Onde: $[V^*]$ velocidade inicial utilizada na simulação em m s⁻¹

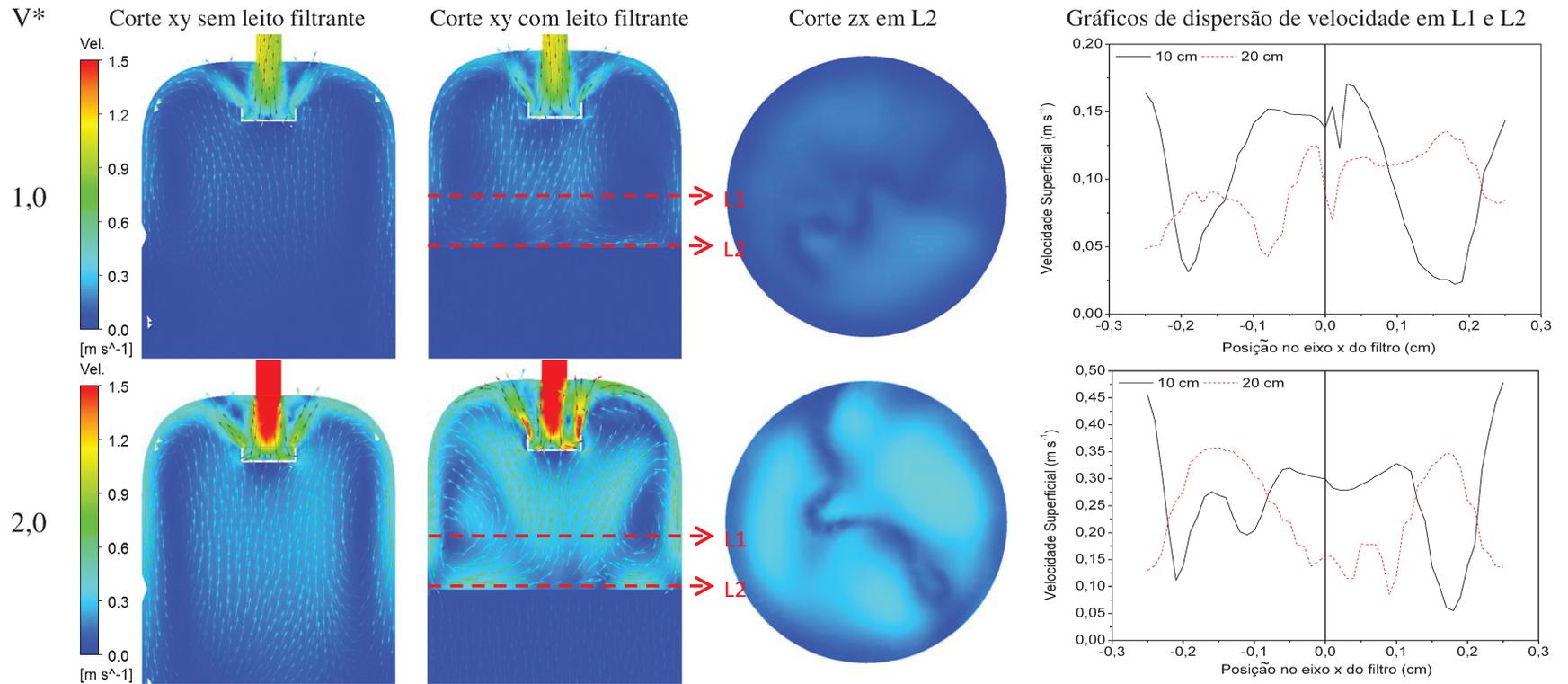


Figura 53: Perfis de velocidade e linhas de fluxo para escoamento característico no módulo experimental com placa difusora plana com bordas e fluxo de água no sentido descendente. Onde: $[V^*]$ velocidade inicial utilizada na simulação em $m s^{-1}$

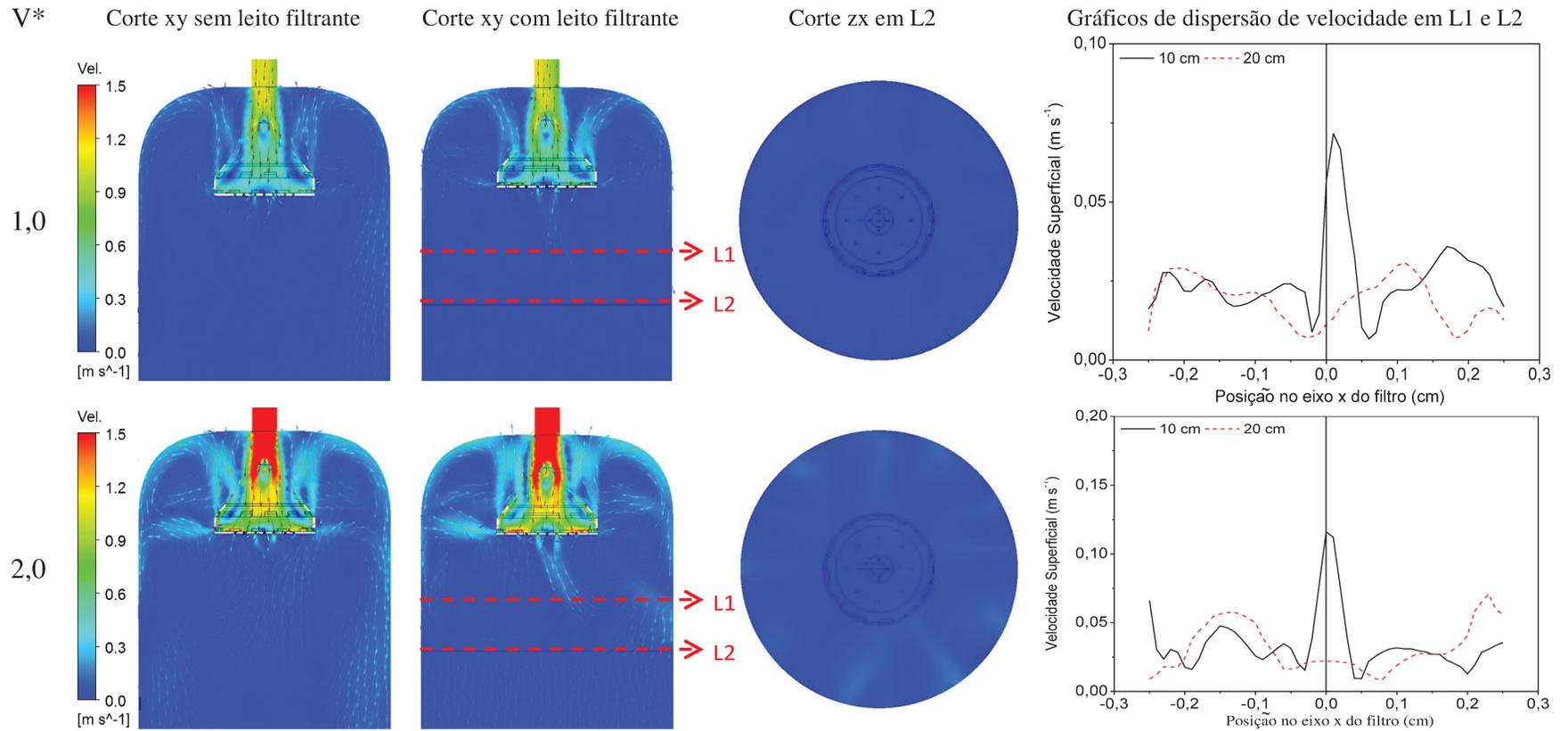


Figura 54: Perfis de velocidade e linhas de fluxo para escoamento característico no módulo experimental com placa difusora projetada e fluxo de água no sentido descendente. Onde: $[V^*]$ velocidade inicial utilizada na simulação em m s⁻¹

8.4 Valores experimentais de perda de pressão do protótipo de filtro, usados nas avaliações hidráulicas do equipamento desenvolvido.

Tabela 35: Valores de perda de pressão (kPa) em função da velocidade de escoamento ($m s^{-1}$) para o protótipo vazio (sem material filtrante) nos sentido de escoamento descendente e ascendente (filtragem e retrolavagem).

| V ($m s^{-1}$) | Escoamento descendente (filtragem) | | | | | | Escoamento ascendente (retrolavagem) | | | | | |
|---------------------|------------------------------------|------|------|-----------|----------|---------|--------------------------------------|------|------|-----------|----------|---------|
| | Hf (kPa) | | | | | CV % | Hf (kPa) | | | | | CV % |
| | R1 | R2 | R3 | \bar{X} | σ | | R1 | R2 | R3 | \bar{X} | σ | |
| 0,5 | 1,95 | 1,93 | 2,03 | 1,97 | 0,05 | 2,64 | 1,50 | 1,44 | 1,79 | 1,58 | 0,19 | 12,58 |
| 1,0 | 2,78 | 3,06 | 2,59 | 2,81 | 0,24 | 8,53 | 2,21 | 2,14 | 2,03 | 2,14 | 0,09 | 4,10 |
| 1,5 | 3,54 | 2,75 | 3,16 | 3,15 | 0,39 | 12,52 | 2,78 | 2,90 | 2,78 | 2,78 | 0,07 | 2,45 |
| 2,0 | 4,40 | 3,42 | 4,38 | 4,07 | 0,56 | 13,76 | 3,06 | 4,08 | 3,99 | 3,99 | 0,57 | 14,22 |
| 2,5 | 5,44 | 5,06 | 5,83 | 5,44 | 0,39 | 7,12 | 4,95 | 4,58 | 5,91 | 4,95 | 0,69 | 13,84 |

Tabela 36: Valores médios de perda de pressão (kPa) em função da velocidade de escoamento ($m s^{-1}$), nos sentido de escoamento descendente e ascendente (filtragem e retrolavagem), com leito filtrante nas alturas H1 e H2, respectivamente, 30 e 45 cm, e formado com granulometria 0,5 a 1,0mm.

| V ($m s^{-1}$) | Escoamento Descendente (Filtragem) | | | | | | | | | | | |
|---------------------|--------------------------------------|-------|-----------|----------|------|---------|----------|-------|-----------|----------|------|---------|
| | H1 | | | | | | H2 | | | | | |
| | Hf (kPa) | | | | | CV % | Hf (kPa) | | | | | CV % |
| R1 | R2 | R3 | \bar{X} | σ | R1 | | R2 | R3 | \bar{X} | σ | | |
| 0,5 | 4,42 | 4,33 | 4,10 | 4,33 | 0,17 | 3,90 | 5,44 | 5,49 | 5,19 | 5,44 | 0,16 | 2,90 |
| 1,0 | 8,27 | 8,22 | 7,79 | 8,22 | 0,26 | 3,20 | 9,36 | 9,41 | 9,66 | 9,41 | 0,16 | 1,72 |
| 1,5 | 13,23 | 12,83 | 12,96 | 12,96 | 0,20 | 1,55 | 15,76 | 15,41 | 16,09 | 15,76 | 0,34 | 2,17 |
| 2,0 | 17,92 | 17,55 | 20,80 | 17,92 | 1,78 | 9,94 | 24,85 | 24,93 | 24,85 | 24,85 | 0,05 | 0,19 |
| 2,5 | 25,73 | 25,51 | 26,43 | 25,73 | 0,48 | 1,86 | 33,95 | 32,70 | 33,54 | 33,54 | 0,64 | 1,91 |
| V ($m s^{-1}$) | Escoamento Ascendente (Retrolavagem) | | | | | | | | | | | |
| | H1 | | | | | | H2 | | | | | |
| | Hf (kPa) | | | | | CV % | Hf (kPa) | | | | | CV % |
| R1 | R2 | R3 | \bar{X} | σ | R1 | | R2 | R3 | \bar{X} | σ | | |
| 0,5 | 3,97 | 4,55 | 4,27 | 4,27 | 0,29 | 6,76 | 5,02 | 5,16 | 5,34 | 5,16 | 0,16 | 3,09 |
| 1,0 | 8,66 | 8,36 | 9,71 | 8,66 | 0,70 | 8,13 | 9,57 | 9,72 | 9,03 | 9,57 | 0,36 | 3,81 |
| 1,5 | 12,57 | 12,94 | 13,92 | 12,94 | 0,69 | 5,35 | 13,34 | 11,90 | 13,00 | 13,00 | 0,75 | 5,77 |
| 2,0 | 18,21 | 18,87 | 16,09 | 18,21 | 1,45 | 7,98 | 20,43 | 17,16 | 22,97 | 20,43 | 2,91 | 14,26 |
| 2,5 | 25,79 | 24,79 | 26,81 | 25,79 | 1,01 | 3,93 | 30,52 | 29,56 | 33,84 | 30,52 | 2,25 | 7,35 |

Tabela 37: Valores médios de perda de pressão (kPa) em função da velocidade de escoamento (m s^{-1}), nos sentido de escoamento descendente e ascendente (filtragem e retrolavagem), com leito filtrante nas alturas H1 e H2, respectivamente, 30 e 45 cm, e formado com granulometria 0,8 a 1,2mm.

| Escoamento Descendente (Filtragem) | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------------------|----------|-------|-------|-----------|------|----------|---------|----------|-------|-------|-----------|-------|----------|---------|
| V (m s^{-1}) | H1 | | | | | | H2 | | | | | | | |
| | Hf (kPa) | | | | | σ | CV % | Hf (kPa) | | | | | σ | CV % |
| | R1 | R2 | R3 | \bar{X} | | | | R1 | R2 | R3 | \bar{X} | | | |
| 0,5 | 3,55 | 3,47 | 3,46 | 3,47 | 0,05 | 1,47 | 4,49 | 4,01 | 4,47 | 4,47 | 0,26 | 6,01 | | |
| 1,0 | 4,60 | 5,67 | 5,46 | 5,46 | 0,56 | 10,34 | 5,46 | 5,89 | 5,90 | 5,89 | 0,25 | 4,31 | | |
| 1,5 | 7,97 | 8,76 | 8,44 | 8,44 | 0,40 | 4,69 | 9,88 | 9,79 | 9,86 | 9,86 | 0,04 | 0,45 | | |
| 2,0 | 13,57 | 13,97 | 14,16 | 13,97 | 0,30 | 2,15 | 14,47 | 14,37 | 15,78 | 14,47 | 0,79 | 5,45 | | |
| 2,5 | 18,31 | 17,28 | 15,46 | 17,28 | 1,44 | 8,35 | 19,99 | 20,02 | 21,34 | 20,02 | 0,77 | 3,84 | | |
| Escoamento Ascendente (Retrolavagem) | | | | | | | | | | | | | | |
| 0,5 | 4,23 | 4,14 | 4,92 | 4,23 | 0,43 | 10,11 | 4,78 | 4,03 | 3,55 | 4,03 | 0,62 | 15,44 | | |
| 1,0 | 5,78 | 6,24 | 5,15 | 5,78 | 0,55 | 9,45 | 5,84 | 5,77 | 4,10 | 5,77 | 0,98 | 17,03 | | |
| 1,5 | 9,55 | 8,38 | 8,64 | 8,64 | 0,61 | 7,10 | 10,80 | 9,29 | 9,29 | 9,29 | 0,87 | 9,37 | | |
| 2,0 | 14,62 | 13,65 | 12,88 | 13,65 | 0,87 | 6,37 | 13,07 | 13,90 | 14,06 | 13,90 | 0,53 | 3,82 | | |
| 2,5 | 18,68 | 23,08 | 19,80 | 19,80 | 2,28 | 11,52 | 20,09 | 19,06 | 20,06 | 20,06 | 0,59 | 2,94 | | |

Tabela 38: Valores médios de perda de pressão (kPa) em função da velocidade de escoamento (m s^{-1}), nos sentido de escoamento descendente e ascendente (filtragem e retrolavagem), com leito filtrante nas alturas H1 e H2, respectivamente, 30 e 45 cm, e formado com granulometria 1,0 a 1,5mm.

| Escoamento Descendente (Filtragem) | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------------------|----------|-------|-------|-----------|------|----------|---------|----------|-------|-------|-----------|-------|----------|---------|
| V (m s^{-1}) | H1 | | | | | | H2 | | | | | | | |
| | Hf (kPa) | | | | | σ | CV % | Hf (kPa) | | | | | σ | CV % |
| | R1 | R2 | R3 | \bar{X} | | | | R1 | R2 | R3 | \bar{X} | | | |
| 0,5 | 2,14 | 2,35 | 2,51 | 2,35 | 0,18 | 7,80 | 2,67 | 2,66 | 2,65 | 2,66 | 0,00 | 0,28 | | |
| 1,0 | 3,88 | 3,77 | 3,47 | 3,77 | 0,21 | 5,64 | 4,24 | 3,80 | 4,12 | 4,12 | 0,23 | 5,49 | | |
| 1,5 | 5,99 | 6,19 | 6,10 | 6,10 | 0,10 | 1,64 | 5,73 | 6,64 | 6,14 | 6,14 | 0,46 | 7,46 | | |
| 2,0 | 8,74 | 9,76 | 9,11 | 9,11 | 0,51 | 5,65 | 10,18 | 9,47 | 9,54 | 9,54 | 0,39 | 4,11 | | |
| 2,5 | 13,98 | 13,34 | 13,16 | 13,34 | 0,43 | 3,26 | 13,92 | 15,96 | 13,15 | 13,92 | 1,45 | 10,44 | | |
| Escoamento Ascendente (Retrolavagem) | | | | | | | | | | | | | | |
| 0,5 | 2,59 | 2,42 | 2,78 | 2,59 | 0,18 | 6,89 | 3,07 | 2,84 | 3,07 | 3,07 | 0,13 | 4,37 | | |
| 1,0 | 5,22 | 4,70 | 4,93 | 4,93 | 0,26 | 5,26 | 6,12 | 5,10 | 4,99 | 5,10 | 0,62 | 12,23 | | |
| 1,5 | 9,33 | 8,98 | 8,37 | 8,98 | 0,48 | 5,38 | 9,19 | 8,39 | 9,41 | 9,19 | 0,54 | 5,84 | | |
| 2,0 | 14,10 | 14,21 | 13,93 | 14,10 | 0,14 | 1,00 | 15,30 | 13,07 | 14,10 | 14,10 | 1,12 | 7,91 | | |
| 2,5 | 16,71 | 16,72 | 16,71 | 16,71 | 0,00 | 0,02 | 19,78 | 15,99 | 17,22 | 17,22 | 1,93 | 11,23 | | |

8.5 Análise de variância para as diferentes configurações de ensaio do protótipo.

Tabela 39: Análise de variância da função exponencial característica do protótipo durante os ensaios com escoamento no sentido descendente, coincidente ao processo de filtração, com o equipamento vazio.

| Fonte de Variação | G. L | S. Q. | Q. M. | F | P- valor |
|-------------------|------|----------|---------|----------|----------|
| Regressão | 3 | 67,85529 | 22,6184 | 537,2048 | 0,00186 |
| Resíduo | 2 | 0,08421 | 0,0421 | | |
| Total | 5 | 67,9395 | | | |

Tabela 40: Análise de variância da função exponencial característica do protótipo durante os ensaios com escoamento no sentido descendente, coincidente ao processo de filtração, com camada filtrante H1 e intervalo granulométrico de areia G1.

| Fonte de Variação | G. L | S. Q. | Q. M. | F | P- valor |
|-------------------|------|-----------|----------|-------------|----------|
| Regressão | 3 | 1268,9955 | 422,9985 | 108040,1454 | 9,26E-6 |
| Resíduo | 2 | 0,00783 | 0,00392 | | |
| Total | 5 | 1269,0034 | | | |

Tabela 41: Análise de variância da função exponencial característica do protótipo durante os ensaios com escoamento no sentido descendente, coincidente ao processo de filtração, com camada filtrante H2 e intervalo granulométrico de areia G1.

| Fonte de Variação | G. L | S. Q. | Q. M. | F | P- valor |
|-------------------|------|-----------|----------|----------|----------|
| Regressão | 3 | 2099,8540 | 699,9513 | 939,4344 | 0,00106 |
| Resíduo | 2 | 1,49015 | 0,7451 | | |
| Total | 5 | 2101,3442 | | | |

Tabela 42: Análise de variância da função exponencial característica do protótipo durante os ensaios com escoamento no sentido descendente, coincidente ao processo de filtração, com camada filtrante H1 e intervalo granulométrico de areia G2.

| Fonte de Variação | G. L | S. Q. | Q. M. | F | P- valor |
|-------------------|------|----------|----------|----------|----------|
| Regressão | 3 | 778,3962 | 259,4654 | 808,6575 | 0,00124 |
| Resíduo | 2 | 0,6417 | 0,3209 | | |
| Total | 5 | 779,0379 | | | |

Tabela 43: Análise de variância da função exponencial característica do protótipo durante os ensaios com escoamento no sentido descendente, coincidente ao processo de filtração, com camada filtrante H2 e intervalo granulométrico de areia G2.

| Fonte de Variação | G. L | S. Q. | Q. M. | F | P- valor |
|-------------------|------|----------|----------|-----------|----------|
| Regressão | 3 | 545,0681 | 181,6894 | 3076,2139 | 3,25E-4 |
| Resíduo | 2 | 0,1181 | 0,0591 | | |
| Total | 5 | 545,1862 | | | |

Tabela 44: Análise de variância da função exponencial característica do protótipo durante os ensaios com escoamento no sentido descendente, coincidente ao processo de filtragem, com camada filtrante H1 e intervalo granulométrico de areia G3.

| Fonte de Variação | G. L | S. Q. | Q. M. | F | P- valor |
|-------------------|------|----------|----------|-----------|----------|
| Regressão | 3 | 322,5232 | 107,5077 | 4516,4143 | 2,21E-4 |
| Resíduo | 2 | 0,044761 | 0,0238 | | |
| Total | 5 | 322,5708 | | | |

Tabela 45: Análise de variância da função exponencial característica do protótipo durante os ensaios com escoamento no sentido descendente, coincidente ao processo de filtragem, com camada filtrante H2 e intervalo granulométrico de areia G3.

| Fonte de Variação | G. L | S. Q. | Q. M. | F | P- valor |
|-------------------|------|----------|----------|-----------|----------|
| Regressão | 3 | 366,1328 | 122,0443 | 1687,1915 | 5,92E-4 |
| Resíduo | 2 | 0,1447 | 0,0723 | | |
| Total | 5 | 366,2775 | | | |

Tabela 46: Análise de variância da função exponencial característica do protótipo durante os ensaios com escoamento no sentido ascendente, coincidente ao processo de retrolavagem, com o equipamento vazio.

| Fonte de Variação | G. L | S. Q. | Q. M. | F | P- valor |
|-------------------|------|---------|---------|----------|----------|
| Regressão | 3 | 55,2431 | 18,4144 | 929,4393 | 0,00107 |
| Resíduo | 2 | 0,0396 | 0,0198 | | |
| Total | 5 | 55,2827 | | | |

Tabela 47: Análise de variância da função exponencial característica do protótipo durante os ensaios com escoamento no sentido ascendente, coincidente ao processo de retrolavagem, com camada filtrante H1 e intervalo granulométrico de areia G1.

| Fonte de Variação | G. L | S. Q. | Q. M. | F | P- valor |
|-------------------|------|-----------|----------|-----------|----------|
| Regressão | 3 | 1273,9044 | 424,6348 | 1729,8421 | 5,78E-4 |
| Resíduo | 2 | 0,4909 | 0,2455 | | |
| Total | 5 | 1274,3953 | | | |

Tabela 48: Análise de variância da função exponencial característica do protótipo durante os ensaios com escoamento no sentido ascendente, coincidente ao processo de retrolavagem, com camada filtrante H2 e intervalo granulométrico de areia G1.

| Fonte de Variação | G. L | S. Q. | Q. M. | F | P- valor |
|-------------------|------|-----------|----------|-----------|----------|
| Regressão | 3 | 1603,5436 | 534,5145 | 1445,4813 | 6,91E-4 |
| Resíduo | 2 | 0,7396 | 0,3698 | | |
| Total | 5 | 1604,2832 | | | |

Tabela 49: Análise de variância da função exponencial característica do protótipo durante os ensaios com escoamento no sentido ascendente, coincidente ao processo de retrolavagem, com camada filtrante H1 e intervalo granulométrico de areia G2.

| Fonte de Variação | G. L | S. Q. | Q. M. | F | P- valor |
|-------------------|------|----------|----------|------------|----------|
| Regressão | 3 | 690,2005 | 230,0668 | 10412,4715 | 9,60E-5 |
| Resíduo | 2 | 0,0442 | 0,0221 | | |
| Total | 5 | 690,2447 | | | |

Tabela 50: Análise de variância da função exponencial característica do protótipo durante os ensaios com escoamento no sentido ascendente, coincidente ao processo de retrolavagem, com camada filtrante H2 e intervalo granulométrico de areia G2.

| Fonte de Variação | G. L | S. Q. | Q. M. | F | P- valor |
|-------------------|------|----------|----------|------------|----------|
| Regressão | 3 | 875,3535 | 291,7845 | 22496,9973 | 4,44E-5 |
| Resíduo | 2 | 0,0259 | 0,0129 | | |
| Total | 5 | 875,3794 | | | |

Tabela 51: Análise de variância da função exponencial característica do protótipo durante os ensaios com escoamento no sentido ascendente, coincidente ao processo de retrolavagem, com camada filtrante H1 e intervalo granulométrico de areia G3.

| Fonte de Variação | G. L | S. Q. | Q. M. | F | P- valor |
|-------------------|------|----------|----------|----------|----------|
| Regressão | 3 | 644,2172 | 214,7391 | 539,2038 | 0,00185 |
| Resíduo | 2 | 0,7965 | 0,3983 | | |
| Total | 5 | 645,0137 | | | |

Tabela 52: Análise de variância da função exponencial característica do protótipo durante os ensaios com escoamento no sentido ascendente, coincidente ao processo de retrolavagem, com camada filtrante H2 e intervalo granulométrico de areia G3.

| Fonte de Variação | G. L | S. Q. | Q. M. | F | P- valor |
|-------------------|------|----------|---------|----------|----------|
| Regressão | 3 | 665,3129 | 221,771 | 612,1945 | 0,00163 |
| Resíduo | 2 | 0,7245 | 0,3623 | | |
| Total | 5 | 666,0375 | | | |

8.6 Equações de perda de pressão dos ajustes exponenciais dos dados experimentais do protótipo.

Tabela 53: Equações de perda pressão (kPa) resultantes dos ajustes exponenciais para o protótipo em função da velocidade ($m s^{-1}$) na tubulação e com sentido de escoamento descendente (Filtragem).

| Condição | | Equação | R ² |
|-------------------|------------|---------------------------------|----------------|
| G1 (0,5 a 1,0 mm) | H1 (30 cm) | $H_f = 11,16e^{V/2,18} - 9,56$ | 0,997 |
| | H2 (45 cm) | $H_f = 14,97e^{V/2,16} - 13,84$ | 0,994 |
| G2 (0,8 a 1,2 mm) | H1 (30 cm) | $H_f = 10,97e^{V/2,7} - 10,07$ | 0,973 |
| | H2 (45 cm) | $H_f = 4,93e^{V/1,64} - 2,57$ | 0,992 |
| G3 (1,0 a 1,5 mm) | H1 (30 cm) | $H_f = 2,84e^{V/1,5} - 1,66$ | 0,999 |
| | H2 (45 cm) | $H_f = 2,26e^{V/1,34} - 0,66$ | 0,999 |

Tabela 54: Equações de perda pressão (kPa) resultantes dos ajustes exponenciais para o protótipo em função da velocidade ($m s^{-1}$) na tubulação e com sentido de escoamento ascendente (Retrolavagem).

| Condição | | Equação | R ² |
|-------------------|------------|---------------------------------|----------------|
| G1 (0,5 a 1,0 mm) | H1 (30 cm) | $H_f = 12,89e^{V/2,37} - 11,41$ | 0,997 |
| | H2 (45 cm) | $H_f = 4,76e^{V/1,31} - 1,43$ | 0,995 |
| G2 (0,8 a 1,2 mm) | H1 (30 cm) | $H_f = 2,53e^{V/1,22} + 0,22$ | 0,997 |
| | H2 (45 cm) | $H_f = 3,76e^{V/1,43} - 1,49$ | 0,998 |
| G3 (1,0 a 1,5 mm) | H1 (30 cm) | $H_f = 58,28e^{V/9,19} - 59,36$ | 0,972 |
| | H2 (45 cm) | $H_f = 43,00e^{V/7,30} - 43,44$ | 0,970 |