

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**AVALIAÇÃO DOS COMPONENTES HIDRÁULICOS E DO
MATERIAL FILTRANTE EM FILTROS DE AREIA
UTILIZADOS NA IRRIGAÇÃO**

MÁRCIO MESQUITA

CAMPINAS
FEVEREIRO DE 2010

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**AVALIAÇÃO DOS COMPONENTES HIDRÁULICOS E DO
MATERIAL FILTRANTE EM FILTROS DE AREIA
UTILIZADOS NA IRRIGAÇÃO**

Dissertação submetida à banca
examinadora para a obtenção do título de
Mestre em Engenharia Agrícola, na Área
de Concentração em Água e Solo.

MÁRCIO MESQUITA

ORIENTADOR: PROF. DR. ROBERTO TESTEZLAF

CAMPINAS
FEVEREIRO DE 2010

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

M562a Mesquita, Marcio
Avaliação dos componentes hidráulicos e do material
filtrante em filtros de areia utilizados na irrigação /
Marcio Mesquita. --Campinas, SP: [s.n.], 2010.

Orientador: Roberto Testezlaf.
Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

1. Engenharia de irrigação. 2. Irrigação agrícola. 3.
Estruturas hidráulicas. 4. Filtros e filtração. I. Testezlaf,
Roberto. II. Universidade Estadual de Campinas.
Faculdade de Engenharia Agrícola. III. Título.

Título em Inglês: Evaluation of hydraulic components and the filter material in sand
filters used for irrigation

Palavras-chave em Inglês: Irrigation engineering, Irrigation agriculture, Hydraulic
structures, Filters and filtration

Área de concentração: Água e Solo

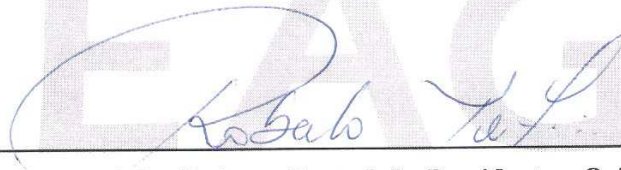
Titulação: Mestre em Engenharia Agrícola

Banca examinadora: Delvio Sandri, Edson Eiji Matsura

Data da defesa: 19/02/2010

Programa de Pós Graduação: Engenharia Agrícola

Este exemplar corresponde à redação final da **Dissertação de Mestrado** defendida por **Márcio Mesquita**, aprovada pela Comissão Julgadora em 19 de fevereiro de 2010, na Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas.



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



Prof. Dr. Delvio Sandri – Membro Titular
UEG



Prof. Dr. Edson Eiji Matsura - Membro Titular
Feagri/Unicamp

A toda a minha família, mãe, pai, avós, tios, tias e primos, aos meus irmãos, Adriano, Flaviana, Fernando e Nayara, e ao meu amigo Rogério, pelo amor, apoio e incentivo, ofereço.

A minha noiva, Aline, e aos meus sobrinhos, Guilherme, Gustavo, Adrielle, Kaio Fernando e Mariana, por permitir o meu amor, dedico.

AGRADECIMENTOS

A DEUS por estar sempre presente em minha vida;

A Faculdade de Engenharia Agrícola – UNICAMP, pela oportunidade oferecida;

Ao meu Orientador, Prof. Dr. Roberto Testezlaf, por assumir o papel de orientação e amizade. Obrigado por sua orientação segura e competente;

Aos meus pais José Maria e Maria das Graças, pelo dom da vida e aos meus irmãos e sobrinhos por todo amor, apoio e respeito às minhas decisões;

A minha noiva, Aline, pelo amor e paciência;

Às empresas Amanco Brasil, Marbella do Brasil e Hidro Solo Indústria e Comércio pela doação dos filtros avaliados neste trabalho e a Indústria Teo Tokus pelo fornecimento de areia para compor o leito filtrante dos filtros avaliados;

Aos produtores que permitiram avaliar seus equipamentos, abrindo as portas para o conhecimento, meus sinceros agradecimentos;

Aos professores e aos funcionários da Pós-Graduação da FEAGRI pelo apoio, pela dedicação ao trabalho e pela transferência de conhecimento;

Aos queridos colegas da Pós-Graduação: Adriana, Camila, Camilo, Carlos, Conan, Danielle, Douglas, Franciana, Karol, Laura, Monalisa, Rívia, Rhuanito, e todos os outros com quem convivi por todo esse tempo. Vocês serão companheiros para toda a vida...;

Ao professores da Universidade Estadual de Goiás – UEG/UNUCET, pelo incentivo;

À Capes, pela concessão de bolsa e ao CNPq pelo financiamento do projeto de pesquisa, que possibilitaram melhores condições para a realização deste trabalho;

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

A todos,

Muito Obrigado!

Você Aprende

“...E aprende a construir todas as suas estradas no hoje, porque o terreno do amanhã é incerto demais para os planos, e o futuro tem o costume de cair em meio ao vão... Aprende que as circunstâncias e os ambientes têm influência sobre nós, mas nós somos responsáveis por nós mesmos. Começa a aprender que não se deve comparar com os outros, mas com o melhor que pode ser. Descobre que se leva muito tempo para se tornar a pessoa que quer ser, e que o tempo é curto. Aprende que não importa onde já chegou, mas onde está indo, mas se você não sabe para onde está indo, qualquer lugar serve. Aprende que, ou você controla seus atos ou eles o controlarão, e que ser flexível não significa ser fraco ou não ter personalidade, pois não importa quão delicada e frágil seja uma situação, sempre existem dois lados...”

William Shakespeare

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	ix
LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE SÍMBOLOS	xiv
RESUMO	xvi
ABSTRACT	xviii
1 INTRODUÇÃO.....	19
2 OBJETIVOS.....	22
2.1 OBJETIVO GERAL.....	22
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	22
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
3.1 IRRIGAÇÃO LOCALIZADA.....	23
3.2 QUALIDADE DA ÁGUA PARA A IRRIGAÇÃO LOCALIZADA	23
3.3 TRATAMENTO FÍSICO DA ÁGUA PARA IRRIGAÇÃO LOCALIZADA.....	26
3.4 FILTROS DE AREIA	28
3.4.1 <i>Características estruturais dos filtros de areia</i>	29
3.5 PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO DOS FILTROS DE AREIA	32
3.5.1 <i>Processo de filtração em filtros de areia</i>	32
3.5.2 <i>Processo de limpeza (retrolavagem) de filtros de areia</i>	34
3.6 CARACTERÍSTICAS DO LEITO FILTRANTE	36
3.6.1 <i>Caracterização da altura do leito filtrante</i>	36
3.6.2 <i>Caracterização do material filtrante</i>	37
3.7 AVALIAÇÃO DE FILTROS DE AREIA	48
3.7.1 <i>Perda de carga em filtros de areia</i>	48
3.7.2 <i>Eficiência de remoção</i>	59
3.8 VAZÃO DE FILTRAÇÃO NOS FILTROS DE AREIA	60
4 MATERIAL E MÉTODOS.....	62
4.1 LEVANTAMENTO DE FABRICANTES BRASILEIROS DE FILTROS E DE MODELOS DE EQUIPAMENTOS IMPORTADOS COMERCIALIZADOS NO BRASIL.....	62
4.2 CARACTERIZAÇÃO DA OPERAÇÃO DE FILTROS DE AREIA NAS PROPRIEDADES RURAIS	62
4.3 CARACTERIZAÇÃO HIDRÁULICA DE FILTROS DE AREIA EM CONDIÇÕES LABORATORIAIS.	64
4.3.1 <i>Caracterização do material filtrante</i>	65
4.3.2 <i>Caracterização hidráulica dos filtros de areia</i>	69
4.4 SIMULAÇÃO MATEMÁTICA DO COMPORTAMENTO DOS FILTROS DE AREIA	75
4.4.1 <i>Efeito da estrutura hidráulica na perda de carga</i>	75
4.4.2 <i>Efeito da camada filtrante e da granulometria na perda de carga</i>	76
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	78

5.1	LEVANTAMENTO DE FABRICANTES BRASILEIROS DE FILTROS DE AREIA E DE MODELOS DE EQUIPAMENTOS NACIONAIS E INTERNACIONAIS COMERCIALIZADOS NO BRASIL	78
5.2	CARACTERIZAÇÃO DA OPERAÇÃO DOS FILTROS EM CAMPO	82
5.3	CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL FILTRANTE	85
	5.3.1 <i>Características granulométricas da areia</i>	85
	5.3.2 <i>Avaliação dos parâmetros físicos dos grãos de areia</i>	87
5.4	CARACTERIZAÇÃO HIDRÁULICA DOS FILTROS DE AREIA	89
	5.4.1 <i>Análise do efeito da estrutura do filtro na perda de carga</i>	89
	5.4.2 <i>Avaliação da variação da perda de carga em função da granulometria da areia e altura da camada filtrante</i>	91
5.5	MODELAGEM MATEMÁTICA DO COMPORTAMENTO HIDRÁULICO DE FILTROS DE AREIAS	96
	5.5.1 <i>Efeito da estrutura hidráulica na perda de carga</i>	96
	5.5.2 <i>Efeito da camada filtrante e da granulometria na perda de carga</i>	99
6	CONCLUSÕES	103
7	RECOMENDAÇÕES	104
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	105
	ANEXOS	111

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Elementos físicos, químicos e biológicos que produzem obstrução nos sistemas de irrigação localizada.....	24
Tabela 2: Risco potencial de entupimento pelo uso da água de irrigação.....	25
Tabela 3: Recomendação das peneiras utilizadas em ensaios de granulometria.....	39
Tabela 4: Relação do diâmetro efetivo médio e o diâmetro de partículas removidas para diferentes materiais filtrantes.....	40
Tabela 5: Valores típicos de esfericidade (ψ), fator de forma (FF) e porosidade (ϵ).	43
Tabela 6: Valores típicos da dureza dos materiais na escala Mohs.....	46
Tabela 7: Propriedades típicas dos materiais mais utilizados como meio granular	47
Tabela 8: Massa específica de materiais filtrantes convencionais.	48
Tabela 9: Tipos de regimes de escoamento em meio poroso com as respectivas equações para determinar a perda de carga.....	55
Tabela 10: Valores de taxa de filtração recomendadas por diferentes autores.....	61
Tabela 11: Dimensões e características estruturais dos filtros avaliados.	70
Tabela 12: Valores das alturas da camada filtrante e das cargas hidráulicas utilizadas nos ensaios dos filtros de areia em laboratório.	74
Tabela 13: Valor dos parâmetros a , b e da porosidade para diferentes materiais filtrantes.	76
Tabela 14: Valores das variáveis utilizadas nas simulações para validação da equação de TRUSSEL & CHANG (1999).....	77
Tabela 15: Características dimensionais e estruturais das principais marcas de filtros de areia comercializados no Brasil.....	79
Tabela 16: Dados coletados e estimados durante as visitas aos produtores.	83
Tabela 17: Valores de SST e da eficiência de remoção dos filtros avaliados nas visitas.....	84
Tabela 18: Valores médios da massa (g), do percentual retido e do percentual que passou por cada malha das peneiras para as amostras de areia ensaiadas.	86
Tabela 19: Parâmetros granulométricos D_{10} , D_{60} , CU das amostras avaliadas.	87
Tabela 20: Valores médios do diâmetro equivalente, da densidade das partículas, da porosidade e da esfericidade para as amostras ensaiadas	88
Tabela 21: Equação de perda de carga em função da vazão ($m^3 h^{-1}$) para os três filtros de areia avaliados.	96

Tabela 22: Dados de ensaio para determinação da curva granulometria 0,5 a 1,0 (mm).....	113
Tabela 23: Dados de ensaio para determinação da curva granulometria 0,8 a 1,2 (mm).....	113
Tabela 24: Dados de ensaio para determinação da curva granulometria 1,0 a 1,5 (mm).....	113
Tabela 25: Dados do ensaio para determinação da porosidade para a granulometria de 0,5 a 1,0 (mm)	114
Tabela 26: Dados do ensaio para determinação da porosidade para a granulometria de 0,8 a 1,2 (mm)	114
Tabela 27: Dados do ensaio para determinação da porosidade para a granulometria de 1,0 a 1,5 (mm)	114
Tabela 28: Valores médios do diâmetro equivalente (D_{eq})	114
Tabela 29: Valores médios de esfericidade (ψ)	114
Tabela 30: Valores de perda de carga para os três filtros avaliados vazios para diferentes cargas hidráulicas e os respectivos valores de desvio padrão e coeficientes de variações.....	115
Tabela 31: Valores médios de perda de carga do filtro 1 para as alturas de 20, 29 e 37,5 cm nas três granulometrias avaliadas.	115
Tabela 32: Valores médios de perda de carga do filtro 2 para as alturas 24, 34,8 e 45 cm nas três granulometrias avaliadas.	116
Tabela 33: Valores médios de perda de carga do filtro 3 para as alturas de 24, 34,8 e 45 cm nas três granulometrias avaliadas.,	116
Tabela 34: Análise de variância para o modelo alométrico linear característico do filtro 1. ...	117
Tabela 35: Análise de variância para o modelo alométrico linear característico do filtro 2. ...	117
Tabela 36: Análise de variância para o modelo alométrico linear característico do filtro 3. ...	117
Tabela 37: Análise de variância para a função exponencial característica do filtro 1.....	117
Tabela 38: Análise de variância para a função exponencial característica do filtro 2.....	117
Tabela 39: Análise de variância para a função exponencial característica do filtro 3.....	117
Tabela 40: Análise de variância para os ajustes lineares utilizados na comparação dos dados experimentais e estimados pelo modelo proposto.	118

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Recomendação da aplicação dos diferentes tipos de filtro em função dos diâmetros de partículas a serem removidas. (Fonte: TESTEZLAF, 2006).	27
Figura 2: Estrutura de um filtro de areia utilizado na irrigação (Fonte: Catálogo da empresa Amiad)	28
Figura 3: Esquema mostrando a movimentação das partículas de areia e de água no interior do filtro por projeto inadequado do difusor.	30
Figura 4: Tipos de sistemas de drenagem utilizados em filtros de areia.	31
Figura 5: Modelos de crepinas fabricados no Brasil e utilizadas em filtros de areia	32
Figura 6: Detalhe de crepina rompida devido à sobrepressão no interior do filtro de areia.	32
Figura 7: Esquema da execução do processo de filtragem em filtros de areia.	33
Figura 8: Esquema da execução do processo de retrolavagem em um filtro de areia.	35
Figura 9: Curva típica de distribuição granulométrica de materiais filtrantes.	39
Figura 10: Relação entre esfericidade, porosidade e nível de compactação da camada filtrante. Fonte: SIWIEC (2007)	43
Figura 11: Padrões de formas de grãos inseridos em um círculo (FAIR et al., 1968).	44
Figura 12: Escala de comparação visual da forma geométrica e valores de coeficiente de esfericidade. Fonte: DI BERNADO & DANTAS (2005)	44
Figura 13: Imagens ampliadas de amostras com diferentes granulometrias utilizadas na determinação da esfericidade da areia.	68
Figura 14: Módulo experimental e seus componentes.	70
Figura 15: Detalhe da conexão do transdutor de pressão com o sistema de aquisição.	71
Figura 16: Detalhes da construção e instalação tomada de pressão integrada à tubulação.	72
Figura 17: Módulo experimental com detalhes da conexão do sistema de aquisição de dados.	72
Figura 18: Ligações dos sensores de medição de pressão e vazão.	72
Figura 19: Filtros de areia de fabricantes nacionais, sendo; Amanco (a), Hidro Solo (b) e Marbella (c). Fonte: Catálogos das empresas	78
Figura 20: Filtros de areia de fabricantes internacionais, Odis (a), Arkal (b) e Amiad (c). Fonte: Catálogos das empresas	79
Figura 21: Sistema de drenagem tipo braço coletor utilizados em filtros de areia, da marca Amanco.	80

Figura 22: Crepinas cônicas utilizadas nos filtros da marca Marbella (a) e crepinas cilíndricas da marca Hidro Solo (b).	80
Figura 23: Modelos de difusores encontrados nos filtros Amanco (a), Hidro Solo (b) e Marbella (c).	81
Figura 24: Filtros das propriedades visitadas mostrando as condições externas dos equipamentos, na propriedade Ponte Baixa (a), Estância Santa Maria (b) e Vem Flor Esmeralda (c).	82
Figura 25: Condições internas dos filtros das propriedades visitadas, Ponte Baixa (a) e Estância Santa Maria (b).	83
Figura 26: Curvas granulométricas das três amostras de areia ensaiadas	86
Figura 27: Curvas da variação da perda de carga em função da taxa de filtração para os três filtros avaliados na condição de ausência da areia no seu interior.	90
Figura 28: Curvas da variação da perda de carga em função da taxa de filtração para os três modelos de filtros nas diferentes condições de ensaio.	92
Figura 29: Fotos realçando o fenômeno da movimentação da superfície de filtragem para os filtros 2 e 3.	94
Figura 30: Curva característica de perda de carga em função da vazão para o filtro 1 sem camada filtrante.	97
Figura 31: Curva característica de perda de carga em função da vazão para o filtro 2 sem camada filtrante.	98
Figura 32: Curva característica de perda de carga em função da vazão para o filtro 3 sem camada filtrante.	98
Figura 33: Comparação da perda de carga estimada e experimental para o filtro 1, utilizando o modelo de TRUSSEL & CHANG (1999) e o modelo combinado que considera o efeito das características hidráulicas do filtro.	99
Figura 34: Comparação da perda de carga estimada e experimental para o filtro 2, utilizando o modelo de TRUSSEL & CHANG (1999) e o modelo combinado que considera o efeito das características hidráulicas do filtro.	100
Figura 35: Comparação da perda de carga estimada e experimental para o filtro 3, utilizando o modelo de TRUSSEL & CHANG (1999) e o modelo combinado que considera o efeito das características hidráulicas do filtro.	101

Figura 36: Esquema do projeto estrutural da placa difusora do filtro 1.	118
Figura 37: Esquema estrutural da placa difusora do filtro 2.....	119
Figura 38: Esquema estrutural da placa difusora do filtro 3.....	119

LISTA DE SÍMBOLOS

a e b = componentes da forma geométrica dos grãos

CU = coeficiente de uniformidade

CV = coeficiente de variação (%)

d = diâmetro efetivo do grão (L)

D_{eq} = diâmetro equivalente (L)

D_{60} = diâmetro do grão equivalente à malha da peneira que permite a passagem de 60% de areia (L)

D_{10} = diâmetro do grão equivalente à malha da peneira que permite a passagem de 10% de areia (L)

E_R = eficiência de remoção de partículas (%)

g = constante da aceleração da gravidade ($L.T^{-2}$)

H_{fT} = perda de carga total dos filtros de areia (L)

$H_{f_{vazio}}$ = perda de carga da estrutura física do filtro sem leito filtrante (L)

Δh_i = perda de carga localizada de acessórios (L)

k_t e c = constantes geométricas dos grãos

k_i = coeficiente de perda de carga característico do acessório

\overline{m} = massa média dos grãos (M)

m_g = massa de grãos (M)

Q = vazão de filtração ($L^3.T^{-1}$)

r = dimensão menor da partícula de areia (L)

R_e = Número de Reynolds

s e t = dimensões geométricas da areia

S_1 = concentração de sólidos suspensos totais na entrada do filtro ou afluente ($M.L^{-1}$)

S_2 = concentração de sólidos suspensos totais na saída do filtro ou efluente ($M.L^{-1}$)

Tf = taxa de filtração ($L^3.L^{-2}.T^{-1}$)

V = velocidade superficial na camada filtrante ($L.T^{-1}$)

V_a = volume de álcool etílico utilizado (L^3)

V_b = volume do balão volumétrico (L^3)

V_g = volume de grãos (L^3)

V_t = volume total ocupado pelo material (L^3)

v = velocidade média do fluido na tubulação ($L\ T^{-1}$)

Ψ = esfericidade

ρ_s = massa específica do material ($M\ L^{-3}$)

ε = porosidade (volume de vazios)

ρ = densidade do fluido ($M.L^{-3}$)

μ = viscosidade do fluido ($M.T^{-1}.L^{-2}$)

ΔH = perda de carga no meio filtrante (L)

ΔL = espessura da camada filtrante (L)

α_F = coeficiente de permeabilidade associado à componente linear da perda de carga

β_F = coeficiente de permeabilidade associado à componente não linear da perda de carga.

λ_0 e λ_1 = parâmetros ajustados das equações características dos filtros de areia

σ = desvio padrão da média

RESUMO

Filtros de areia são equipamentos recomendados no tratamento de água de irrigação em sistemas localizados, na presença de materiais orgânicos e inorgânicos. Contudo, o pouco conhecimento disponível na literatura e as informações técnicas dispersas, que não chegam ao produtor, limitam a operação e manutenção desses filtros de forma apropriada às nossas condições de qualidade de água. Buscando contribuir com informações que alterem essa situação, o presente trabalho teve como objetivo determinar a influência da granulometria das partículas de areia e da altura do leito filtrante no comportamento hidráulico de três modelos nacionais de filtros de areia com diferentes componentes internos de difusão e de drenagem, utilizando água limpa. Inicialmente, realizou-se um levantamento dos principais equipamentos comercializados no Brasil, identificando a sua origem e caracterizando suas estruturas, componentes e padrões operacionais. Em seguida, foram realizadas visitas técnicas a propriedades rurais, analisando o nível de operacionalidade dos filtros de areia em campo, identificando os principais problemas e possíveis falhas de funcionamento e/ou critérios adotados durante a operação desses equipamentos, utilizando uma metodologia de campo desenvolvida especificamente para esse objetivo. Na etapa experimental, caracterizaram-se fisicamente três amostras de areia pertencentes a diferentes intervalos granulométricos, que foram utilizadas na caracterização hidráulica dos filtros. Essa caracterização constituiu-se na determinação da perda de carga em função da taxa de filtração para a condição de filtros vazios e para três alturas de leito filtrante. Finalizando, realizou-se a validação de um modelo matemático que explicasse o comportamento físico da presença dos difusores e drenos no processo de filtração para os equipamentos avaliados. O levantamento realizado demonstrou que os filtros comercializados no Brasil apresentam diferentes projetos de componentes ou partes internas, com poucas informações sobre o seu dimensionamento e também para a sua operação. As visitas técnicas aos produtores rurais detectaram o pouco conhecimento que estes possuíam sobre a operação de filtração e retrolavagem em filtros de areia. Os resultados experimentais obtidos demonstraram que a variação da perda de carga é inversamente proporcional ao diâmetro efetivo dos grãos de areia e diretamente proporcional à altura da camada filtrante. Adicionalmente, verificou-se que o tipo de componentes internos interage diferentemente com a granulometria e altura da camada filtrante, modificando as características hidráulicas de operação dos filtros. O modelo matemático composto, $H_f =$

$(\beta_0 \cdot e^{Q \cdot \beta_1}) + [\Delta L \cdot (\alpha_F V + \beta_F V^2)]$, explicou adequadamente a variabilidade do comportamento hidráulico dos filtros avaliados com a presença dos seus diferentes componentes internos.

Palavras-Chave: irrigação localizada, filtros de areias, difusores de água; drenos de saída.

ABSTRACT

Sand filters are recommended for water treatment in localized irrigation systems in the presence of organic and inorganic materials. However, due to the little knowledge available on literature and scattered technical information, which do not reach the farmers, there are some limitation in the operation and maintenance of these filters appropriated to our water quality conditions. In search of contributing to understand this problem, this study had the objective to evaluate the influence of sand particles size distribution and the media layer depth on the hydraulic behavior of three national models of sand filters with different internal components of diffusion plate and drainage outlets, using clean water. Initially, it was performed a survey of the major equipment brands traded in Brazil, identifying their origin and characterizing their structures, components and operating standards. In a second step, technical visits were done to farms, examining sand filters operation level in the field, identifying the main problems and possible malfunctions and/or the operation criteria used in such equipments, using a field methodology developed specifically for this purpose. In the experimental lab phase, three samples of sand belonging to different grain size distribution intervals were physically characterized to be used in the trials. Using these samples, it were performed the hydraulic characterization of three models of national commercial brands of sand filters, determining the head loss in function of the filtration rate for the following conditions: empty filters and for three media layer depths. Finally, it was developed a validation procedure of a mathematical model to explain the physical behavior of the diffusion plates and drains types on filtering process for the sand filters tested. The survey showed that the filters sold in Brazil have different designs of components and internal parts, with little information about its drawing and field operation. The technical visits to the farmers found that they had little knowledge about the filtration and backwash operations. The experimental results demonstrated that the head loss variation is inversely proportional to the sand grains effective diameter and directly proportional to the media layer depth. Additionally, it was verified that the internal filter parts interact differently to the particle size and the filter layer depth modifying the hydraulic operation. The proposed composed mathematical model: $Hf = (\beta_0 \cdot e^{Q \cdot \beta_1}) + [\Delta L \cdot (\alpha_F V + \beta_F V^2)]$ adequately explained the variability of filter hydraulic behaviors considering the presence of theirs internal parts.

Keywords: localized irrigation, sand filters, diffusion plates, outlets drains.

1 INTRODUÇÃO

O aprimoramento das técnicas de planejamento, dimensionamento e operação de sistemas de irrigação, é uma necessidade atual para se enfrentar de forma racional a escassez dos recursos hídricos, provocada pelo crescimento da demanda do uso da água para atender aos diversos setores de usuários, dentre eles o setor agrícola.

Dentre os diferentes métodos de irrigação, destacam-se os de aplicação localizada, que é uma tecnologia com potencial para aumentar a eficiência de aplicação e auxiliar na redução do uso dos recursos hídricos. Esses sistemas (gotejamento ou microaspersão) se caracterizam por baixo consumo de água e energia, e operação com baixas pressões.

Para atingir esse tipo de aplicação de água, esses sistemas utilizam emissores com diâmetros de saída reduzidos e, portanto, suscetíveis ao entupimento, exigindo, assim, uma melhor qualidade da água, quando comparado a outros sistemas, para garantir a operação adequada dos equipamentos que os compõe. A qualidade de água requerida é definida a partir de parâmetros que possam restringir o seu uso na irrigação, ou seja, pelas suas características físicas (orgânicas e inorgânicas), químicas (precipitados) ou biológicas (bactérias e algas).

A melhoria da qualidade de água de irrigação e a redução dos problemas encontrados devido à obstrução de emissores podem ser atingidos pela aplicação de sistemas de tratamento, sendo a filtração e os tratamentos químicos os mais utilizados na área agrícola. A filtragem apropriada é essencial para o funcionamento eficiente dos sistemas de irrigação localizada, mas que deve ser complementar com outras medidas, como a drenagem e limpeza das linhas laterais em campo. O processo de filtragem na irrigação é realizado utilizando-se filtros de areia, de tela, de discos, de mantas sintéticas não tecidas ou de hidrociclones, os quais são instalados de forma individual ou em conjunto, dependendo das características da água disponível na propriedade e da vazão de projeto do sistema de irrigação.

Os filtros de areia diferenciam-se dos demais tipos de filtro por apresentarem um desempenho superior na retenção de partículas orgânicas, devido a sua capacidade de coletar essas impurezas pela passagem da água ao longo da camada de areia. Os mecanismos responsáveis pela remoção de partículas, transporte, aderência e

desprendimento, são complexos e influenciados pelas características físicas e químicas das partículas, presentes na água e no meio filtrante, da vazão de filtração e do método de operação dos filtros. Devido a essas características, esses filtros apresentam uma maior faixa de filtragem em comparação aos demais tipos de filtros, sendo o seu correto dimensionamento essencial para reduzir a obstrução dos emissores, manter a uniformidade de aplicação da água, evitar aumento nos custos de operação e manutenção do sistema e, principalmente, garantir o sucesso do uso dessa tecnologia.

Em contrapartida, a presença de filtros de areia e a sua dinâmica de operação podem afetar o desempenho hidráulico do sistema de irrigação. A obstrução dos poros da camada filtrante pelas impurezas presentes na água determina uma elevação da perda de carga do equipamento alterando a altura manométrica total do sistema, com conseqüente modificação na pressão de trabalho e na vazão dos emissores. Portanto, o uso desses equipamentos deve ser planejado corretamente, levando-se em consideração o conhecimento do processo de entupimento do leito filtrante, como também a limpeza desta camada, comumente chamada de retrolavagem.

Dessa forma, para o sucesso desse processo, é necessário conhecer as características de perda de carga do sistema de filtragem, a vazão volumétrica por unidade de área recomendada e a velocidade de escoamento nos poros, em relação ao modelo de filtro utilizado. Apesar da quantidade de informações essenciais para operar adequadamente esses equipamentos, a sua descrição e especificação dentro de um projeto de irrigação localizada é feita, geralmente, utilizando-se o seu diâmetro e a granulometria e quantidade da areia utilizada. A falta de informações técnicas disponibilizada pelos fabricantes e a precária assistência ao produtor, determinam que os filtros de areia operem em campo abaixo do nível recomendado ou tenham um consumo elevado de energia, trazendo prejuízos de ordem financeira e/ou técnica ao produtor.

A busca por informações técnico-científicas que aprofundem os conhecimentos sobre a influência da granulometria da areia, da altura do leito filtrante e dos diferentes tipos de estruturas internas dos filtros (difusor de entrada da água e sistemas de drenos) no desempenho hidráulico do processo de filtragem, auxiliará no desenvolvimento de procedimentos metodológicos do projeto e da operação correta desses equipamentos. Visando contribuir para a otimização do projeto e da operação de filtros de areia na área

agrícola, a hipótese dessa pesquisa assume que o tipo de estrutura hidráulica interna dos filtros de areia, determinado por três modelos distintos, interagem diferentemente com a granulometria e com altura da camada filtrante, modificando as características hidráulicas de operação do equipamento.

Pretende-se que o levantamento inicial de informações sobre esse tipo de filtro contribua preliminarmente para o desenvolvimento de uma tecnologia nacional própria, pois, os equipamentos fabricados atualmente no país são, quase na sua totalidade, baseadas em projetos de outros países. A existência de um equipamento nacional, projetado a partir de informações mais precisas e que atenda as condições encontradas nas propriedades agrícolas brasileiras, colaborará para que a filtragem atinja seu objetivo, com uma maior eficiência de remoção de partículas, contribuindo para que o agricultor opere corretamente o equipamento e reduza os custos envolvidos no processo.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Contribuir cientificamente para o entendimento do processo hidráulico durante a filtração nos filtros de areia utilizados na irrigação localizada, determinando como diferentes sistemas de difusão e de drenagem da água de filtros de areia interagem com o diâmetro efetivo da areia do meio filtrante e com a altura da camada filtrante na variação da taxa de filtração.

2.2 Objetivos específicos

- Fazer um levantamento dos principais fabricantes de filtros de areia nacional e internacional, comparando os modelos e as estruturas internas dos seus equipamentos;
- Selecionar e caracterizar modelos de filtros fabricados no Brasil com diferentes estruturas internas (difusor e drenos);
- Avaliar a operação do processo de filtração e filtros de areia em propriedades agrícolas da região de Campinas;
- Desenvolver ensaios laboratoriais com os modelos de filtros selecionados para:
 - Caracterizar o material filtrante (areia) para a realização dos experimentos;
 - Determinar a perda de carga para diferentes estruturas internas sem leito filtrante;
 - Determinar as curvas de perda de carga para diferentes granulometrias e altura da camada filtrante;
- Validar um modelo matemático que simule o processo de filtração em filtros de areia, considerando a granulometria e a altura da camada filtrante sobre a perda de carga do equipamento.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Irrigação localizada

O interesse por sistemas de irrigação localizada deve-se, principalmente, pela economia de água acompanhada por um aumento substancial na produção das culturas, especialmente aquelas que respondem positivamente a maiores níveis de umidade no solo (BERNARDO et al., 2006). Mas, se por um lado estes sistemas reduzem a quantidade de água necessária à produção agrícola, por outro, requerem águas de melhor qualidade por terem emissores com diâmetros de saída reduzidos e estarem sujeitos ao entupimento por partículas físicas, químicas e biológicas, propiciando a redução da eficiência de aplicação e da uniformidade de distribuição de água às plantas.

Assim, pode-se dizer que essa tecnologia apresenta potencial relevante para a condição atual de escassez dos recursos hídricos para a irrigação e a elevada demanda por alimentos, devido ao crescimento populacional, auxiliando na economia de água, no aumento de produtividade e na rentabilidade para os produtores. Porém, exige maiores cuidados referentes à qualidade da água de irrigação e no manejo dos sistemas.

3.2 Qualidade da água para a irrigação localizada

O problema mais grave e freqüente nas instalações de irrigação localizada, em particular o gotejamento, é o entupimento de emissores (LÓPEZ et al., 1992). A obstrução dos emissores reduz a uniformidade de distribuição da água do sistema, afeta a produção das culturas, tornando necessário a análise da qualidade da água utilizada na irrigação para indicar as ações que minimizem a ocorrência desse processo, para evitar prejuízos na produtividade e aumentar a eficiência dos sistemas de irrigação. SCALOPPI (1986) e POVOA & HILLS (1994) concordam que o entupimento de emissores está diretamente associado à qualidade da água de irrigação e que esta deve ser uma preocupação constante para os irrigantes.

O monitoramento da qualidade da água é um fator de grande importância nesse tipo de irrigação, incluindo a análises da condutividade elétrica, dos sólidos em suspensão, dos conteúdos de ferro total, cálcio, magnésio e manganês, da demanda química e bioquímica de oxigênio, do teor de matéria orgânica, dos microorganismos presentes, do conteúdo de oxigênio dissolvido e de sólidos dissolvidos totais (AYERS & WESTCOT, 1991). Diversos

fatores devem ser analisados para orientar corretamente o uso da água para fins de irrigação. NAKAYAMA & BUCKS (1986) citam as principais causas que podem provocar o entupimento de emissores e de tubulações (Tabela 1).

Tabela 1: Elementos físicos, químicos e biológicos que produzem obstrução nos sistemas de irrigação localizada

Físicos (sólidos em suspensão)	Químicos (precipitação)	Biológicos (bactérias e algas)
Partículas inorgânicas:	Carbonatos de Ca e Mg	Filamentos
Areia		
Silte	Sulfato de Ca	Lodo
Argila		
Plástico	Metais pesados:	Depósitos microbianos:
Partículas orgânicas:	Hidróxidos	Ferro
Plantas aquáticas	Carbonatos	Enxofre
(fitoplankton/algas)	Silicatos	Manganês
Animais aquáticos (zooplankton)	Sulfetos	
Bactérias	Óleos ou outros lubrificantes	
	Fertilizantes:	
	Fosfato	
	Amônia líquida	
	Fe, Cu, Zn e Mn	

Fonte: Adaptada de NAKAYAMA & BUCKS, (1986)

Atualmente, não se dispõe de um método seguro para avaliar o risco de entupimento pelo uso de uma determinada água de irrigação. A complexidade é a existência de fatores externos variáveis que intervêm neste processo, como a temperatura, que afeta a formação de precipitados e o desenvolvimento de microrganismos, e outros que não dependem somente da água, mas também dos produtos que se adicionam como os fertilizantes (PIZARRO CABELLO, 1996). De acordo com RAVINA et. al. (1992), a determinação das causas exatas da obstrução do emissor pode ser complexa, pois vários agentes na água podem interagir entre si, agravando o problema. Porém, é possível avaliar e classificar o potencial de risco ao entupimento com o uso de alguns critérios. A Tabela 2 apresenta as concentrações dos parâmetros de qualidade de água com riscos potenciais ao entupimento de emissores proposto por GILBERT & FORD (1986), baseado em fatores físicos, químicos e biológicos.

Tabela 2: Risco potencial de entupimento pelo uso da água de irrigação.

Tipos de problemas	Unidades	Risco reduzido	Risco médio	Risco alto
Físicos				
Sólidos em suspensos	mg.L ⁻¹	< 50	50 – 100	> 100
Químicos				
pH		< 7,0	7,0 – 8,0	> 8,0
Sólidos dissolvidos	mg.L ⁻¹	< 500	500 – 2000	> 2000
Manganês	mg.L ⁻¹	< 0,1	0,1 – 1,0	> 1,0
Ferro	mg.L ⁻¹	< 0,2	0,2 – 1,5	> 1,5
Sulfetos	mg.L ⁻¹	< 0,2	0,2 – 2,0	> 2,0
Biológicos				
População bacteriana	n°max./ml	< 10000	10000 – 50000	> 50000

Fonte: GILBERT & FORD (1986)

SMAJSTRLA (1995) relata que mesmo partículas muito pequenas como as de argila e microorganismos, ou algas e algumas bactérias, causam entupimento no sistema de irrigação, por floculação e formação de partículas maiores ou por precipitação de íons. Este autor relata que algumas bactérias, por oxidação de ferro dissolvido ou de sulfeto de hidrogênio, originam limos, que segundo ADIN & SACKS (1991) agem como surfactantes adesivos e facilitam a formação de agregados de argila, algas e outras partículas relativamente pequenas num mecanismo de entupimento gradual. BASTOS (1999) afirma que a precipitação química, a formação de filmes biológicos e depósitos de partículas inorgânicas no interior das tubulações e gotejadores são riscos presentes e que devem ser considerados no monitoramento da qualidade de água. Portanto, a obstrução de emissores nem sempre é causada pela ação de um único contaminante, em sua maioria o entupimento é resultante da combinação de dois ou mais fatores, especialmente entre os materiais de origem orgânica e inorgânica (ROMAN, 1999).

De maneira geral, a água utilizada em sistemas de irrigação localizada necessita de tratamento para melhorar sua qualidade, sendo que a remoção dos resíduos encontrados na água pode ser feita através de processos físicos e químicos.

Os tipos de tratamento para prevenção à obstrução dos emissores são determinados pelo tipo e quantidade de impurezas presentes na água. Geralmente, o uso de uma combinação de métodos é mais eficiente, pois processos físicos (filtros) retiram os sedimentos maiores carregados pela água e o tratamento químico e a lavagem das linhas laterais aumentam o desempenho dos sistemas (GILBERT & FORD, 1986). Por outro lado, a utilização de tratamentos combinados deve ser adotada de forma criteriosa e cuidadosa, pois em certos

casos pode ser ineficiente, dispendiosa, e apresentar riscos à saúde humana ou causar resultados indesejáveis.

3.3 Tratamento físico da água para irrigação localizada

Como tratamento físico da água de irrigação, a filtração é uma das técnicas mais recomendadas, principalmente, quando os emissores apresentam entupimentos relacionados a partículas físicas suspensas, inorgânicas (areia, silte e argila) e/ou orgânicas (formigas, lesmas, ovos de insetos, larvas, etc.). CAPRA & SCICOLONE (2004) afirmam que a filtração da água é a principal ação preventiva quanto ao entupimento de emissores, causada por partículas tanto de origem inorgânica quanto orgânica. Segundo DASBERG & BRESLER (1985), MATSURA et al. (1989) e AIROLDI (2003), o principal objetivo da filtração é remover essas impurezas, reduzir ou prevenir os problemas associados com o entupimento dos emissores, evitando a desuniformidade de distribuição de água às culturas irrigadas e também sendo a medida mais econômica a ser adotada pelo agricultor.

A filtração consiste na remoção de partículas sólidas suspensas, substâncias coloidais e de microorganismos presentes na água. O processo de filtração se dá pela passagem forçada da água contra um meio filtrante, que pode ser de fibras naturais, sintéticas não tecidas, metálicas ou por um meio poroso (constituído por areia, carvão antracito ou qualquer outro material granular). Essa ação pode ser realizada por diferentes tipos de filtros, destacando: filtros de areia, filtros de discos ou tela e os filtros de manta sintética não tecida, os quais são usados individualmente ou agrupados de forma a se obter uma melhor eficiência na remoção de impurezas conforme afirmam KELLER & BLIESNER (1990), ZEIER & HILLS (1987) e PHILLIPS (1993).

Os diversos tipos de filtro possuem diferentes recomendações de uso em função de sua efetividade na remoção de diferentes tamanhos de partículas sólidas em suspensão na água de irrigação. Segundo PHILLIPS (1995), muitos equipamentos de filtração instalados nos sistemas de irrigação localizada têm operado abaixo do nível ótimo desejado para esse processo de remoção. Observações evidenciaram erros de seleção dos produtos e inadequação no monitoramento e na manutenção a campo, o que resulta no comprometimento do desempenho do sistema de filtração. Assim, a escolha do sistema de filtração depende necessariamente do tipo e quantidade de impurezas presentes na água, da vazão do sistema de

irrigação e da qualidade requerida do efluente para satisfazer o funcionamento dos emissores. Nessa seleção, os critérios que devem ser levados em conta é a faixa efetiva de remoção de cada tipo de filtro e a escolha das características do meio filtrante. TESTEZLAF (2006) apresenta a relação entre o intervalo efetivo de atuação para cada tipo de filtro para diferentes granulometrias de sólidos em suspensão presentes na água de irrigação (Figura 1).

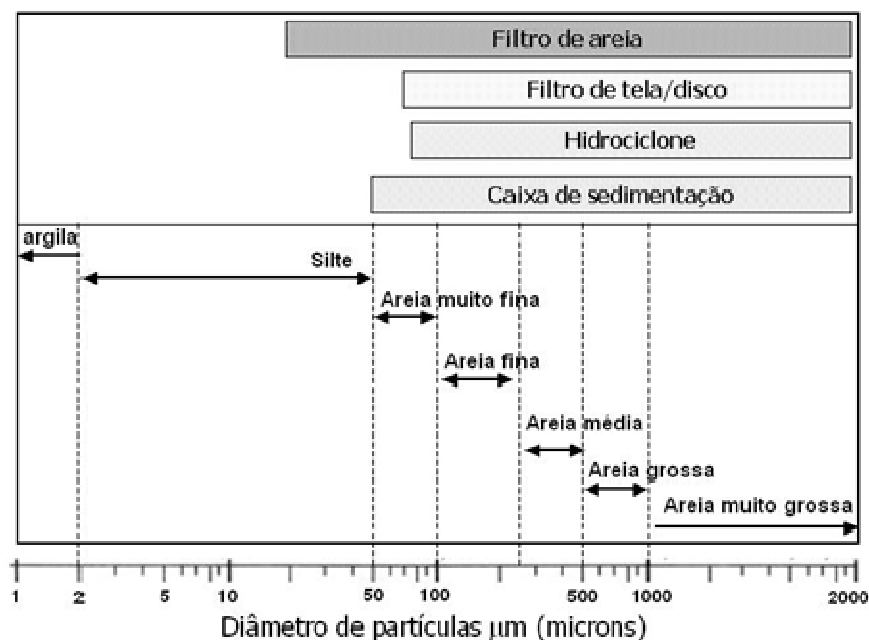


Figura 1: Recomendação da aplicação dos diferentes tipos de filtro em função dos diâmetros de partículas a serem removidas. (Fonte: TESTEZLAF, 2006).

Outro critério de seleção do sistema de filtragem é a escolha da malha do elemento filtrante a partir do valor da menor abertura de passagem desse elemento para não permitir a passagem de partículas com diâmetros maiores que $1/10$ e $1/5$ do menor diâmetro do orifício de passagem no interior do emissor, para gotejadores e microaspersores, respectivamente, (KELLER & BLIESNER, 1990; PIZARRO CABELLO, 1996). Esse critério pode ser insuficiente, uma vez que partículas de argila presentes na água de irrigação conseguem passar através dos sistemas de filtragem. Portanto, os filtros terão sua eficiência de remoção relacionada diretamente à escolha correta dos seus elementos filtrantes, padronizados por um valor de mesh correspondente (número de malha por polegada linear) para cada um desses materiais, definindo-se o tamanho das partículas possíveis de serem retidas.

3.4 Filtros de areia

Os filtros de areia são equipamentos utilizados na filtragem de água que apresentam como elemento filtrante uma ou mais camadas de materiais granulares, principalmente areia e/ou pedregulhos. Segundo BRANDÃO et al. (2001), podem ser classificados de acordo com a taxa de filtração, sendo considerados de ação rápida para valores entre 120 a 240 $\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ou lentos entre 3 a 6 $\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$. Os filtros utilizados em irrigação se caracterizam por possuir diâmetros na faixa de 200 a 1500 mm e operando em vazões que variam de 0,4 a 120 $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$, sendo, portanto classificados como de ação rápida, pressurizados e de fluxo descendentes.

Esses equipamentos consistem basicamente de tanques ou reservatórios cilíndricos metálicos ou de poliéster (Figura 2), cujo no interior se coloca uma camada de areia (A) pela qual se filtra a água de irrigação. Apresenta como componentes estruturais uma tubulação de entrada do afluente (B), na parte superior, sendo o fluido distribuído no interior do tanque por intermédio de uma placa difusora (C). Na parte inferior da camada de areia são instalados os sistemas de drenagem (D), que direcionam a água já filtrada para a tubulação de saída (E). Esses filtros devem possuir uma abertura na parte superior (F) e outra na inferior (G), para preenchimento e o esvaziamento da areia no tanque.

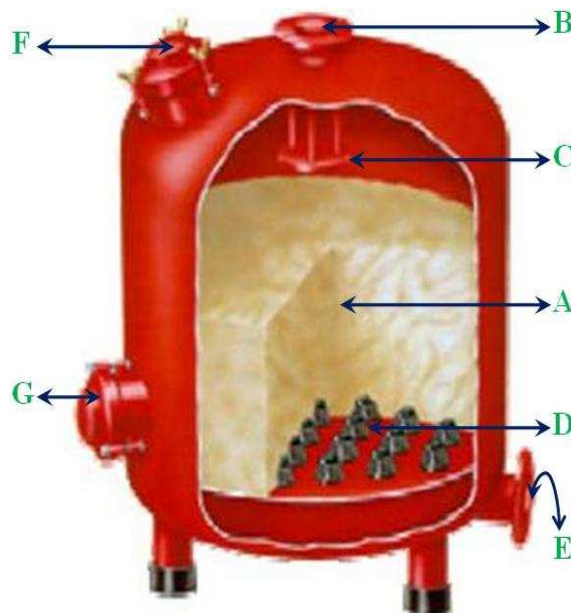


Figura 2: Estrutura de um filtro de areia utilizado na irrigação (Fonte: Catálogo da empresa Amiad)

Os filtros de areia são selecionados pela vazão nominal do sistema de irrigação, sendo necessário na sua identificação a seguintes especificações: diâmetros do cilindro do tanque,

das tubulações de entrada e saída da água, a quantidade de areia utilizada que definirá a altura da camada filtrante, taxa de filtração (vazão do afluente dividida pela área do filtro em planta), a pressão máxima de serviço e o número de drenos, comercialmente chamados de crepinas, utilizados em cada modelo.

Os sistemas de filtragem na irrigação localizada que utilizam filtros de areia apresentam uma maior faixa de atuação ou de remoção de partículas. A Figura 1, mostra que esse tipo de filtro é o mais indicado na prevenção à obstrução de emissores, principalmente quando a água apresentar contaminantes inferiores a $74\mu\text{m}$ e superiores a $20\mu\text{m}$, onde os filtros de tela, disco e hidrociclones não conseguem atuar. A sua utilização permite a retirada de impurezas conduzidas pela água superficial e/ou subsuperficial, os contaminantes podendo ser materiais orgânicos e inorgânicos (KELLER & BLIESNER, 1990). Segundo ALVES (2008), são recomendados também para águas ferruginosas que sofreram tratamento oxidante.

Mesmo sendo uma técnica que apresenta uma capacidade significativa de reter partículas, os filtros de areia possuem alguns problemas, como por exemplo, provocar maiores perdas de cargas durante a operação de filtragem alterando a altura manométrica total do sistema de irrigação, facilitar o crescimento de colônias de microorganismos na camada de areia, entre outros.

3.4.1 Características estruturais dos filtros de areia

Os filtros de areia são equipamentos que funcionam sob diversos fundamentos da mecânica dos fluidos. Por essa razão, é necessário o conhecimento de um conjunto de elementos estruturais que possibilite promover seu adequado funcionamento. Os dois elementos estruturais internos mais importantes do filtro de areia são: o difusor de entrada e o sistema de drenagem. O primeiro prepara as condições internas de movimento do afluente para o leito filtrante e o segundo proporciona condições ideais para a lavagem da camada e permite a condução do efluente sem o arraste de impurezas e/ou material filtrante para o sistema de irrigação.

3.4.1.1 Sistema de difusão do afluente

O difusor ou placa difusora é uma estrutura normalmente metálica, posicionada na extremidade superior interna do filtro, abaixo da tubulação de entrada da água, sendo responsável por distribuir uniformemente o afluente na superfície filtrante. O difusor tem o

objetivo de diminuir a energia cinética do escoamento produzida pelo bombeamento da água, transformando em energia potencial, e assim evitar a movimentação da camada superficial do elemento filtrante. Como o escoamento da água tende a se realizar em áreas de menor resistência ou menor potencial, esse efeito minimizado pelos difusores busca evitar a redução da altura da camada filtrante e manter uma boa eficiência de remoção.

O mau dimensionamento e inadequações do projeto estrutural desse acessório podem causar movimentos na superfície do leito filtrante, prejudicando o desempenho hidráulico dos filtros. Se o fluxo de entrada de água é direcionada para as paredes do filtro, ocorre uma intensificação da turbulência do fluido sobre a superfície filtrante, movimentando as partículas de areia dessas regiões para o centro do leito, criando caminhos preferências para a filtração (Figura 3). Esses caminhos preferências diminuem a área efetiva e a altura da camada de filtração, fazendo que a contaminação do leito ocorra rapidamente, reduzindo a eficiência remoção do filtro e, conseqüentemente, aumentando a frequência de retrolavagem dos filtros.

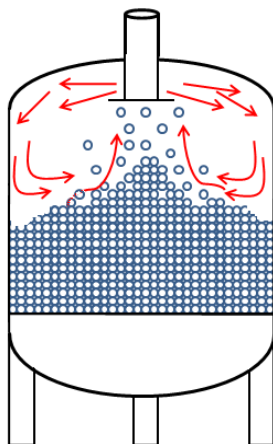


Figura 3: Esquema mostrando a movimentação das partículas de areia e de água no interior do filtro por projeto inadequado do difusor.

BURT (1994) afirma que os difusores internos não são indicados para dispersar altas vazões, recomendando o valor de $61 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ para a máxima taxa de filtração, sendo que valores maiores determinaria uma escavação 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.

3.4.1.2 Sistemas de drenagem

O sistema de drenagem dos filtros de areia geralmente são constituídos por braços coletores ou drenos (comercialmente chamados de crepinas), esquematizados nas Figura 4 (a) e (b), respectivamente. Esses drenos são responsáveis por permitir a passagem de água filtrada para o sistema de irrigação, impedindo a passagem de grãos da camada filtrante para o seu interior e por, distribuir uniformemente, o fluxo contrário no leito, durante o processo de retrolavagem.

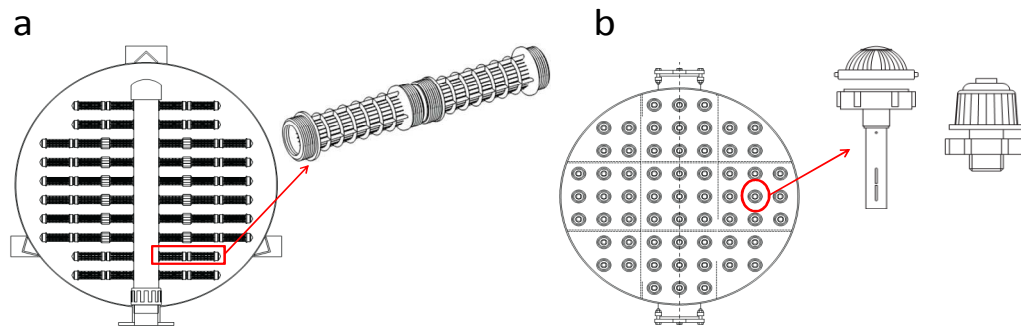


Figura 4: Tipos de sistemas de drenagem utilizados em filtros de areia.

Fonte: Catálogo da empresa Lakos (2009)

Ao se optar por crepinas é preciso que se dimensione um fundo falso no filtro para a disposição desses acessórios, que suporte a pressão interna de trabalho do equipamento. A escolha de um tipo de fundo de filtro depende principalmente, de fatores econômicos, da qualidade da operação e manutenção e da forma com que a água para lavagem é fornecida (DI BERNADO & DANTAS, 2005).

Ainda segundo os autores acima, observaram que ao avaliar filtros de areia lentos, os principais problemas decorrentes do mau funcionamento do sistema de drenagem por ocasião da lavagem são os desarranjos da camada suporte e a formação de bolos de lodo. Estes autores afirmaram que os drenos dos filtros rápidos descendentes devem atender dois princípios: coletar a água filtrada e distribuir uniformemente a água e, eventualmente o ar, para lavagem.

Os drenos ou crepinas podem ter diferentes formatos e dimensões, sendo o seu posicionamento e número de elementos definidos por critérios dos fabricantes. Há diversos modelos fabricados no Brasil (Figura 5), sendo que a sua instalação é realizada sobre uma base interna soldada na parte inferior dos filtros. As crepinas comerciais possuem geralmente ranhuras com largura igual a 0,6mm ou 0,7mm, adequadas para areia com granulometria média.



Figura 5: Modelos de crepinas fabricados no Brasil e utilizadas em filtros de areia

Segundo os fabricantes, um dos principais problemas enfrentados pelos agricultores no uso de crepinas é a sua ruptura física, causada pelo seu entupimento e crescimento da pressão interna de filtração, determinando uma redução no diferencial de pressão no filtro e a passagem de impurezas para o sistema de irrigação (Figura 6).



Figura 6: Detalhe de crepina rompida devido à sobrepressão no interior do filtro de areia.

3.5 Princípios de funcionamento dos filtros de areia

Pode-se dividir tecnicamente a operação de filtros de areia em dois processos básicos: filtração e retrolavagem, ambas com características distintas e afetadas diferentemente pela estrutura interna do equipamento.

3.5.1 Processo de filtração em filtros de areia

Por ser predominantemente de fluxo descendente, a água entra no filtro pelo difusor de entrada do equipamento, sendo distribuída sobre o leito filtrante, que tem a função de reter as impurezas presentes na água de irrigação. A Figura 7 apresenta de forma simplificada o fluxo de água dentro dos filtros de areia, que possibilita a retenção dessas impurezas.

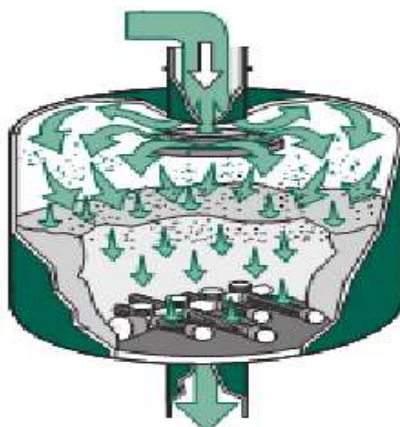


Figura 7: Esquema da execução do processo de filtração em filtros de areia

Fonte: Catálogo da empresa LAKOS (2009)

Ao passar pelo meio filtrante, as partículas em suspensão são removidas da água de irrigação. PIZARRO CABELO (1996), sugere que o processo de retenção de sólidos suspensos no meio granular ou poroso (filtro de areia) ocorre por meio de três ações distintas:

- Peneiramento ou coamento: que é um fenômeno superficial que retém partículas de tamanho superior aos poros;
- Sedimentação: a passagem da água pelos poros permite que cada espaço poroso funcione como um pequeno decantador, favorecido pela redução da velocidade da água;
- Adesão e coesão: o contato entre uma partícula em suspensão com o grão do material filtrante ou sedimentos, cria forças de atração elétrica, que aglomeram-se em partículas mais grossas, o que explica como os filtros retêm partículas muito menores que o tamanho dos poros.

Para DI BERNADO & DANTAS (2005), os filtros granulares apresentam mecanismos de filtração extremamente complexos, influenciados, principalmente, por características físicas e químicas 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. 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. DEHGHANISANIJ et al. (2004), comprovaram o fenômeno físico de remoção citado acima, ao avaliar o impacto dos contaminantes biológicos no entupimento de gotejadores, afirmando que os filtros de areia requerem um número maior de retrolavagens, e

são mais eficientes na remoção desses agentes biológicos que os filtros de disco e de poliuretano.

Dessa forma, a retenção de partículas em filtros de areia ocorre tanto pela ação de profundidade como pela ação superficial do leito. No caso da filtração com 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).

Durante a filtração, as partículas depositam-se no meio filtrante sendo removidas pela ação de um ou mais dos fenômenos citados. 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 carga e das forças hidrodinâmicas de cisalhamento, arrastando, em consequência, certa quantidade de partículas para o interior do leito filtrante. O aumento de impureza no leito filtrante exige a lavagem (retrolavagem) do filtro pela inversão do fluxo da água (DI BERNADO & DANTAS, 2005).

3.5.2 Processo de limpeza (retrolavagem) de filtros de areia

Segundo a ASABE (1994), a retrolavagem é definida como o procedimento de passagem da água através do filtro em sentido contrário ao fluxo de filtragem com o objetivo de remover partículas orgânicas e inorgânicas retidas no meio filtrante. A Figura 8 apresenta um esquema de como ocorre esse processo dentro do filtro. Para a realização da retrolavagem, utiliza-se, normalmente, água filtrada proveniente de um ou vários filtros do conjunto de filtragem, quando presente no cabeçal de controle do sistema de irrigação. Para a operacionalização da retrolavagem, os sistemas de filtração com areia devem possuir um mecanismo para reverter à direção do fluxo de água para facilitar a sua limpeza, toda vez que houver um aumento da perda de carga no filtro e, ou no final da irrigação das culturas de ciclo curto (DI BERNADO & DANTAS, 2005).

Para que o processo de retrolavagem seja executado de forma correta é preciso que ocorra a fluidização do leito filtrante. GUPTA & SATHIYAMOORTHY (1999) define a fluidização como o fenômeno de dar propriedades de um fluido a uma camada de partículas sólidas, pela ação ou efeito de passar um fluido através deste, a uma velocidade tal que consiga levantar-lhe até uma altura determinada, evitando as menores perdas possíveis da

camada utilizada. A expansão das camadas durante a retrolavagem precisa de uma quantidade necessária de pressão para manter em suspensão as partículas do filtro (TURAN et al., 2003) e seu grau de expansão depende do valor da vazão do líquido ascendente. Portanto, o processo de fluidização ocorre pela passagem do fluido de maneira ascendente através de um leito de partículas sólidas na qual se encontra uma resistência ao fluxo e uma diferença de pressão que depende das propriedades dos grãos constituintes do leito.



Figura 8: Esquema da execução do processo de retrolavagem em um filtro de areia.

Fonte: Catálogo da empresa LAKOS (2009)

A passagem do fluido no sentido contrário determina a expansão da camada filtrante, ficando parte das partículas suspensas no fluido e removendo as impurezas maiores pela água. Nesse processo, as partículas de maior tamanho tendem a ficar no fundo do filtro, precisando-se de mais pressão no momento de mantê-las em suspensão, enquanto as partículas de menor tamanho precisaram menos pressão, e sua tendência é ficar acima da camada de partículas maiores no momento da sedimentação.

TESTEZLAF (2008) afirma que o valor da vazão de retrolavagem tem de ser suficiente para originar a fluidização do leito filtrante, ou seja, a passagem reversa da água pela camada de areia deve determinar um estado de suspensão das partículas de areia, com expansão progressiva da altura do leito, atingindo um limite que possibilite a manutenção da areia dentro do filtro e remova as impurezas. A vazão de retrolavagem que determina a fluidização do leito varia com o diâmetro efetivo médio da areia, com altura da camada filtrante e com o modelo construtivo de filtro (HAMAN et al. 1994).

A definição do momento de retrolavagem pode ser realizada utilizando diferentes critérios; como tempo total de filtragem ou baseadas em valores de perda de pressão desenvolvida a partir do entupimento do leito filtrante. SILVA et al. (2003), recomendam que

a retrolavagem deve ser realizada a cada aumento de 10 a 20 % da perda de carga correspondente ao filtro limpo. De acordo com KELLER & BLIESNER (1990), a máxima perda de carga que pode ocorrer em um filtro de areia deve ser de 70 kPa, a partir da qual é recomendada a realização da retrolavagem.

A retrolavagem em filtros é necessária e parte importante do processo da filtração, indiferente do tipo de filtro, devendo produzir uma água de qualidade adequada e baixa turbidez para irrigação. Alguns problemas associados com a filtração podem ser produzidos por excesso ou por inadequação da retrolavagem. Para a melhoria do desempenho de filtro, é preciso considerar o tipo de equipamento que se está utilizando e aplicar as vazões apropriadas para a realização da retrolavagem. Uma expansão insuficiente do meio filtrante produz uma limpeza inadequada do filtro, criando diferentes problemas na filtração, como por exemplo: oscilações hidráulicas ou mudanças no fluxo, curto tempo na filtração e eventualmente formação de agregados de impurezas com elemento filtrante.

3.6 Características do leito filtrante

3.6.1 Caracterização da altura do leito filtrante

Como a filtração das impurezas presentes na água é realizada pela ação da profundidade do leito filtrante, é preciso definir adequadamente a espessura ou altura da camada de areia e, assim, garantir a otimização da operação dos filtros de areia. 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 freqüentes, devido ao aumento da perda de carga causada pela profundidade da camada. VERMEREIN & JOBLING (1984), concordam que a 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. Entretanto, as camadas filtrantes não podem ultrapassar 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.

3.6.2 Caracterização do material filtrante

A caracterização das propriedades físicas do meio filtrante desempenham fator preponderante no comportamento hidráulico e, conseqüentemente, na eficiência de filtração e na eficácia da retrolavagem requerida nos filtros de areia. Dentre elas, pode-se citar: diâmetro efetivo de partículas, coeficiente de uniformidade dos grãos de areia, esfericidade, friabilidade, massa específica, porosidade da camada formada pelos grãos e a relação entre a espessura e o tamanho médio dos grãos que o compõe. A escolha correta do elemento filtrante é importante e afeta a definição de variáveis relacionadas ao projeto, tais como: taxa de filtração disponível, qualidade do afluente, qualidade desejável do efluente, espessura da camada filtrante, entre outras. As propriedades granulométricas da camada filtrante definirão a estratégia de filtragem, pois, a remoção de impurezas é inversamente proporcional ao tamanho da granulometria da areia.

O uso de areia muito grossa pode resultar em tempos (carreiras) de filtração mais longos, porém, a qualidade do efluente é prejudicada, podendo causar o entupimento dos emissores, enquanto uma areia fina produz um efluente de melhor qualidade, resistindo à penetração dos sólidos que ficam retidos na superfície e com carreiras de filtração de curta duração. Desse modo, a capacidade de retenção e armazenamento de partículas contaminantes do leito filtrante é pouco aproveitada. Além disso, os flocos depositados na superfície deste leito tendem a se compactar, tornando-se difícil de serem removidos pela lavagem do mesmo (retrolavagem), iniciando a deterioração da camada filtrante, com a formação de bolas de lodo, gretas e fendas (RICHTER & AZEVEDO, 1993).

A determinação adequada da granulometria utilizando os parâmetros citados é extremamente importante, pois segundo DI BERNADO & DANTAS (2005), a condição ideal de filtração é aquela para a qual no término da carreira de filtração ocorre perda de carga limite praticamente no mesmo instante em que se inicia o transpasse de partículas. Com meios filtrantes de menor granulometria dificilmente ocorre o transpasse, porém, as carreiras de filtração resultam mais curtas. Por outro lado, com meios filtrantes de maior granulometria, há possibilidade de ocorrência do transpasse, porém, as taxas de filtração são mais longas e provavelmente, será requerido maior volume de água para a retrolavagem.

O critério utilizado para a escolha correta granulometria da areia para as condições do projeto de cada propriedade deve considerar a retenção de partículas que podem entupir o

menor diâmetro de saída dos emissores. A maioria dos fabricantes de filtros para irrigação localizada recomenda a remoção de partículas maiores que 0,075 mm para gotejamento e 0,15 mm para microaspersão. HAMAN et. al (1994) citam que, na falta de informações do fabricante, pode-se utilizar a regra de projetar o filtro para reter partículas superiores a 74 μ m (0,074 mm), o que corresponderia a uma areia com diâmetro efetivo médio de 0,8 mm. Outro critério existente requer a retenção de partículas com tamanhos maiores que 1/10 do diâmetro do gotejador e 1/5 do diâmetro do microaspersor (PIZARRO CABELO, 1996; GILBERT & FORD, 1986; TESTEZLAF, 2006). Para TESTEZLAF (2008) com utilização da relação entre o diâmetro efetivo e as dimensões das partículas retidas no filtro, pode-se afirmar que a areia adequada é aquela com diâmetro efetivo médio igual ao diâmetro mínimo do gotejador e ao dobro do diâmetro mínimo do microaspersor.

Características granulométricas

As dimensões físicas características de uma determinada areia a ser utilizada em filtros podem ser determinadas conhecendo-se a distribuição dos diferentes tamanhos ou diâmetros de grãos presentes em uma amostra. Essa distribuição de tamanhos é obtida no ensaio de distribuição granulométrica do material granular (curva típica de distribuição de materiais filtrantes), (Figura 9), realizado pela passagem da amostra por um conjunto de peneiras padronizadas, cujos tamanhos das aberturas são representados na Tabela 3. HAMAN et al. (1994) definiram que é necessário a determinação de dois parâmetros, diâmetro efetivo de partículas (D_{10}) e coeficiente de uniformidade (CU), para a correta seleção do material filtrante.

Não existe, até o momento, uma norma ou legislação no Brasil que defina os parâmetros físicos necessários para seleção de areia para utilização em filtros de areia em irrigação. A Norma ABNT EB-2097 (1990), que caracteriza as condições para recebimento e colocação de material filtrante (areia, antracito e/ou pedregulho) como camada suporte em filtros de abastecimento público de água, estabelece também o uso desses dois parâmetros físicos na classificação da areia, incluindo uma terceira análise de solubilidade em ácido para detectar o grau de outras impurezas presentes na amostra, realizada principalmente com o carbonato de cálcio. LÓPEZ (2007) sugere a determinação de outra característica, a friabilidade, como sendo importante na avaliação da granulometria da areia, pois determina

sua facilidade de fragmentação (quebra) do grão. Para PHILLIPS (1995) a forma dos grãos permite maiores ou menores retenções, tornando assim necessário caracterizar a esfericidade predominante dos materiais usados na filtragem.

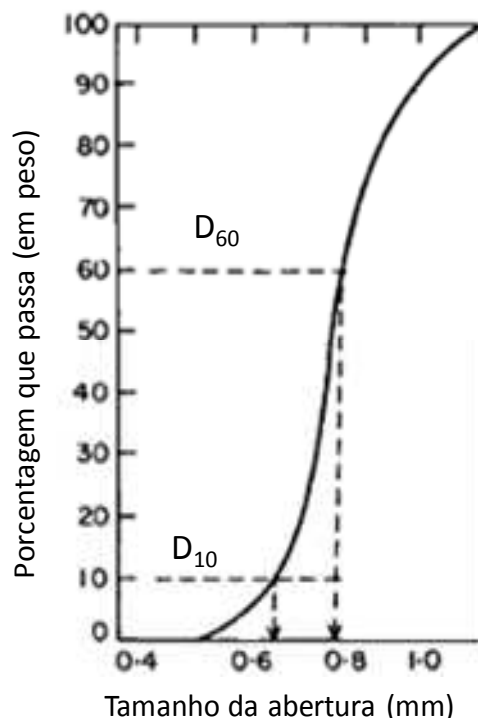


Figura 9: Curva típica de distribuição granulométrica de materiais filtrantes.

Tabela 3: Recomendação das peneiras utilizadas em ensaios de granulometria.

Série americana			
Número (*)	Abertura da malha (mm)	Número (*)	Abertura da malha (mm)
3 ¼	5,66	30	0,600
04	4,76	35	0,500
05	4,00	40	0,420
06	3,36	45	0,335
07	2,80	50	0,300
08	2,36	60	0,250
10	2,00	70	0,212
12	1,68	80	0,180
14	1,41	100	0,150
16	1,19	200	0,074
18	1,00	270	0,053
20	0,84	400	0,037
25	0,71	-	-

(*) número de malha por polegada (mesh)

Diâmetro Efetivo

O tamanho dos grãos é responsável pela eficiência de filtragem, sendo determinante no processo de retrolavagem, e seu conhecimento é de suma importância para fazer a correta seleção do leito filtrante e a sua escolha depende das impurezas presentes na água, da qualidade do efluente desejado e do menor diâmetro do orifício de saída dos emissores disponíveis (gotejador ou microaspersor).

O diâmetro efetivo (D_{10}) é definido como sendo diâmetro da abertura da peneira que permite a passagem de 10% da amostra do material granular, sendo que o seu valor caracteriza o menor diâmetro de partícula na classificação da areia e indica o tamanho da partícula que será removida pelo meio filtrante. A Tabela 4 apresenta a relação entre o diâmetro efetivo e o tamanho das partículas a serem removidas pelo meio filtrante para diferentes materiais utilizados como meio filtrante (KELLER & BLIESNER, 1990).

Tabela 4: Relação do diâmetro efetivo médio e o diâmetro de partículas removidas para diferentes materiais filtrantes.

Material	Diâmetro efetivo (D_{10}) (mm)	Relação a Mesh	Tamanho das partículas removidas (mm)
Granito moído	1,9	100-140	> 0,16
Granito moído	1,0	140-200	> 0,08
Areia de sílica	0,8	140-200	> 0,06
Areia de Sílica	0,55	200-230	> 0,04
Areia de sílica	0,34	230-400	> 0,02

Fonte: KELLER & BLIESNER (1990)

Segundo PIZARRO CABELO (1996) quanto menor for o diâmetro efetivo (D_{10}) da areia melhor será a qualidade do efluente, mas menor será o tempo de efetiva filtração do filtro, sendo, portanto, necessário a realização de um número maior de retrolavagens. Este autor afirma que as partículas que podem atravessar o leito filtrante são da ordem de 1/10 a 1/12 do diâmetro efetivo (D_{10}), ou seja, um filtro que possui uma areia com D_{10} igual a 0,75mm irá reter impurezas maiores que 0,075mm, equivalente a 200 Mesh. Por outro lado, LÓPEZ (2007) justifica a importância da determinação do D_{10} por este permitir a caracterização do diâmetro eficaz da areia, próximo de 1/7 do valor de D_{10} , diâmetro responsável por retirar as menores impurezas, afirmando que a areia utilizada deve possuir este diâmetro igual ao diâmetro mínimo do emissor.

Coefficiente de uniformidade

O coeficiente de uniformidade (CU) ou coeficiente de desuniformidade (CD) caracteriza-se por ser o intervalo de diâmetros de partículas dentro de uma mesma classificação, sendo 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, Equação 1.

$$CU = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (1)$$

O coeficiente de uniformidade (CU) é uma propriedade importante na filtração, pois a penetração das impurezas ao longo do meio filtrante está intimamente relacionada a esse coeficiente. 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 (DI BERNADO & DANTAS, 2005). HAMAN et al. (1994) recomendam um valor máximo de coeficiente de uniformidade de 1,5 para areias a serem utilizadas em filtros de irrigação. PIZARRO CABELO (1996) considera aceitável areias com coeficientes entre 1,4 e 1,6, sendo que LÓPEZ (2007) concorda que o CU tem que ser inferior a 1,6. Uma das possíveis consequências da utilização de areias com coeficientes superiores a esses valores é a ocorrência de perdas de material mais fino durante a retrolavagem.

Segundo CLEASBY & LOGSDON (1999) especificar coeficiente uniformidade baixo para a camada filtrante é importante para não afetar a porosidade, pois materiais com CU muito alto, a acomodação dos grãos pequenos no espaço vazio dos grãos maiores pode reduzir a porosidade média do leito filtrante.

Esfericidade

Dentre os critérios de escolha da granulometria adequada da areia para os filtros, PHILLIPS (1995), sugere a utilização de grãos de areia que possuam arestas afiadas e angulares que permitam a formação de trajetórias tortuosas para o fluxo da água, criando assim, um maior percurso e, possibilitando uma maior retenção de sólidos suspensos e algas. DI BERNADO & DANTAS (2005), afirmam que quanto mais irregular for a forma geométrica dos grãos, melhor o desempenho durante a filtração, enquanto os grãos de forma

arredondada apresentam maior eficiência durante a retrolavagem e perda de carga final entre 20% a 30% inferior àquela desenvolvida em grãos de forma irregular.

Uma das formas de se caracterizar o formato irregular dos grãos é utilizando a determinação de sua esfericidade, definida como sendo a relação entre a área superficial de uma esfera de mesmo volume do grão e a área superficial do grão propriamente dito. Segundo SIWIEC (2007) para partículas com formas regulares a esfericidade pode ser determinada na base desta definição. Porém, para partículas com formas irregulares a esfericidade é determinada com métodos aproximados, como a medida de três dimensões características do grão que podem ser obtidas com método óptico, densidade e volumétrico ou métodos de gás-expansão, (SCHEIDEGGER, 1960). De acordo com DHARAMAJAH & CLEASBY (1986), conhecendo estas dimensões, a esfericidade pode ser calculada pela Equação 2:

$$\psi = \frac{r}{\sqrt{s*t}} \quad (2)$$

Sendo:

r = dimensão menor da partícula (L);

s e t = são as outras dimensões (L).

Para CLEASBY & LOGSDON (1999) o conhecimento e a caracterização do formato e a esfericidade dos grãos são importantes, pois afetam o valor da vazão requerida na retrolavagem da camada porosa, na porosidade fixa do leito, na perda de carga provocada pela camada filtrante e na eficiência de filtração. CLEASBY & FAN (1981) citam que a esfericidade do material é responsável por influenciar no comportamento da camada filtrante, em específico, durante a retrolavagem, na velocidade mínima de fluidização e na expansão do leito, todos de suma importância para garantir a manutenção e operação dos filtros de areia.

SIWIEC (2007) afirma que intuitivamente, podemos imaginar que existe uma relação entre a esfericidade e a porosidade, como também ocorre uma variação da porosidade com a compactação do leito filtrante. COOKE & ROWE (1999) e SIWIEC (2007) citando RAZUMOW (1975), indicaram que, para partículas esféricas uniformes, a porosidade depende só do número de pontos de contato das esferas individuais e não em diâmetro do grão. Assim, teoricamente, a porosidade de um leito pode variar de 0,26 para camada fortemente compactada a 0,48 para uma camada sem compactação, na qual cada esfera tem 6 pontos de

contato com as esferas vizinhas. Como na prática um leito filtrante não é construído de esferas uniformes e perfeitas, a porosidade pode divergir significativamente destes valores.

A Figura 10 apresenta a relação entre esfericidade e porosidade e o grau de compactação, SIWIEC (2007). Pode-se observar que a compactação de leitos constituídos por grãos mais esféricos, ou seja, esfericidade próxima de 1, a porosidade é significativamente afetada pela compactação, sendo que o comportamento é o oposto para partículas irregulares com baixa esfericidade. Na prática essa relação tem um significado importante porque a baixa porosidade produz melhor efluente e maior perda de carga hidráulica durante o escoamento do fluido dentro do leito.

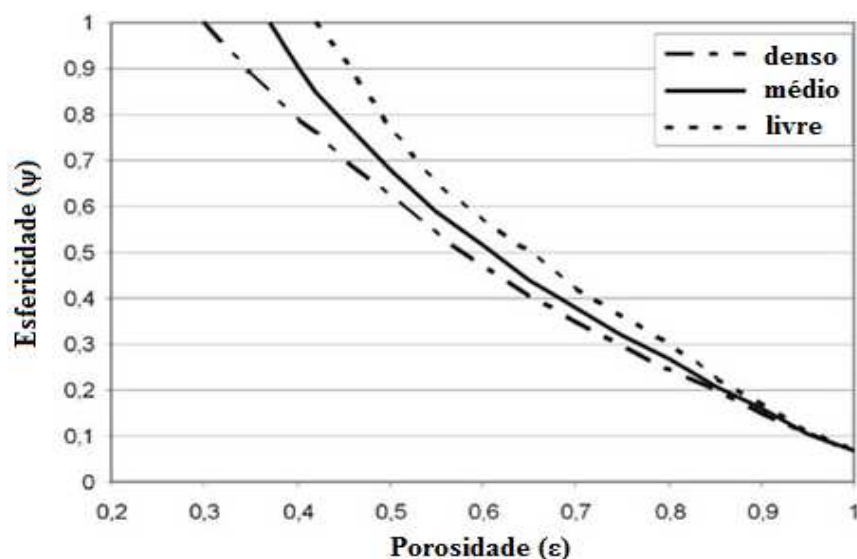


Figura 10: Relação entre esfericidade, porosidade e nível de compactação da camada filtrante.
Fonte: SIWIEC (2007)

FAIR et al. (1968) citado por DI BERNADO & DANTAS (2005) apresentaram graficamente diferentes padrões de formas dos grãos inseridos em um círculo (Figura 11), sugerindo uma relação de valores de esfericidade, fator de forma e porosidade típicas da areia, (Tabela 5).

Tabela 5: Valores típicos de esfericidade (ψ), fator de forma (FF) e porosidade (ϵ).

Forma do grão	Esfericidade (ψ)	Fator de forma (FF)	Porosidade (ϵ)
Esférico (a)	1,00	6,0	0,38
Arredondado (b)	0,98	6,1	0,38
Desgastado (c)	0,94	6,4	0,39
Agudo (d)	0,81	7,4	0,40
Angular (e)	0,78	7,7	0,43
Triturado (f)	$\leq 0,70$	8,5	0,48

Fonte: CLEASBY & FAN (1981)

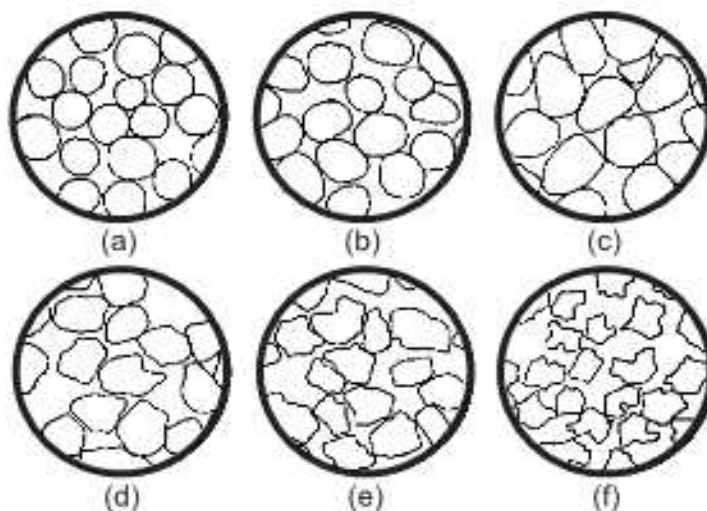


Figura 11: Padrões de formas de grãos inseridos em um círculo (FAIR et al., 1968).

Fonte: DI BERNADO & DANTAS (2005)

DI BERNADO & DANTAS (2005) citam dois métodos para determinação do valor da esfericidade. O primeiro por comparação visual, princípio de determinação direto, utilizando um instrumento óptico que amplie as imagens (lupa, microscópio, etc..) e uma escala de comparação visual para vários valores de esfericidade padronizados, conforme mostrado na Figura 12 (SUGUIO, 1973). O segundo método, princípio indireto, desenvolvido por CLEASBY & FAN (1981), consiste na determinação das perdas de carga no meio granular em estados fixo e fluidificado, variando-se a velocidade de escoamento descendente e ascendente da água a determinada temperatura.

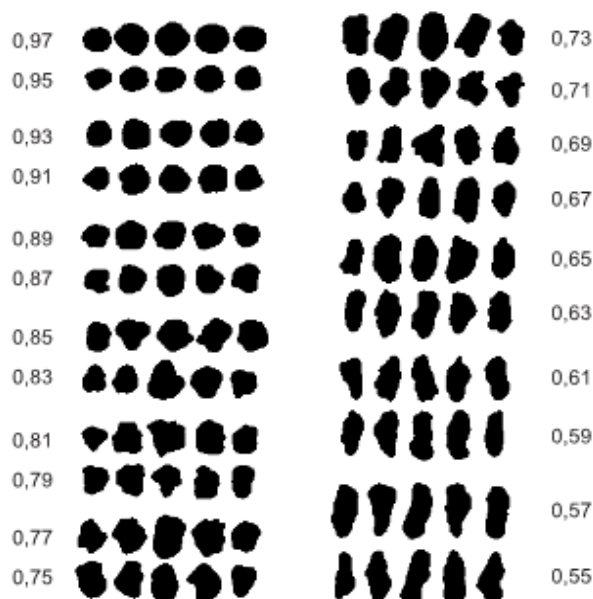


Figura 12: Escala de comparação visual da forma geométrica e valores de coeficiente de esfericidade. Fonte: DI BERNADO & DANTAS (2005)

Os métodos de determinação direta não são indicados para filtros que são constituídos de camadas de areia com diversos diâmetros, tornando difícil sua determinação, sendo sugeridos métodos indiretos.

Diâmetro Equivalente ou volumétrico

É uma grandeza física usada nos estudos de dinâmica dos fluidos que permite caracterizar seções de diâmetro não circulares individualmente, útil nas avaliações de comportamentos característicos de fenômenos de transporte, tais como a determinação do número de Reynolds, responsável pela classificação do tipo de escoamento em leito poroso. O diâmetro equivalente de um grão não esférico é igual ao de um esférico e exibem propriedades idênticas, como, aerodinâmica, hidrodinâmica, óptico e elétrico a da partícula não esférica investigada.

Friabilidade ou Dureza

Os materiais filtrantes são expostos a possíveis condições que podem causar a fragmentação da sua estrutura geométrica. HUMBY et. al. (1996) sugerem três possíveis causas de ruptura dos grãos: no transporte, durante a filtragem e na retrolavagem.

Após o seu beneficiamento a areia é transportada a granel (caçambas) ou empacotadas em sacos, usualmente condicionados em paletes. O material a granel é transferido para os filtros utilizando equipamentos tradicionais (pá), e o seu manuseio durante a formação da camada filtrante nos filtros grandes (lentos) mais agressivos, pois é comum o pisoteio do leito. Os materiais ensacados são normalmente elevados e despejados nos filtros, sujeitando os grãos que estão no fundo do filtro a esforços de compressão. Pisadas e compressões impõe uma carga mais elevada aos grãos, facilitando a fragmentação destes.

Durante a retrolavagem, especialmente com a combinação de ar e água, os grãos tendem ao atrito simultâneo, causando a abrasão. Grãos mais frágeis podem se quebrar ou trincar-se modificando seu diâmetro efetivo. Por último, a pressão de operação durante o processo de filtragem tende a comprimir a camada filtrante (HUMBY et al., 1996).

Na filtragem pressurizada utilizada na irrigação, a combinação do processo de filtragem e retrolavem, compressão e atrito dos grãos, determina as maiores possibilidades de modificação dos grãos, quebra da partícula (alteração diâmetro efetivo das partículas) ou

desgaste de suas arestas (arredondamento das partículas), alterando as características físicas do material e sua eficácia no processo. LÓPEZ (2007) sugere a determinação da friabilidade da areia utilizada, mas IVES (1975) informa que esse processo não ocorre de forma significativa para areias de sílica.

HUMBY et. al., (1996) sugere um procedimento conveniente e representativo por avaliar a resistência de abrasão da camada filtrante às condições da retrolavagem. Isto envolve expor o leito continuamente a condições representativas em uma coluna piloto no laboratório durante cinco dias, que correspondem a um tempo total de, aproximadamente, três de anos serviço, assim a perda de material será facilmente medida com ensaios granulométricos.

CLEASBY & LOGSDON (1999) afirmam que a dureza dos grãos (friabilidade) é de suma importância, pois define a durabilidade dos grãos no leito filtrante. Esta dureza é descrita pela escala de Mohs, o qual envolve uma enumeração de dureza baseada na facilidade de alguns minerais para se desgastar ou ser fragmentado por outro grão. Estes autores afirmam ainda que a aplicação de testes para determinar a dureza em grãos é difícil, concluindo que da lista de materiais usados como elemento filtrante, somente o carvão antracito e o carvão ativado tem pequena dureza, entre 2,7 a 3,0. Como a areia é formada principalmente de quartzo, elemento bastante duro, como mostra a Tabela 6, sua caracterização quanto à dureza não é necessária para efeitos práticos.

Tabela 6: Valores típicos da dureza dos materiais na escala Mohs.

Material	Dureza
Talco	1
Gipsita	2
Calcita	3
Fluorita	4
Apativa	5
Ortoclásio	6
Quartzo	7
Topázio	8
Coríndon	9
Diamante	10

Porosidade fixa da camada

A porosidade fixa da camada (ϵ) é a razão entre o volume vazio por volume total da camada, expressada por fração decimal ou porcentagem. Esta propriedade afeta o valor da vazão (velocidade) requerida na retrolavagem, à perda de carga da camada e a capacidade de retenção de impurezas do leito filtrante. A Tabela 7 apresenta valores típicos da porosidade

relacionando-os ao valor da esfericidade para três materiais utilizados como elementos filtrantes.

Tabela 7: Propriedades típicas dos materiais mais utilizados como meio granular

Propriedades do Grão	Areia Sílica	Carvão Antracito	Carvão Ativado
Massa Específica (ρ) (Kg.m^{-3})	2650-2670	1450-1730	1300-1500*
Porosidade (ϵ)	0,42-0,47	0,56-0,60	0,50
Esfericidade (ψ)	0,7-0,8	0,46-0,60	0,75

Fonte: CLEASBY & FAN (1981); DHARMARAJAH & CLEASBY (1986); CLEASBY & WOODS (1975),*para carvão virgem.

Pela Tabela 7 é possível afirmar que o valor da porosidade (ϵ) da camada é inversamente proporcional ao valor da esfericidade dos grãos, ou seja, quanto menor essa propriedade ou mais angular for os grãos, maior será porosidade da camada filtrante fixo. Adicionalmente, o valor da porosidade da camada filtrante é substancialmente afetado pela compactação do material granular, como pode ser verificado na Figura 10. Sendo o material depositado no filtro livremente, sob a ação da gravidade, sem compactação, a maior porosidade será obtida, que é a porosidade em meio filtrante não compactado, podendo ser 5% maior que a porosidade medida depois da compactação do material (AWWA, 1999).

Importante salientar que a porosidade da camada granular é mais alta próxima às paredes do filtro, devido ao efeito das paredes sobre a sua contenção. Esse efeito pode ser significativo em filtros de pequena escala (piloto), devido à porosidade do leito nesse modelo ser mais alta do que em filtros de tamanho comercial, afetando a remoção de partículas e o comportamento de perda de carga no processo de filtragem. Para minimizar o efeito da parede CLEASBY & LOGSDON (1999) sugere que filtros pilotos devem ter no mínimo um diâmetro de 50 vezes maior que o diâmetro efetivo dos grãos.

A literatura confirma que mudanças pequenas no valor da porosidade podem provocar mudanças significativas no comportamento da perda de carga da camada filtrante. Dessa forma, dados precisos na determinação da porosidade em ensaios de filtros tornam essenciais para determinar corretamente o diferencial de pressão exigido durante a limpeza do leito.

Massa específica ou Densidade

A massa específica ou densidade do grão é definida como a massa do grão por unidade de volume deste grão. O conhecimento do valor desse parâmetro é importante para

determinação da vazão requerida de retrolavagem e, também fundamental, no cálculo de perda de carga, fluidização e expansão do meio filtrante.

DI BERNADO & DANTAS (2005) citam que a técnica mais adequada para determinar a massa específica é a do picnômetro, entretanto, estes autores afirmam que a técnica do balão volumétrico possibilita determinar apropriadamente essa análise. A Tabela 8 apresenta alguns materiais granulares e os respectivos valores de massa específica.

Tabela 8: Massa específica de materiais filtrantes convencionais.

Material	Massa específica (ρ_s) (Kg/m ³)
Areia Sílica	2650-2670
Carvão Antracito	1400-1700
Granada	4100-4500

Fonte: DI BERNADO & DANTAS (2005)

3.7 Avaliação de filtros de areia

Segundo NAKAYAMA & BUCKS (1986), os parâmetros mais importantes na avaliação do desempenho dos filtros de areia em um sistema de irrigação localizada são: eficiência de remoção, percentagem de entupimento dos emissores e perda de carga causada pelo equipamento. Para SILVA (1996) existem duas maneiras de se estudar a eficiência de filtros: a) pela medida do aumento da perda de carga ao longo do tempo, devido à retenção de impurezas no meio filtrante; b) medindo-se a concentração de impurezas nas amostras de água coletadas antes e depois do filtro.

3.7.1 Perda de carga em filtros de areia

A perda de carga é definida como sendo parte da energia potencial de pressão e de velocidade que é transformada em outros tipos de energia, que é dissipada no processo quando ocorre o escoamento de água em condutos fechados (CAIXETA, 1991). No caso de filtros de areia, a perda de carga é causada pela passagem da água de irrigação pelo interior do filtro, resultante da resistência das partículas do meio filtrante ao movimento do fluido e das perdas de atrito resultante da estrutura hidráulica dos filtros. CHANG et al. (1999) afirmam que a estimativa perda de carga, para camadas porosas limpas é uma componente importante para o projeto de filtro, pois no projeto de sistemas de filtragem é preciso estimar o quanto de perda de carga total será consumido na passagem da água pelo filtro limpo e quanto ficará disponível

para o processo de retenção de partículas no filtro. Dessa forma, o cálculo correto do valor de perda de cargas das estruturas hidráulicas disponíveis no cabeçal de controle, equipamentos de filtragem de água e conjunto de irrigação, permite determinar a altura manométrica total (H_{man}), que representa a pressão que a bomba deverá transmitir ao líquido, e o valor da potência requerida ao conjunto motobomba, Equação 3 (BERNARDO, 2006);

$$P = \frac{Q.H_{man}}{75.\eta} \quad (3)$$

Sendo:

P : potência necessária ao sistema (cv);

Q : vazão bombeada ($L^3.T^{-1}$);

H_{man} : altura manométrica total (L);

η : eficiência do conjunto motobomba (decimal).

OLIVEIRA (2005) afirma que ao dimensionar hidraulicamente o sistema de irrigação, é necessário determinar de forma precisa o valor da perda de carga de cada componente presente no cabeçal de controle, inclusive os filtros ali instalados. Nesse aspecto, o autor enfatiza a importância do conhecimento de duas informações: a perda de carga provocada pela instalação do filtro e também pela passagem do fluxo de água através do elemento filtrante no processo de filtragem.

Além da necessidade de se conhecer a perda de carga inicial causada pelo equipamento em condições de filtro limpo, é essencial para a sua operação a determinação da variação da perda de carga ao longo de sua operação quando as impurezas vão sendo retidas pelo leito filtrante determinando um acréscimo da perda de carga devido ao processo de filtragem. O incremento da perda de carga devido a sua contaminação deve ter um valor limite a partir do qual deverá ser providenciada a limpeza (retrolavagem) do leito filtrante, para se evitar uma mudança significativa na vazão do sistema e não permitir a passagem de impurezas.

3.7.1.1 Perda de carga da estrutura hidráulica do filtro

TESTEZLAF (2008) afirma que diferença de pressão que é causada pela passagem da água de irrigação pelo interior do filtro é resultante de dois fatores distintos, a resistência oferecida pelas partículas do meio filtrante ao movimento da água e as perdas de atrito determinadas pela estrutura hidráulica do equipamento.

OLIVEIRA et al. (2007) classificam filtros de tela e de discos, como peças especiais para o cálculo de perda de carga localizada, por apresentarem características estruturais próprias e causar fenômenos distintos durante passagem do líquido no seu interior, dificultando o uso das equações gerais na determinação dessa variável. Por apresentar semelhanças aos fenômenos citados, os filtros de areia também se enquadram nesse grupo de equipamentos especiais. Segundo PIZARRO CABELLO (1996) o processo de perda de carga localizada em conexões e peças especiais é complexo por envolver distintas variáveis como, a geometria e o processo de fabricação do equipamento, o regime de escoamento e a presença de correntes secundárias, entre outras. PUIG-BARGUES et al. (2005) concordam que em sistemas de irrigação pressurizada, o fluxo através dos módulos de filtração é muito complexo por causa das características estruturais do filtro, limitando a vazão e também das propriedades da água circulante.

No caso de filtros de areia, dois componentes estruturais são os principais responsáveis pelas perdas de carga existentes: placa difusora de entrada de água e os drenos de saída da água. A placa difusora quando mal dimensionada ou quando há inadequações do projeto estrutural, pode direcionar as linhas de fluxo do fluido às paredes do filtro, provocando a intensificação da turbulência do afluente sobre a superfície filtrante, movimentando as partículas de areia dessas regiões para o centro do leito, criando canais e elevações na camada filtrante. Esses canais diminuem a área efetiva e a altura do leito filtrante, intensificando o acúmulo de impurezas nessas regiões, acelerando o processo de perda da carga hidráulica ao processo de filtração, conseqüentemente, aumentando a frequência de retrolavagem.

Na tentativa de se determinar matematicamente os valores de perda de carga de filtros e outros componentes, para o melhor entendimento deste fenômeno, diversas equações têm sido desenvolvidas, com maiores ou menores restrições de seu uso por parte dos profissionais da área. Uma das formas utilizadas da estimativa da perda de carga de acessórios é a utilização do conceito de comprimento equivalente de tubulação ou pela determinação do coeficiente de resistência da perda de carga localizada. Dentro desse conceito, a perda de energia nesses equipamentos equivaleria a uma canalização retilínea, sem peças especiais, mas com maior comprimento, compensando as perdas provocadas pelos acessórios instalados.

TESTEZLAF & RAMOS (1995) identificaram o modelo alométrico linear como o melhor equacionamento para explicar o fenômeno físico de perda de carga em função da

vazão para filtros de tela e de discos para a condição de água limpa, afirmando que essa equação explica significativamente a variabilidade apresentada por esses equipamentos. PUIG-BARGUÉS et al. (2005) desenvolveram equações de perda de carga para filtros de disco, tela e areia utilizando a metodologia de análise dimensional, e encontraram um ajuste satisfatório entre as equações e os dados experimentais. Afirmaram ainda que em muitos problemas de engenharia hidráulica, com exceção de problemas de fluxo laminar e hidrostática, as ferramentas analíticas disponíveis não são capazes de encontrar soluções bastante precisas.

3.7.1.2 Perda de carga do meio poroso

A presença do material filtrante no interior do filtro faz com que a determinação da perda de carga em função da vazão se torne em um processo mais complexo, pois as suas características físicas afetam diretamente esse processo. Dessa forma, é preciso caracterizar a sua granulometria e porosidade, sendo essa última variável dependente do grau de compactação que ocorre dentro do equipamento. A maioria dos equacionamentos propostos para filtros de areia foi desenvolvido para condições experimentais de filtros lentos ou sob a ação da gravidade, devido à importância de sua aplicação em sistemas de abastecimento urbano de água potável.

Para uma melhor compreensão do fenômeno físico encontrado no processo de filtração em filtros de areia sob pressão, é necessário fazer um histórico dos princípios estudados sobre o escoamento em meio poroso. Segundo TRUSSEL & CHANG (1999), existem duas linhas de desenvolvimento que são seguidas: a primeira interessada em caracterizar o escoamento do fluido (óleos, gases e água) no ambiente subterrâneo, desenvolvendo uma teoria mais robusta levando em consideração os gradientes de pressão, vazão e profundidade, mas, poucas informações específicas referentes ao meio; a segunda desenvolvida por engenheiros civis e químicos interessados em predeterminar a perda de carga em camadas porosas de equipamentos, neste caso consideraram o projeto específico do equipamento e as características do material filtrante. Nessa análise da evolução histórica propõe-se uma apresentação do desenvolvimento teórico do escoamento em camadas porosas, buscando a compreensão dos modelos de estimativa de perda de carga em leitos filtrantes limpos de filtros de água.

Em estudos experimentais realizados em 1841, Jean-Louis-Marie Poiseuille verificou que o escoamento em tubos capilares era diretamente proporcional a ação da taxa de filtração e inversamente ao seu comprimento, enquanto Henry Darcy em 1956, observando o escoamento dentro do leito de areia, notou que este fenômeno é diretamente proporcional a carga hidráulica na camada de areia e inversamente a profundidade desta camada, propondo um modelo matemático para explicar este comportamento (TRUSSEL & CHANG, 1999).

$$\frac{Q}{A} = K \left(\frac{\Delta H}{\Delta L} \right) \quad (4)$$

Sendo:

Q: vazão no leito filtrante ($L^3.T^{-1}$);

K: coeficiente dependente da natureza da areia (material) ($L.T^{-1}$);

A: área da superfície da camada (L^2);

ΔH : perda de carga do meio filtrante (L);

Nesse caso a perda de carga pode ser definida como:

$$\Delta H = H + \Delta L - H_0 \quad (5)$$

ΔL : espessura da camada filtrante (L);

H: altura da água (afluente) acima da superfície do leito (L);

H_0 : altura da água (efluente) acima do fundo do leito (L).

A relação proposta por DARCY, que aborda o fluxo de fluidos dentro de meios porosos, é válida para baixos valores de velocidade de filtração, ou baixos valores do número de Reynolds, ou seja, para regimes laminares. Estudos posteriores demonstraram que a perda de carga real era muitas vezes maior do que os valores derivados da relação de Darcy, particularmente quando as velocidades de fluxo eram altas e o meio filtrante era constituído de grãos grosseiros. Após observar este comportamento, FORCHHEIMER (1901) propôs um segundo termo, não-linear, para corrigir o fluxo no interior da camada porosa (Equação 6), sendo que TRUSSEL & CHANG (1999) informam que este modelo é o que melhor caracteriza o fluxo em meios porosos.

$$\frac{\Delta H}{\Delta L} = \alpha_F V + \beta_F V^2 \quad (6)$$

Sendo:

V: velocidade superficial ($L.T^{-1}$);

α_F : coeficiente de permeabilidade relativo à perda de carga linear;

β_F : coeficiente de permeabilidade relativo à perda de carga não-linear.

O desenvolvimento de um modelo mais específico para determinação da perda de carga em meios porosos seguiu por duas linhas distintas de pesquisa; (1) caracterização do escoamento em meio poroso, e (2) utilizando a teoria do raio hidráulico, partindo para modelagem mais específica do coeficiente de Darcy (K). Dessa forma, NUTTING (1930), citado por TRUSSEL & CHANG (1999), desenvolveu um parâmetro específico e independente do fluido e da camada, denominada de permeabilidade específica, e definida como:

$$k = K \left(\frac{\mu}{\rho} \right) \quad (7)$$

Sendo:

k: permeabilidade específica de Nutting;

μ : viscosidade do fluido ($M.T^{-1}.L^{-2}$);

ρ : densidade do fluido ($M.L^{-3}$).

No entanto, profissionais de áreas que necessitam de conhecimentos mais detalhados, concordam que modelos para determinar a perda de carga devem também focar relações entre permeabilidade e as características da camada, particularmente, tamanho e esfericidade do material poroso e porosidade fixa da camada. Assim KOZENY (1927ab), citado por TRUSSEL & CHANG (1999), desenvolveu um modelo que é mais aceito para a permeabilidade em meios porosos, nas condições aplicáveis à lei de Darcy, combinando, a teoria do raio hidráulico (SCHEIDEGGER, 1923) com ajuste de velocidade (DUPUIT, 1863) e conceitos de superfície específica de BLAKE (1923). Usando essas premissas, FAIR & HATCH (1933) desenvolveram uma equação equivalente que foi revisada por CARMAN (1937), que avaliou seu modelo em dados experimentais, e propôs, para casos especiais, usando formas esféricas uniformes, a seguinte equação:

$$\frac{1}{K_{esfera}} = 180 \left(\frac{\mu}{\rho g} \right) \left(\frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^2} \right) \left(\frac{1}{d_{esfera}} \right)^2 \quad (8)$$

TRUSSEL & CHANG (1999) afirmam que a teoria do raio hidráulico utilizado nesses modelos é uma ferramenta eficaz para combinar as características da camada e do fluido para o coeficiente de Darcy. ERGUN (1952), combinando modelos empíricos para perda de carga linear e não linear, empregando o raio hidráulico aproximado e substituindo a superfície específica, $S_{\text{específica}}$, sugerida por ERGUN & ORNING (1949), pelo diâmetro de uma esfera, d_{esfera} , produziu o seguinte resultado:

$$\frac{\Delta H}{\Delta L} = a_E \left(\frac{\mu}{\rho g} \right) \left(\frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^2} \right) \left(\frac{1}{d_{\text{esfera}}^2} \right) V + b_E \left(\frac{1}{g} \right) \left(\frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \right) \left(\frac{1}{d_{\text{esfera}}} \right) V^2 \quad (9)$$

Contudo, TRUSSEL & CHANG (1999) afirmam que o uso dessa equação é indicado para camadas compostas de partículas esféricas, sendo, necessário para leitos formados por grãos não esféricos (forma irregular) a determinação da superfície específica das partículas empregadas no leito, recomendando o uso da seguinte expressão:

$$S_v = \frac{S_{\text{partícula}}}{V_{\text{partícula}}} = \frac{\pi d_{\text{esfera}}^2}{\frac{\pi}{6} d_{\text{esfera}}^2} = \frac{6}{d_{\text{esfera}}} \quad (10)$$

NIVEN (2002) reafirma que a perda de pressão durante um fluxo unidimensional através de um meio poroso (leito fixo) de material granular é dada pela soma de dois termos: um termo de perdas de energia viscosa, proporcional à velocidade do fluido, e outro de perda de inércia (termo de energia cinética), proporcional à velocidade ao quadrado. A necessidade da inclusão do termo não linear na equação de perda de carga em meios porosos foi comprovada experimentalmente por CHANG et al. (1999) ao desenvolver um estudo laboratorial de determinar a perda de carga em filtros de areia limpo, indicando que para as três granulometrias ensaiadas, 0,47; 1,08 e 1,5mm o comportamento não linear estava presente. Esses autores afirmam que para valores maiores de granulometria e vazão, esse comportamento ficou mais evidente.

Entretanto, existem discordâncias na literatura em relação à causa desse comportamento. Alguns autores (ERGUN & ORNING, 1949; ERGUN, 1952; WARD, 1964) argumentam que a não linearidade é devido ao importante aumento da turbulência no escoamento na camada. Observou-se que os desvios na aplicação da relação de Darcy começam a ocorrer para números de Reynolds tão baixos quanto o intervalo de 1 a 10

(FORCHHEIMER, 1901; HUBBERT, 1956; SCHEIDEGGER, 1960; BEAR, 1972), e experimentos demonstraram que o comportamento não linear aparece ainda quando as condições de fluxo laminar são cumpridas. Estudos relatam o aparecimento da turbulência em meio poroso para diferentes números de Reynolds, dependendo das características do material filtrante que compõe a camada porosa, como; tamanho e forma (esfericidade) dos grãos e nível de compactação do leito (TRUSSEL & CHANG, 1999). Dessa forma, fica evidente o estudo da importância do termo não linear na determinação da perda de carga e no entendimento do escoamento de fluidos em meios porosos.

TRUSSEL & CHANG (1999) citam a existência de quatro regimes de escoamento nas camadas porosas, identificando os limites referentes ao número de Reynolds e especificando o equacionamento adequado para cada regime (Tabela 9).

Tabela 9: Tipos de regimes de escoamento em meio poroso com as respectivas equações para determinar a perda de carga.

Regime de Darcy $R_e \leq 1$	Regime de Forchheimer $1 < R_e < 100$	Regime de transição $100 < R_e < 800$	Regime turbulento $800 < R_e$
$\frac{\Delta H}{\Delta L} = kV$	$\frac{\Delta H}{\Delta L} = \alpha_F V + \beta_F V^2$	–	$\frac{\Delta H}{\Delta L} = \alpha_T V + \beta_T V^2$

Fonte: TRUSSEL & CHANG (1999)

Para um melhor entendimento dos regimes e intervalos apresentados na Tabela 9, é importante citar, que NIVEN (2002) enfatiza que o número de Reynolds indica a relação de forças viscosas e inerciais, refletindo a tendência para a turbulência. Assim, o primeiro regime, chamado de regime de Darcy, é limitado para $R_e \leq 1$, sendo que o escoamento nessa região não é somente laminar, mas também fluxo progressivo, o que significa nesse intervalo o regime é fluxo laminar, mas, sem contribuição significativa da inércia. O segundo regime é chamado de regime de Forchheimer ou inercial, também denominado de fluxo constante, rigorosamente laminar com o regime de progressão, onde o efeito da inércia se torna cada vez mais importante. Esse regime está dentro do intervalo de $1 < R_e < 100$ se caracteriza no limite inferior por ter a perda de carga proporcional ao comportamento linear, com pequena tendência a não linearidade e no limite superior o inverso. É importante ressaltar que no regime de Forchheimer aparece a formação de vórtices entre os espaços dos grãos, mesmo com fluxo estacionário, isto é zonas de recirculação, que são delimitadas da área principal de fluxo, o que segundo SIDIROPOULOU et al. (2006) não determina nenhuma transferência

macroscópica de carga das partículas de fluido nessas áreas. O terceiro regime representa a transição de mais ou menos inercial para totalmente turbulento, apresentando para a maior parte desse regime a ação dominante da componente inercial e os vórtices são regularmente vistos. Esse regime não possui um limite superior bem definido, apresentando indicações que seja acima de 300 ou entre 600 e 800, dependendo da granulometria da areia e da vazão do sistema. O quarto e ultimo regime ocorre para valores elevados de Reynolds, sendo caracterizado como totalmente turbulento.

A partir das informações descritas, TRUSSEL & CHANG (1999) apresentaram um modelo de simulação para escoamento em meios porosos com ênfase em perdas de carga do elemento filtrante dos filtros de areia aplicando de água limpa, (Equação 5). Os autores aplicaram modelos empíricos existentes sobre a teoria hidrodinâmica no desenvolvimento de um modelo na forma da equação de FORCHHEIMER (1901), sendo que para o primeiro termo da equação utilizaram a relação de porosidade proposta por KOZENY (1927ab) e confirmada por diversos autores (CARMAN, 1937; FRANZINI, 1951; ERGUN 1952) e para o segundo termo recomendam a relação proposta por BURKE & PLUMMER (1928) e confirmada por ERGUN (1952), derivando modelo não linear para estimar o valor de perda de carga, a partir de características do meio filtrante, utilizando filtro piloto.

Os coeficientes de permeabilidade da Equação 6 associados às componentes linear e não linear da perda de carga (α_F e β_F), são representado pelas Equações 11 e 12, respectivamente.

$$\alpha_F = a \left(\frac{\mu}{\rho g} \right) \left(\frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \right) \left(\frac{1}{d} \right)^2 \quad (11)$$

$$\beta_F = b \left(\frac{1}{g} \right) \left(\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3} \right) \left(\frac{1}{d} \right) \quad (12)$$

Sendo:

d: diâmetro efetivo do grão (L)

TRUSSEL & CHANG (1999) demonstraram, a partir da aplicação de dados experimentais no modelo proposto, a importância da influência das variáveis, μ , ρ , ε e d , nos coeficientes α e β e, conseqüentemente, na perda de carga. Os autores consideram a variação da densidade e a viscosidade da água em função da temperatura, de forma que uma mudança

da temperatura de 5 °C para 25 °C pode reduzir a razão, μ/ρ , em 41%, conseqüentemente reduzindo do termo α em 41%. Mudanças na porosidade produzem alterações significativas em α e β , sendo que aumentos na porosidade de 38% para 60%, reduzirá α em 89% e 83% de β . CHANG et al. (1999) comprovaram, experimentalmente, a sensibilidade da perda de carga à variação da porosidade, sendo que a mudança em 13% da porosidade resultou no aumento de aproximadamente 80% da perda de carga. Ao analisar a variação dos coeficientes lineares e não lineares, α e β , respectivamente, percebeu-se que o tamanho efetivo dos grãos interfere significativamente na evolução da perda de carga, como por exemplo, ao se utilizar os limites do intervalo, 0,4 a 1,5mm, muito comum na filtragem de água, α será reduzido em 93% e β em 73%.

TESTEZLAF & MATSURA (2005) aplicaram do modelo proposto por TRUSSEL & CHANG (1999) nos dados experimentais da pesquisa desenvolvida por MATSURA et al. (1989), buscando validar o modelo na determinação da perda de carga correspondente à camada filtrante com diferentes alturas para filtros de areia e concluíram pela necessidade da ampliação do estudo para o desenvolvimento de um novo modelo de simulação para determinação da perda de carga que incluam o efeito dos elementos hidráulicos dos filtros de areia.

ERGUN (1952) sugere que as leis de fluxo de fluidos através de leitos granulares têm vários aspectos de conseqüência prática e que correlações empíricas são geralmente úteis para o fim específico para o qual elas são feitas, mas não pode lançar luz para uma finalidade diferente. Dessa forma, o aprofundamento do conhecimento e a validação do equacionamento teórico do fenômeno de perda de carga em filtros de areia trabalhando sob condições pressurizadas, aplicando-se a teoria de escoamento em meios porosos, permitirão a simulação do seu dimensionamento e a avaliação de seu desempenho quando empregado em diferentes condições de operações.

3.7.1.3 Perda de carga em função do tempo de filtragem (filtro sujo)

A perda de carga em filtros de areia com camadas filtrantes limpas depende da taxa de filtração, tamanho dos grãos, porosidade, esfericidade e viscosidade da água. Entretanto, com o progresso da filtração os sólidos suspensos na água de irrigação são depositados no interior dos espaços vazios do leito, diminuindo a porosidade do meio e causando uma

elevação na perda de carga. Segundo PIZARRO CABELO (1996) o valor de perda de carga pode variar de 10 a 20 kPa, para condição de água limpa, e quando em condições reais com água suja, pode atingir valores de 40 a 60 kPa, dependendo do modelo de filtro, tipo de areia selecionada e da velocidade média de filtração.

Segundo CLEASBY & LOGSDON (1999) a capacidade de calcular a perda de carga em uma cama filtrante limpa é importante no projeto do filtro, porque esta perda de pressão prevista deve ser utilizada no cálculo da perda de carga total do projeto. Adicionalmente, a perda de carga deve ser prevista no projeto de uma filtragem com o aumento da perda de pressão decorrente da remoção de partículas do afluente. Esta é referida como a perda de carga em função do tempo de filtragem, sendo, geralmente baseada em experiências prévias para águas com padrões e processos de tratamento semelhantes ou em estudos pilotos. Para IVES (1966a, b, c), DI BERNARDO & DANTAS (2005), a evolução da perda de carga ao longo do tempo de funcionamento do filtro pode ser representada da seguinte forma;

$$H_t = H_0 + K_{pc} V_{\infty} C_0 t \quad (13)$$

Sendo:

H_t : perda de carga em um tempo qualquer (L);

H_0 : perda de carga inicial, (L);

K_{pc} : coeficiente ($L^3 M^{-1}$);

V_{∞} : velocidade de aproximação (LT^{-1});

T : tempo (T).

Para ADIN & ALON (1986), avaliando filtros de tela, afirma que o processo de retenção é baseado no princípio em que os diâmetros dos poros do meio físico sejam menores que o diâmetro das partículas suspensas na água. Dessa forma, esses autores sugerem uma expressão matemática exponencial para o crescimento exponencial de perda de carga em função do volume filtrado para filtros de tela, representando o comportamento hidráulico dos filtros de tela de forma significativa, baseada na lei de Boucher, assumindo a Equação 14.

$$H = H_0 e^{IV} \quad (14)$$

Sendo:

$H = H_t$: perda de carga em um tempo qualquer (L);

I : índice de filtrabilidade, relacionado à concentração de material suspenso na água;

V : volume de efluente (L^3).

As relações apresentadas, demonstram que o conhecimento de forma precisa da perda de carga para os filtros, sob a condição limpa, é essencial para o entendimento do processo de filtração e mostram que a perda de pressão ao longo da operação do equipamento está diretamente ligada ao comportamento hidráulico da estrutura dos filtros, como também de seus materiais filtrantes (tela, disco, areia, antracito, manta sintética não tecida, carvão ativado, etc).

3.7.2 Eficiência de remoção

A eficiência remoção ou de filtração é a capacidade do leito filtrante em retirar os sólidos suspensos presentes na água de irrigação evitando a sua entrada no sistema. Essa característica do filtro é determinada pela escolha da granulometria da areia, pela espessura da camada filtrante, bem como pela vazão e pressão que a água exerce sobre a superfície filtrante.

HAMAN et al. (1994) afirma que a eficiência de filtração em filtros de areia é medida pela sua capacidade de remover partículas de um determinado tamanho e seu valor aumenta com a redução da granulometria do meio filtrante. A capacidade de remoção de partículas aumenta com a diminuição da granulometria da areia, embora, quanto menor os grãos de areia, maior será a quantidade de impurezas retidas e maior será a frequência de limpeza necessária. Outra possibilidade para se aumentar as retenções de sólidos é aumentar a área do meio filtrante, com aumento da altura da camada de areia e redução da taxa de filtração. A eficiência de remoção é inversamente proporcional à vazão do sistema, ou seja, quanto maior a vazão, menor será a retenção do meio filtrante.

A eficiência de remoção de impurezas dos equipamentos de filtração está diretamente relacionada à qualidade da água utilizada na irrigação. A determinação da eficiência de filtração e a capacidade do filtro em reter e/ou remover impurezas do afluente pode ser realizada avaliando-se as concentrações de sólido suspensos totais da água, na entrada e na saída dos filtros, (Equação 15).

$$E_R = \frac{S_1 - S_2}{S_1} * 100 \quad (15)$$

Sendo:

E_R = eficiência de remoção (%);

S_1 = Concentração de sólidos suspensos totais na entrada do filtro ou afluente ($M.L^{-1}$)

S_2 = Concentração de sólidos suspensos totais na saída do filtro ou efluente ($M.L^{-1}$)

ZEIER & HILLS (1987), consideram que a avaliação, em campo, da eficiência de um sistema de irrigação localizada quanto à qualidade da água devem incluir além da determinação da eficiência de remoção, também a diferença de pressão antes e depois do filtro. ADIN & ELIMELECH (1989) constataram eficiências de 40% a 85% para filtros de areia com uso de água residuária, quando comparado com a retirada de somente 1% a 2% do total de sólidos suspensos e entupimento muito rápido de filtros de tela.

3.8 Vazão de filtração nos filtros de areia

Nos filtros granulares, a principal variável de projeto é a taxa de filtração (vazão/área de filtração), ou vazão volumétrica por unidade de área. À medida que a taxa de filtração aumenta a perda de carga também aumenta, e a eficiência de remoção de partículas é alterada. A filtração granular é um processo cíclico, pois periodicamente a perda de carga se torna excessiva ou as partículas passam a ser arrastadas pelo filtrado. A importância da definição do valor da vazão que passará pelo do meio poroso é justificada por KELLER & BLIESNER (1990), que afirmam que, para uma dada qualidade de água e tipo de meio poroso, o tamanho das partículas que passam pelo filtro sem serem retidas, aumentam com o incremento da vazão.

Como a vazão de projeto é definida em função da área de filtração é necessário diferenciar os conceitos existentes para esse parâmetro. Primeiramente, tem-se a área efetiva de filtração que é definida como sendo a área transversal do filtro disponível para a filtração, ou seja, a área total do meio poroso exposta ao fluxo. Não estão incluídas nessa área as estruturas ou barreiras sólidas que impedem o fluxo e separação das partículas. Outra definição relaciona a área com a porosidade do elemento filtrante, e é conhecida como área aberta para filtração, ou seja, a área dos poros ou a soma de todas as aberturas no meio filtrante para a passagem da água. Esse parâmetro é expresso, geralmente como uma porcentagem da área efetiva de filtração, TESTEZLAF (2007).

Alguns autores definiram padrões recomendados para taxa de filtração de filtros de areia na tentativa de melhorar a aplicação e operação desses sistemas de filtragem (Tabela 10).

Tabela 10: Valores de taxa de filtração recomendadas por diferentes autores.

Autores	Taxa de filtração (T_f) ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$)
VERMEREIN & JOBLING (1984)	$T_f \leq 108$
ASAE (1993)	$36 \leq T_f \leq 64,8$
PIZARRO CABELO (1996)	$\bar{T}_f = 60$
BENHAM & ROSS (2002)	$T_f \leq 61,2$
PHILLIPS (1995)	$36 \leq T_f \leq 61,2$

Para PHILLIPS (1995) valores de taxa de filtragem abaixo ou acima dos intervalos por ele recomendados afetam negativamente o desempenho dos filtros. Para valores abaixo de $36 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ existe a possibilidade do surgimento de canais preferenciais, que irão reduzir a perda de carga e diminuir a eficiência do sistema automático de retrolavagem, e para valores superiores a $61,2 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$, poderá ser observado turbulência excessiva dentro do filtro e uma movimentação da camada filtrante. Para VERMEREIN & JOBLING (1984) quanto menor a taxa de filtragem melhor será o processo de filtração.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Levantamento de fabricantes brasileiros de filtros e de modelos de equipamentos importados comercializados no Brasil

A falta de informações técnicas sobre projetos estruturais de filtros de areia disponíveis no mercado nacional para aplicação em irrigação localizada e o desconhecimento das características dos modelos comercializados no país, limitam as especificações do seu uso, como também, dificultam a escolha correta pelos produtores, e impossibilitam a identificação de pontos que necessitam aprimoramento técnico-científico dos equipamentos. Dessa forma, objetivou-se identificar os filtros de areia disponíveis aos produtores rurais brasileiros, bem como caracterizar os detalhes de projeto dos equipamentos nacionais e/ou importados presentes no mercado.

A partir de informações da Associação Brasileira da Indústria de Máquinas e Equipamentos (ABIMAQ/SINDIMAQ), de distribuidores de equipamentos de irrigação, e pesquisa realizada pela Internet, realizou-se o levantamento dos principais fabricantes nacionais de filtros de areia e os equipamentos importados que são comercializados no Brasil, diferenciando-os estruturalmente e caracterizando os seus intervalos de operação e os seus componentes hidráulicos internos.

Os resultados dessa etapa auxiliaram para o estabelecimento de contatos com os principais fabricantes nacionais de filtros de areia, visando realizações de visitas técnicas e parcerias tecnológicas para o desenvolvimento de equipamentos.

4.2 Caracterização da operação de filtros de areia nas propriedades rurais

A validação da hipótese da pesquisa, além de exigir a obtenção de informações sobre os modelos e projeto de filtros disponíveis aos produtores rurais, também estabeleceu a necessidade de se analisar o nível de operacionalidade desses equipamentos em campo, identificando os principais problemas e possíveis falhas de funcionamento e/ou critérios adotados.

MESQUITA et al. (2009) ao visitarem três propriedades rurais para avaliação do uso dos filtros de areia, detectaram a necessidade de se propor uma metodologia que fornecesse informações ou indicadores que auxiliassem no entendimento de como o agricultor operava o seu equipamento e também na quantificação do seu desempenho. A partir dessa necessidade

foi desenvolvida uma metodologia de avaliação baseada em um questionário aplicado durante a visita às propriedades (ANEXO I). Esse documento aborda principalmente os critérios utilizados para a implantação do filtro de areia na propriedade, a origem e a análise da água para irrigação, características gerais do filtro de areia (modelo, marca entre outros), o estado de conservação, operação e manejo da filtragem e retrolavagem, e assistência técnica disponibilizada ao produtor pelas empresas. Na elaboração das questões presentes no questionário, buscou-se uma formulação simples e clara de perguntas, para o fácil entendimento dos entrevistados, além de evitar possíveis questões que pudessem deixar os produtores constrangidos.

Procedeu-se três visitas técnicas nas propriedades, Estância Santa Maria (Pirassununga – SP), Ponte Baixa (Conchal – SP) e Ven Flor Esmeralda (Mogi Mirim-SP), avaliando-se o conjunto de filtragem e aplicando o questionário proposto. Para a caracterização da operação dos filtros de areia em condições de campo, foram realizadas quatro avaliações dos sistemas de filtragem de areia pressurizados, sendo que em uma das propriedades procedeu-se a avaliação em dois conjuntos distintos de filtragem, por possuírem características de funcionamento diferentes. Cada visita realizada foi acompanhada pelo responsável técnico da operação do sistema que respondeu as questões do questionário e prestou outras informações importantes para a avaliação do sistema.

Os procedimentos realizados em cada avaliação constituíam-se basicamente de:

- Caracterizar visualmente as condições da estrutura física interna e externa dos filtros de areia;
- Avaliar visualmente o estado de limpeza da superfície da camada filtrante antes e após a retrolavagem, apontando a presença de material orgânico e/ou de canais preferenciais;
- Estimar taxa de filtragem utilizada nos eventos de irrigação pela determinação in loco da vazão de filtragem, mediante o uso de medidor Ultra-sônico UFM170;
- Estimar o diferencial de pressão nos filtros antes e depois da retrolavagem, pela leitura de manômetros instalados no sistema;
- Avaliar a eficiência de remoção dos filtros antes e depois da retrolavagem, pela coleta de amostras de água antes e após o filtro;

- Caracterizar a operação do filtro executado pelo produtor, identificando a forma de acionamento do equipamento, bem como o momento da execução e o tempo de retrolavagem;

As informações obtidas nas visitas foram, então, tabuladas de forma a fornecer um perfil de utilização do equipamento e também permitir uma análise do procedimento de avaliação de campo do desempenho dos filtros de areia.

Para a avaliação do sistema de filtragem em campo, os produtores foram orientados a realizar normalmente a irrigação com a filtração no dia anterior a visita, sem a realização da retrolavagem do equipamento, mantendo assim as características mais próximas possíveis da condição real do leito filtrante. Foi solicitado também, que durante a realização das avaliações os procedimentos diários fossem desenvolvidos pelo operador do equipamento, permitindo assim, que a operação convencional do filtro também fosse avaliada na visita.

4.3 Caracterização hidráulica de filtros de areia em condições laboratoriais.

A busca por informações técnico-científicas que aprofundem os conhecimentos sobre a influência da granulometria da areia, da altura do leito filtrante e dos tipos de elementos hidráulicos internos dos filtros (difusores de água e drenos) no desempenho do processo de filtragem, podem contribuir significativamente no desenvolvimento de procedimentos metodológicos de projeto de engenharia e na operação correta desses dispositivos. Adicionalmente, a descrição e interpretação do comportamento experimental de filtros de areia para diferentes parâmetros operacionais, podem colaborar na discussão do processo tradicional de filtragem da água para a irrigação localizada. Com o objetivo de obter essas informações, três modelos de filtros de areia foram submetidos a ensaios laboratoriais de caracterização hidráulica.

Os ensaios laboratoriais de caracterização hidráulica dos filtros de areia foram realizados nos Laboratórios de Solos e de Hidráulica e Irrigação da Faculdade de Engenharia Agrícola (FEAGRI), na Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), no período de 05/2009 a 09/2009. Os ensaios foram subdivididos em duas caracterizações específicas: determinação dos parâmetros físicos das areias utilizadas como elemento filtrante nos ensaios e avaliações hidráulicas de três modelos de filtros de areia proveniente de fabricantes

nacionais e disponíveis no mercado brasileiro, diferenciados por seus componentes estruturais internos (difusor e drenos) distintos.

4.3.1 Caracterização do material filtrante

A falta de padronização dos materiais utilizados na camada filtrante de filtros de areia utilizados na irrigação e o importante papel que esse elemento representa no processo de filtração, determinou a necessidade de conhecer as propriedades físicas das areias utilizadas nos ensaios. Dessa forma, avaliou-se os métodos de determinação de cada parâmetro requerido o que possibilitou o estudo de uma possível norma de comercialização de areia para filtros porosos.

As amostras de areia, utilizadas nos experimentos, foram caracterizadas fisicamente, avaliando-se a sua distribuição granulométrica e os parâmetros físicos: diâmetro efetivo da partícula, coeficiente de uniformidade, porosidade, esfericidade, massa específica e diâmetro equivalente, buscando definir padrões de classificação e comercialização de areia para sistemas de filtração na irrigação localizada.

Para utilização nos ensaios dos filtros, foram caracterizados três tipos de areia, fornecidos pela indústria Teo Tokus Indústria e Comercio Ltda., diferenciadas pelos intervalos granulométricos de 0,5 a 1,0; 0,8 a 1,2 e 1,0 a 1,5mm, designados nesse estudo como G1, G2 e G3, respectivamente. Para a realização dos experimentos foram adquiridos 300 kg de areia pertencentes a cada intervalo granulométrico, divididos em sacos de 25 kg. Para a caracterização física dessas areias, retirou-se de cada saco uma massa aproximada 500g, totalizando uma amostra composta e homogeneizada de 6 kg.

4.3.1.1 Determinação da distribuição granulométrica

Para a determinação das curvas granulométricas de cada material selecionado seguiram-se os procedimentos da norma ABNT EB-2097 (1990), que recomenda:

- Secar uma quantidade de areia (nesse caso, 1 kg) em uma estufa a $105 \pm 3^{\circ}\text{C}$ durante 3 horas, retirando uma quantidade mínima de 100 g para o ensaio.
- Montar a sequência de peneiras no equipamento de agitação na ordem decrescente de malha, seguindo a ordem de abertura das peneiras (Tabela 3), de acordo com os limites granulométricos do material ensaiado.

- Após a agitação mecânica da amostra, determinar às massas retidas em cada peneira e calculando as porcentagens retidas, as retidas acumuladas e as porcentagens que passaram por cada peneira.
- Construir a curva granulométrica da amostra de areia analisada utilizando os pontos correspondentes aos valores da porcentagem que passa e a abertura da peneira (tamanho da malha) correspondente em mm.

Para a obtenção da curva granulométrica das amostras G1 e G2, foram utilizadas peneiras com as seguintes aberturas: 1,40; 1,19; 1,00; 0,85; 0,71; 0,60; 0,50; 0,42mm, e para a amostra G3, de maior granulometria, acrescentou-se as peneiras de abertura 2,36; 2,00; 1,70 retirando-se as de abertura 0,50 e 0,42mm. Esse procedimento foi necessário pela restrição do agitador que não comportava mais que oito conjuntos de peneiras e pela granulometria mais grosseira dessa amostra.

O procedimento para essa determinação foi repetidos três vezes, determinando os valores médios retidos e que passavam em cada peneira, que foram utilizados posteriormente na construção da curva característica para cada granulometria. A partir das curvas granulométricas obtidas em planilhas eletrônicas, estimaram-se graficamente os valores diâmetro efetivo dos grãos (D_{10}) e do diâmetro da abertura da peneira que permitiu a passagem de 60% do material poroso (D_{60}). A partir desses valores calculou-se o coeficiente de uniformidade (CU) de cada amostra, utilizando a relação apresentada na Equação 1.

4.3.1.2 Diâmetro equivalente

O método usado para determinação do diâmetro equivalente (D_{eq}) foi proposto por CLEASBY & FAN et al (1981) que recomenda que amostras representativas do material de cada faixa granulométrica de areia sejam colocadas em cápsulas de porcelana e secadas em estufa à temperatura de 105 °C, durante 3 horas e em seguida pesadas. De cada amostra, foi retirado um número de grãos que deve ser maior que 200 para amostras com grãos menores que 1,0 mm e maior que 150 para amostras com grãos maiores que esse diâmetro. Com o número e a massa dos grãos de cada amostra e, conhecendo-se a sua massa específica, determina-se o diâmetro equivalente das amostras de areias utilizando a Equação 16.

$$D_{eq} = \left[\frac{6}{\pi} * \frac{\bar{m}}{\rho_s} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (16)$$

Sendo:

D_{eq} : Diâmetro equivalente (L);

\overline{m} : massa média dos grãos (M);

ρ_s : Massa específica do material ($M L^{-3}$).

4.3.1.3 Porosidade

A porosidade das amostras foi determinada de acordo com o procedimento definido pela AWWA (1999). Essa norma afirma que a porosidade (volume de vazios) pode ser determinada colocando-se certa massa do material filtrante, com massa específica conhecida, em uma coluna transparente com diâmetro interno conhecido. A altura da camada de grãos na coluna é usada para determinar o volume de grãos que é estimado pela razão da massa total de grãos da camada pela massa específica do material. O volume de vazios/porosidade (ε) é então determinado pela subtração do volume de grãos do volume total da camada.

Foi utilizada nessa determinação uma proveta graduada de plástico com volume total de 1000cm^3 , da qual se fez uso apenas de 200cm^3 da parte central, com o objetivo de garantir um volume mais real ocupado pelos grãos. Nesse procedimento, teve-se a preocupação de garantir a mesma altura de queda dos grãos de areia, permitindo a mesma compactação para todas as amostras, e também o mesmo ponto de distribuição, fazendo-se uso de um funil na parte superior da proveta. Procedeu-se cinco repetições nessa determinação, utilizando areia seca a 105°C durante 3 horas em estufa e determinando as variáveis a partir das Equações 17 e 18.

$$V_g = \frac{M_g}{\rho_s} \quad (17)$$

$$\varepsilon = V_t - V_g \quad (18)$$

Sendo:

V_g : volume de grãos (L^3);

M_g : massa total de grãos (M);

ρ_s : massa específica do material granular ($M L^{-3}$);

ε : porosidade (volume de vazios) (adimensional);

V_t : volume total ocupado pelo material (L^3).

4.3.1.4 Esfericidade

A esfericidade é definida como sendo a relação entre a área superficial de uma esfera com mesmo volume e área superficial do grão considerado. Nesse trabalho, determinou-se esse parâmetro utilizando o método de comparação visual descrito por DI BERNADO & DANTAS (2005).

Nessa determinação, foram utilizados 150g do material seco a 105 °C durante 3 horas em estufa. Dessa massa retirou-se aleatoriamente 12 amostras contendo 23, 18 e 16 grãos de areia para as amostras G1, G2 e G3, respectivamente, que foram colocadas em papel milimetrado e, em seguida, com o apoio de um microscópio foram fotografados, procedendo-se a classificação visual (Figura 13).

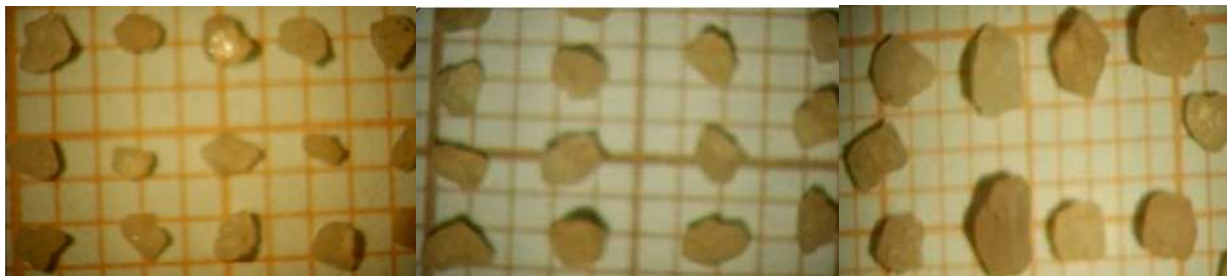


Figura 13: Imagens ampliadas de amostras com diferentes granulometrias utilizadas na determinação da esfericidade da areia.

4.3.1.5 Massa Específica

Foram retiradas três amostras de cada granulometria de areia e procedeu-se a determinação dos valores de massa específica, utilizando-se o método do balão volumétrico, atendendo a Norma ASTM C128-07a (2007), que apresenta as seguintes etapas:

- Pesar 20g de areia seca em estufa a (105 ± 3) °C durante 3 horas;
- Colocar a amostra, com a ajuda de um funil, em um balão volumétrico de 50mL;
- Adicionar, com auxílio de uma bureta de 50mL, cerca de 25mL de álcool etílico, suficiente para cobrir a amostra;
- Agitar a amostra para uma melhor penetração do álcool na amostra, preenchendo o espaço poroso e expulsando o ar;
- Deixar em repouso durante 15 minutos, agitando novamente e colocando em repouso novamente;
- Após 24h, completar o espaço restante do balão volumétrico com álcool etílico;

- Ler e anotar o volume completado de álcool;
- Utilizando a Equação 19, determinar a massa específica ou densidade das partículas.

$$\rho_s = \frac{m_g}{V_b - V_a} \quad (19)$$

Sendo:

ρ_s = Massa específica (M L⁻³);

m_g = Massa de grãos (M);

V_b = Volume do balão volumétrico (L³);

V_a = Volume de álcool etílico utilizado (L³);

4.3.2 Caracterização hidráulica dos filtros de areia

A presença de filtros de areia e a sua dinâmica de operação afetam o desempenho hidráulico do sistema de irrigação, consequência da obstrução contínua dos poros da camada filtrante pelas impurezas presentes na água. Essa contaminação determina a elevação da perda de pressão do equipamento e a redução de vazão disponível ao sistema, influenciando, assim, a pressão de trabalho e a vazão dos emissores. Dessa forma, para a aplicação e operação adequadas do equipamento para se atingir os objetivos do processo de filtração, é necessário determinar as características de perda de carga do equipamento, a vazão volumétrica por unidade de área (taxa de filtração) e a velocidade de escoamento nos poros, em relação ao modelo de filtro utilizado.

Nos ensaios de caracterização hidráulica utilizaram-se três filtros de areia de fabricados no Brasil com os componentes internos de difusores de entrada e drenos diferenciados. Esses equipamentos foram doados pelas empresas, sendo elas: Amanco do Brasil Ltda., Hidro Solo - Indústria e Comércio Ltda. e Marbella do Brasil Ltda., definidas nesse trabalho como filtro 1, filtro 2 e filtro 3, respectivamente, e caracterizados na Tabela 11.

Os filtros foram instalados em um módulo experimental acoplado ao circuito fechado de tubulações presente na estrutura do laboratório, constituído de um reservatório para água com capacidade de 27.000 L, conectado por tubos de DN 100 PN 125 a um sistema de motobomba composto por uma bomba centrífuga (KSB MEGANORM BLOC, Ø rotor 332 mm) acoplada a um motor de 25 CV a 1760 rpm, trifásico e 60 Hz.

Tabela 11: Dimensões e características estruturais dos filtros avaliados.

Filtro	Características Estruturais							
	Modelo	Ø Corpo (cm)	Sistema de drenos	Tipo de difusor	nº Crepina	H ¹	P _m ²	Q ³
1	15165	75	Braço coletor	Plano c/ borda	22	50	7	50
2	FA07	40	Crepina cilíndricas	Plano	4	60	7	21
3	520	50	Crepina cônicas	Plano c/duplo difusor	10	50	10	18

Fonte: Catálogos dos fabricantes.

Legenda: H¹ (altura do corpo dos filtros em cm), P_m² (pressão máxima de serviço em kgf. cm⁻²) e Q³ (Vazão recomendada pelo fabricante, m³.h⁻¹).

A água utilizada nos ensaios era proveniente do sistema de abastecimento urbano da cidade de Campinas, e armazenada no reservatório do laboratório, apresentando, durante os ensaios, uma concentração média de sólidos suspensos totais de 0,142 mg.L⁻¹. Essa concentração é considerada para irrigação localizada como de baixo risco ao entupimento dos emissores, segundo GILBERT & FORD (1986), atendendo ao propósito de realizar os ensaios com água limpa para que esta variável não interferisse nos resultados experimentais.

4.3.2.1 Módulo experimental

Para a obtenção dos dados de perda de carga dos filtros de areia, procedeu-se a montagem de um módulo hidráulico (Figura 14) atendendo às dimensões de tubulações recomendadas pelos fabricantes, exceto para o filtro 1, onde a tubulação utilizada não era a especificada. Esse módulo foi constituído de dois registros tipo agulha (1), um instalado na entrada do sistema para controlar e variar as vazões de ensaio e outro na saída do circuito hidráulico para manter o diferencial de pressão; um sensor magnético para monitorar a vazão do sistema (2) e dois pontos para tomada de pressão imediatamente antes e após o filtro de areia (3).

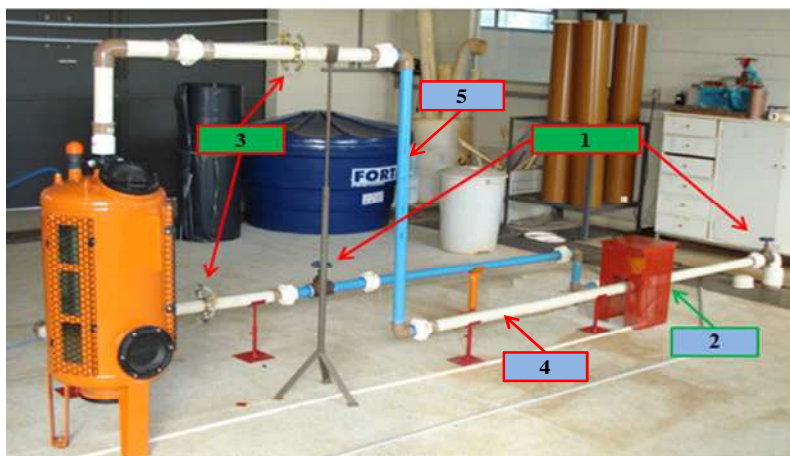


Figura 14: Módulo experimental e seus componentes.

A variação da pressão na entrada e na saída dos filtros foi monitorada por meio de transdutores diferenciais de pressão da marca MOTOROLA, modelo MPX 5700DP cuja faixa de funcionamento é de 0 a 700 kPa e sinal de saída entre 0,2 V e 4,7 V (Figura 15). Estes transdutores transformam medidas diferenciais de pressão em sinais elétricos de voltagem variável em função da magnitude do sinal de entrada, ou seja, da grandeza do diferencial de pressão. Para conexão dos transdutores à tubulação foram construídas tomadas de pressão do tipo integral (Figura 16) e instaladas, atendendo a norma ASABE (1994), que recomenda a posição de instalação, distante dez vezes o diâmetro interno da tubulação antes e depois de qualquer acessório. Esse tipo de tomada de pressão permite a estimativa da pressão a partir de quatro pontos ao longo do mesmo diâmetro da tubulação, aumentando a exatidão da leitura dessa variável.

Os sensores de pressão foram conectados às tomadas de pressão por intermédio de mangueiras transparentes, para facilitar à visualização da presença de bolhas de ar, e com válvulas que permitiam escorvê-las caso necessário. Como esses transdutores necessitavam de uma fonte de alimentação externa ao computador pessoal para evitar alterações do sinal e/ou ruídos, foi instalada uma fonte de alimentação que permitia a transferência exata de 5 V aos sensores. Adicionalmente, optou-se por segurança, instalar os sensores em uma caixa de controle, e acoplá-los ao conversor AC/DC ajustável entre 1,25V a 30V.

A vazão do sistema foi monitorada pelo sensor magnético Marca Seginet, modelo 2551, que tinha como saída um sinal analógico variando de 4-20 mA, que foi instalado na tubulação de entrada do filtro, seguindo os requisitos recomendados pelo fabricante e devidamente calibrado pelo método volumétrico.

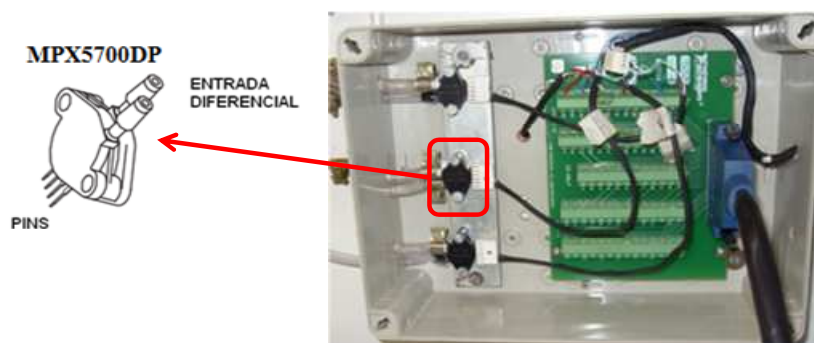


Figura 15: Detalhe da conexão do transdutor de pressão com o sistema de aquisição.

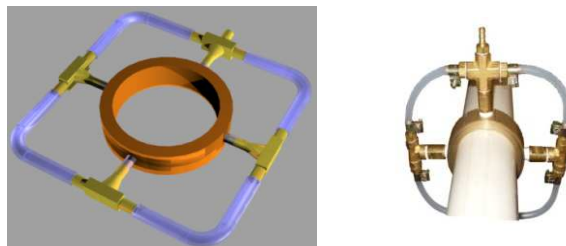


Figura 16: Detalhes da construção e instalação tomada de pressão integrada à tubulação.

4.3.2.2 Sistema de aquisição de dados

Segundo MONTEIRO (2005) o termo “sistema de aquisição de dados” refere-se ao conjunto de equipamentos (hardware) e de programas (software) projetado para amostrar e digitalizar sinais analógicos. As amostras das variáveis adquiridas devem ser processadas posteriormente da forma mais conveniente para a aplicação específica. Os dados de vazão e pressão provenientes do módulo de ensaio foram coletados por um sistema de aquisição de dados montados de acordo com sistema apresentado na Figura 17.

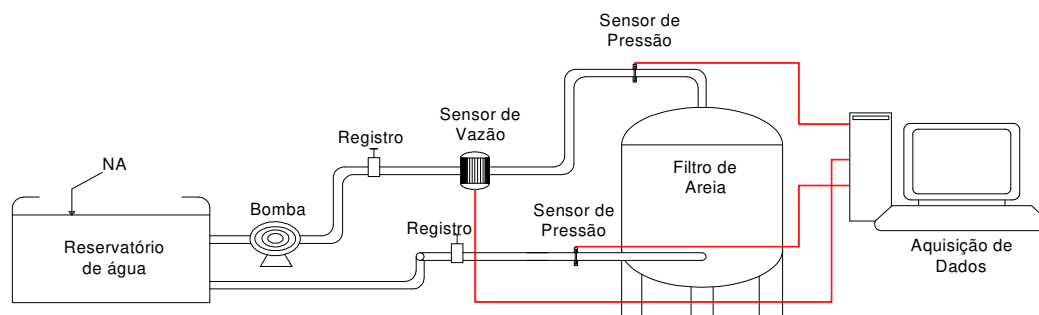


Figura 17: Módulo experimental com detalhes da conexão do sistema de aquisição de dados.

Para a montagem do sistema de aquisição de dados foram utilizados os seguintes equipamentos; sensor de vazão e transdutor de pressão, um microcomputador utilizado como controlador, uma placa de aquisição de dados instalada no PC e a lógica de ligações apresentadas na Figura 18. Como os sinais do medidor vazão são emitidos em corrente alternada, realizou-se a conversão deste sinal para voltagem, adequando-os às necessidades da placa de aquisição, utilizou-se uma resistência de 140Ω conectada à placa de conectores e ao cabo de emissão do sinal.

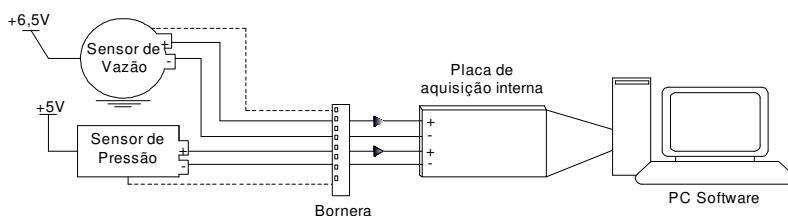


Figura 18: Ligações dos sensores de medição de pressão e vazão.

Para a aquisição e análise dos sinais provenientes dos sensores de vazão e pressão, foi utilizado o software Labview de Linguagem de programação gráfica desenvolvida pela National Instruments Inc. Os sinais elétricos foram armazenados no computador que, em função da programação realizada no Labview, já eram transformados em unidade de pressão e vazão, permitindo a visualização da variável desejada em tempo real. Desta forma, essas variáveis eram registradas com regularidade e confiabilidade, para intervalos de 1 segundo, Salienta-se que o sistema foi totalmente calibrado, por leituras periódicas e comparativas com manômetros de Bourdon para pressão e com medidor de ultra-som para vazão.

4.3.2.3 Condições de ensaio

Promoveu-se inicialmente a caracterização da perda de carga dos modelos de filtro para a condição sem material filtrante, ou seja, na ausência da areia no seu interior ou vazio. Para essa condição, procederam-se três repetições, aplicando-se valores de vazão ascendente, descendente e aleatório, utilizando-se as cargas hidráulicas apresentadas na Tabela 12. Cada leitura tinha duração de três minutos, com o registro de um valor médio de diferencial de pressão e de vazão por segundo. A partir dos valores médios registrados determinou-se a perda de carga característica de cada filtro para uma determinada taxa de filtração e construíram-se as curvas características de cada filtro.

Adicionalmente, ensaiaram-se os filtros de areia para se avaliar o efeito da granulometria e de diferentes alturas da camada filtrante no processo hidráulico de filtração e como as estruturas internas do equipamento interagiam com a presença do material filtrante. Dessa forma, determinou-se a perda de carga nos filtros de areia para cinco variações de taxa de filtração (vazão/área de filtração) e para três relações percentuais de altura de leito filtrante com a altura do corpo do filtro, ou seja, 40, 58 e 75%, H1, H2 e H3, respectivamente, considerando, para isso, a base do difusor até a base dos drenos (Tabela 12). Essas alturas do leito filtrante foram adotadas como critérios de ensaios, uma vez que as informações encontradas na literatura são referenciais para filtros lentos. Estudos posteriores com avaliação concomitante da eficiência de remoção serão necessários para o aprimoramento desses critérios para indicação de altura ótima de camada filtrante.

Os valores de taxa de filtração, apresentados na Tabela 12, foram adotados buscando atender os diferentes intervalos de operação sugeridos por diversos autores, e, principalmente, por não haver um consenso na literatura referente a um padrão recomendado na operação de

filtragem. Dessa forma, o intervalo sugerido para os ensaios experimentais abrange praticamente todas as recomendações encontradas na literatura (VERMEREIN & JOBLING, 1984; ASAE, 1993; PHILLIPS, 1995; PIZARRO CABELO, 1996; BENHAM & ROSS, 2002).

Tabela 12: Valores das alturas da camada filtrante e das cargas hidráulicas utilizadas nos ensaios dos filtros de areia em laboratório.

Filtro	Alturas avaliadas (cm)			Taxa de filtração ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)				
	H1	H2	H3	1	2	3	4	5
1	20,0	29,0	37,5	20	40	60	67	78
2	24,0	34,8	45,0	20	40	60	80	100
3	20,0	29,0	37,5	20	40	60	80	100

Os ensaios foram realizados para as três granulometrias de areia G1, G2 e G3, gerando, assim, nove combinações experimentais (três granulometrias para três alturas da camada filtrante). Da mesma forma, realizada para o filtro vazio, procederam-se três repetições para cada combinação, com coletas com durações de três minutos, aplicando valores de vazão ascendente, descendente e aleatória. A partir dos valores médios de diferencial de pressão, registrados, determinou-se a perda de carga característica de cada filtro.

Devido ao fato do filtro 1 possuir diâmetro maior que os demais, e por limitações do sistema de bombeamento que não supria as vazões necessárias para se alcançar as cargas hidráulicas de 80 e 100 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, submeteu-se este modelo a valores diferentes de taxa de filtração, durante a caracterização hidráulica.

4.3.2.4 Procedimento experimental

Como o valor da porosidade pode afetar de forma significativa os valores de perda de carga, buscou-se acondicionar a camada de areia no interior dos filtros de forma uniforme. Desse modo, buscando aplicar uma mesma compactação devido à pressão interna, os filtros eram submetidos inicialmente a um período de funcionamento de 15 minutos, aplicando a taxa de filtração máxima, propiciando, assim, as mesmas condições para todas as repetições do experimento. Após essa fase inicial e a estabilização do sistema, iniciava-se a aquisição dos dados da vazão e pressão durante três minutos para cada condição de ensaio, sendo que o sistema de aquisição registrava um valor médio 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 carga para cada condição de ensaio, procedendo-se a construção da curva característica de cada filtro.

A partir dos valores de velocidade do fluido na superfície de cada camada filtrante em cada filtro e dos diâmetros equivalentes de cada granulometria ensaiada, procedeu-se o cálculo do número de Reynolds para meio poroso com auxílio da Equação 20, recomendada por CLEASBY & LOGSDON (1999).

$$R_e = \frac{\rho v D_{eq}}{\mu} \quad (20)$$

Sendo:

R_e : Número de Reynolds (adimensional)

ρ : densidade do fluido ($M.L^{-3}$)

μ : viscosidade do fluido ($M.T^{-1}.L^{-2}$)

D_{eq} : diâmetro equivalente (L).

4.4 Simulação matemática do comportamento dos filtros de areia

Buscando desenvolver uma equação ou modelo matemático que caracterizasse o comportamento hidráulico dos filtros de areia durante a filtragem com água limpa, procedeu-se a validação de modelos matemáticos, realizando uma simulação matemática em duas etapas distintas: determinação de uma equação de perda de carga para a condição de filtro vazio, ou seja, sem o meio filtrante e a validação do modelo matemático que analisa o efeito da camada filtrante no processo de perda de carga. Dessa forma, pretendia-se propor uma equação geral de perda de carga, comparado com os sistemas avaliados em laboratório.

4.4.1 Efeito da estrutura hidráulica na perda de carga

Com o objetivo de encontrar o modelo matemático que melhor explicasse o comportamento físico dos componentes internos, difusor e drenos, dos filtros de areia no processo de perda de carga para o filtro sem leito filtrante, e que melhor atingisse um valor significativo de correlação entre as variáveis, ajustou-se os valores experimentais de perda de carga em função da vazão do sistema, ao modelo; alométrico linear do tipo $H_f = \beta_0.Q^{\beta_1}$ e a função exponencial $H_f = \beta_0.e^{Q.\beta_1}$, procedendo a análise de variância dos resultados para cada modelo. Esses modelos foram escolhidos baseados na literatura (ADIN & ALON, 1986; TESTEZLAF & RAMOS, 1995; PUIG-BARGUÉS et al., 2005; OLIVEIRA et al., 2007), que afirmam a dificuldade de se utilizar a teoria de perda de carga localizada em peças especiais

como filtros, e orientam a aplicação de equações gerais nesses casos, em virtude de suas próprias características e de fenômenos observados em seu interior quando da passagem do líquido.

4.4.2 Efeito da camada filtrante e da granulometria na perda de carga

A partir das condições experimentais dos ensaios dos filtros com diferentes valores de granulometria da areia e de altura da camada filtrante, avaliou-se a validade da aplicação do modelo matemático sugerido por TRUSSEL & CHANG (1999), apresentado na Equação 6 na determinação do processo de perda de carga em filtros de areia e os coeficientes de permeabilidade associado aos componentes linear e não linear da perda de carga (α_F e β_F), representado pelas Equações 11 e 12, respectivamente.

Os dois componentes da equação relacionam a interferência das características do fluido (água), densidade (μ) e viscosidade (ρ), com do material constituinte do leito filtrante, porosidade (ε) e diâmetro médio (d) dos grãos, no processo de perda de carga em meios porosos. TRUSSEL & CHANG (1999) ressalta que todos os valores podem ser medidos exceto as componentes a e b , que devem ser determinadas utilizando a forma geométrica dos grãos, definida pela sua esferecidade (ψ) e, a partir dessa geometria determinar os termos k_t e c . CARMAN (1937) e ERGUN (1952) usaram dados de esferas para estimar a constante (k_t), encontrando valores de 2,5 e 2,08, respectivamente. ERGUN (1952) também recomendou, para amostras esféricas, o valor aproximado de 49 para a constante c . As Equações 21 e 22, citadas por TRUSSEL & CHANG (1999), podem ser utilizadas para a determinação dos valores de a e b :

$$a = 2k_t\psi^2 \quad (21)$$

$$b = \sqrt{\frac{2k_t}{c}}\psi \quad (22)$$

A Tabela 13 ilustra valores desses índices determinados por CHANG et al., (1999); TRUSSELL et al., (1999) e RUMPF & GUPTE, (1971).

Tabela 13: Valor dos parâmetros a , b e da porosidade para diferentes materiais filtrantes.

Material	Coeficientes		Porosidade típica (%)	Fonte (autor)
	a	b		
Antracito	210 – 245	3,5 – 5,3	47 – 52	CHANG et al. (1999); TRUSSELL et al. (1999)
Areia	110 – 115	2,0 – 2,5	40 – 43	CHANG et al. (1999)
Vidro	130 – 150	1,3 – 1,8	38 – 40	RUMPF & GUPTE (1971)

Os valores das variáveis utilizadas nesse trabalho para a validação desse modelo estão apresentados na Tabela 14, que foram selecionados a partir das condições experimentais utilizadas nas avaliações dos filtros ensaiados e de acrescentar dois pontos estimados para taxas de filtração inferiores a $20 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, com o propósito de conhecer o comportamento hidráulico nessa região.

A partir dos valores apresentados nessa tabela, utilizou-se uma planilha eletrônica desenvolvida para a determinação do valor da perda de carga pelo modelo de TRUSSEL & CHANG (1999).

Posteriormente, analisou-se o comportamento de um modelo matemático, denominado combinado, que adicionava os efeitos do modelo característico para o comportamento hidráulico das estruturas internas dos filtros, validado nesse trabalho, ao do equacionamento de TRUSSEL & CHANG (1999), que caracteriza o comportamento do leito filtrante. Finalizando, compararam-se os valores de perda de carga experimentais com os dados estimados a partir do equacionamento proposto por TRUSSEL & CHANG (1999) e do modelo matemático combinado. A análise dos resultados foi feita para os valores médios de perda de carga, em kPa, utilizando-se do modelo linear $y = a + bx$, na qual a variável dependente foi os valores estimados pelos métodos avaliados e os valores experimentais foi a variável independente.

Tabela 14: Valores das variáveis utilizadas nas simulações para validação da equação de TRUSSEL & CHANG (1999).

Simulação	V ₁ (m.s ⁻¹)	V ₂ (m.s ⁻¹)	V ₃ (m.s ⁻¹)	V ₄ (m.s ⁻¹)	V ₅ (m.s ⁻¹)	V ₆ (m.s ⁻¹)	V ₇ (m.s ⁻¹)		
1	0,0014	0,0027	0,0054	0,0113	0,0167	0,0188	0,0215		
2	0,0014	0,0028	0,0056	0,0112	0,0168	0,0224	0,028		
3	0,0014	0,0028	0,0056	0,0122	0,0168	0,0224	0,0276		
Dados do leito filtrante									
Simulação	H1 (m)	H2 (m)	H3 (m)	d ₁ (m)	d ₂ (m)	d ₃ (m)	ε ₁	ε ₂	ε ₃
1	0,20	0,29	0,375	0,00051	0,00085	0,00115	0,43	0,42	0,41
2	0,24	0,348	0,45	0,00051	0,00085	0,00115	0,43	0,42	0,41
3	0,20	0,29	0,375	0,00051	0,00085	0,00115	0,43	0,42	0,41
Dados gerais									
Simulação	μ (kg.s ⁻¹ .m ⁻¹)		ρ (kg.m ⁻³)		g (m.s ⁻¹)		a		b
1	0,001002		999,996		9,81		115		2,5
2	0,001002		999,996		9,81		115		2,5
3	0,001002		999,996		9,81		115		2,5

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Levantamento de fabricantes brasileiros de filtros de areia e de modelos de equipamentos nacionais e internacionais comercializados no Brasil

A partir de informações obtidas na ABIMAQ/SINDIMAQ e pela Internet, entre o período 08/2008 a 06/2009, foram constatadas quarenta empresas em diferentes estados brasileiros que fabricavam filtros de areia. Das empresas pesquisadas, verificou-se que, somente cinco, atuavam na área de irrigação, sendo: Amanco Brasil Ltda. (Sumaré, SP), Engemec Equipamentos Industriais Ltda. (Taboão São Bernardo do Campo, SP), Hidro Solo Indústria e Comércio Ltda. (Maceió, AL), Iavant Equipamentos Industriais e Agrícolas Ltda. (Ribeirão Preto, SP), Marbella do Brasil Ltda. (São Paulo, SP). A partir de contatos com empresas fabricantes de equipamentos de irrigação e distribuidores comerciais de sistemas de irrigação localizada, constatando-se a presença significativa no mercado brasileiro de filtros de areia importados, provenientes das seguintes empresas internacionais: Odis Irrigation Equipment Ltd., Arkal Filtration Systems Kibbutz Bet Zera e Amiad Filtration Systems Ltd., todas sediadas em Israel.

As Figuras 19 e 20 apresentam, respectivamente, os modelos de filtros das empresas nacionais (Amanco, Hidro Solo e Marbella) e internacionais (Odis, Arkal e Amiad) mais atuantes no mercado brasileiro. Os equipamentos da empresa Iavant e Engemec não são apresentados pela não disponibilização de fotos em seus catálogos.

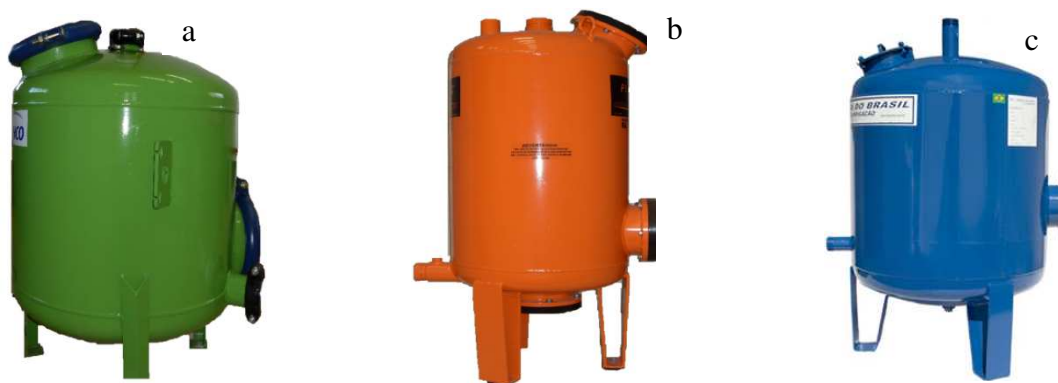


Figura 19: Filtros de areia de fabricantes nacionais, sendo; Amanco (a), Hidro Solo (b) e Marbella (c). Fonte: Catálogos das empresas

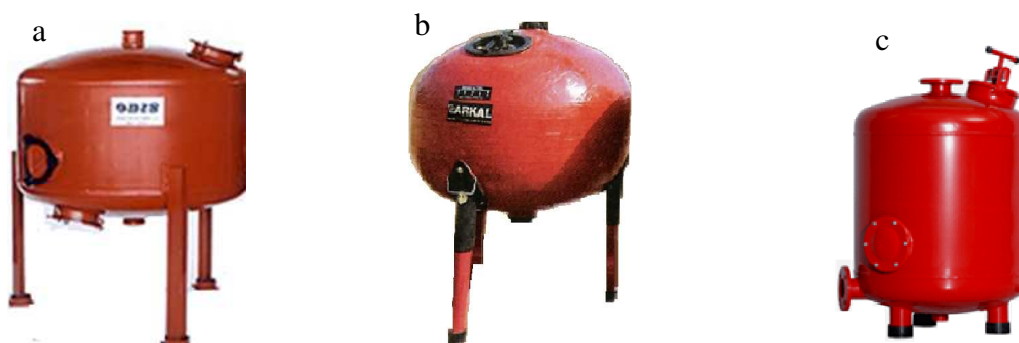


Figura 20: Filtros de areia de fabricantes internacionais, Odis (a), Arkal (b) e Amiad (c). Fonte: Catálogos das empresas

Analisando as Figuras 19 e 20, observa-se que os modelos estruturais dos filtros apresentam semelhanças entre si. Todos têm o formato cilíndrico, exceto para Arkal que é ovulado, tampas (calota) na parte superior e inferior, tubulação de entrada do afluente na vertical e no centro da calota superior, abertura na calota superior e na lateral do cilindro para o manuseio do material filtrante, exceto o filtro da Odis, que está localizado na calota inferior, tubulação de saída do efluente na posição horizontal, instalado na lateral da calota inferior, exceto para Odis e Arkal, que estão centralizados verticalmente na calota inferior do cilindro. Detectou-se que as tampas das aberturas para operação do material filtrante são de diversos modelos, dificultando possíveis manutenções e/ou trocas, e que as empresas, nacionais, possibilitam a escolha do tipo de engate (victaullic e rosca BSP), para as tubulações de entrada e saída de água, facilitando a instalação para o produtor.

A Tabela 15, apresenta as características dimensionais e estruturais e alguns dados operacionais dos filtros de areia comercializados no Brasil, exceto para os equipamentos fabricados pela Iavant Equipamentos Industriais e Agrícola Ltda, que não dispõe de catálogo informativo de seus equipamentos.

Tabela 15: Características dimensionais e estruturais das principais marcas de filtros de areia comercializados no Brasil.

Fabricantes	Diâmetro da areia (mm)	Diâmetro do corpo(m)	Sistema de Drenos	Vazão Nominal ($m^3.h^{-1}$)	Pressão de serviço (kPa)
Amanco	0,6 a 2,0	0,5 a 1,05	Braço coletor	25 a 200	686
Hidro Solo	0,6 a 1,0	0,2 a 1,0	Crepina Cilíndrica	0,4 a 120	490 a 1770
Marbella	0,8 \geq	0,36 a 1,5	Crepina Cônica	6 a 120	785
Engemec	0,6 a 0,8	0,4 a 1,2	Crepina Cônica	6 a 80	785 a 981
Odis	0,6	0,3 a 1,5	Crepina Cônica	3,5 a 168	824 a 1030
Arkal	-	1,2	Crepina Cônica	70	588
Amiad	1,0	0,4 a 1,5	Crepina Cônica	6 a 110	637

Fonte: Catálogo de fabricantes.

Observa-se na Tabela 15, que não existe correspondência entre os fabricantes de filtro de areia, em relação às recomendações de projeto, como vazão nominal e pressão máxima de serviço, havendo uma discrepância significativa entre os valores recomendados, para as mesmas características de dimensões de equipamento, deixando a incerteza de quais padrões seguir. O mesmo acontece quando se avalia a granulometria da areia recomendada para o leito filtrante, pois se observa que os intervalos granulométricos sugeridos estão dentro de uma faixa abrangente e que não há preocupação sobre as características físicas do material utilizado, bem como da qualidade do efluente que se pretende obter.

Durante a caracterização interna dos filtros nacionais, verificou-se a existência de três sistemas de drenagem: braços coletores (Figura 21) da empresa Amanco, crepinas cônicas da Marbella do Brasil, e cilíndricas da Hidro Solo (Figura 22). Entre esses tipos de sistema de drenagem há também a diferenciação da forma de montagem e instalação destes no interior do filtro. As crepinas são instaladas na base inferior do filtro sobre os fundos falsos e os braços coletores em uma tubulação geralmente centralizada, onde se ramifica todos os braços, direcionando o fluxo de efluente para o sistema de irrigação.

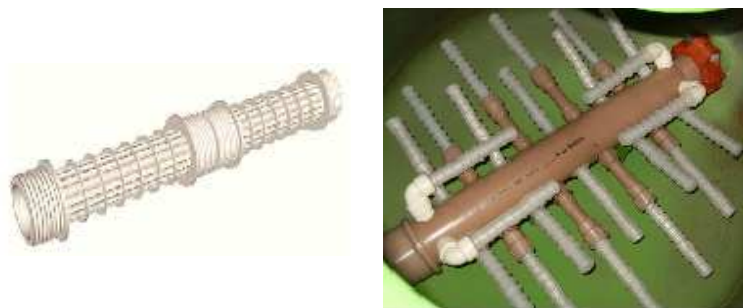


Figura 21: Sistema de drenagem tipo braço coletor utilizados em filtros de areia, da marca Amanco.

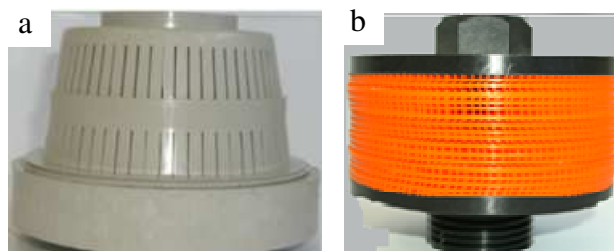


Figura 22: Crepinas cônicas utilizadas nos filtros da marca Marbella (a) e crepinas cilíndricas da marca Hidro Solo (b).

Constatou-se, ainda, para os fabricantes nacionais, a existência de três modelos diferentes de sistema difusor na entrada do afluyente nos filtros de areia: modelos planos, planos com bordas ao longo do diâmetro e planos com anel superior. A Figura 23 apresenta fotos dos modelos de difusores para os filtros da marca Amanco, Hidro Solo e Marbella, sendo que os respectivos desenhos técnicos podem ser visualizados no Anexo VI, Figuras 36, 37 e 38.



Figura 23: Modelos de difusores encontrados nos filtros Amanco (a), Hidro Solo (b) e Marbella (c).

Além de não existir um projeto específico para esse acessório, notou-se ainda que as suas dimensões não seguem nenhum padrão entre os fabricantes, assim como as suas alturas de instalação são irregulares, existindo difusor instalado a 0,16m da entrada do filtro, assim como a 0,06m.

Ao se analisar comparativamente os filtros das empresas brasileiras com os filtros importados, observa-se que os modelos nacionais são praticamente semelhantes dos filtros fabricados no exterior, com pequenas diferenças, permitindo concluir que não foi desenvolvido um projeto específico de filtro de areia para as condições encontradas pelos produtores brasileiros.

Durante a realização da caracterização dos filtros nacionais, foram realizadas visitas técnicas às empresas sediadas no estado, permitindo, assim, conhecer todo o processo de fabricação dos equipamentos dessas empresas. Na oportunidade, foram firmadas parcerias, onde as três mais importantes empresas nacionais, Marbela do Brasil, Hidro Solo e Amanco Brasil, prontificaram-se a colaborar com a pesquisa, fornecendo equipamentos e discutindo os resultados obtidos no decorrer dos ensaios.

Os resultados desse levantamento permitiram identificar o perfil tecnológico dos filtros de areia disponíveis para comercialização, possibilitando a aquisição de informações técnicas dos projetos estruturais e das características dos modelos de cada equipamento, apontando possíveis pontos que devem ser melhorados pelos fabricantes nacionais.

5.2 Caracterização da operação dos filtros em campo

Realizaram-se três visitas técnicas, procedendo à análise da operação dos filtros de areia, bem como a eficiência desses equipamentos no processo de filtração.

Durante as visitas aplicou-se o questionário visando caracterizar o histórico de instalação dos equipamentos. Os resultados mostraram que, as três propriedades utilizam água superficial proveniente de rios, sendo que a segunda e terceira, em o represamento da água antes de recalcar para o sistema de filtração. Das três propriedades, apenas a segunda não havia realizado análise da água antes e/ou após a implantação dos filtros de areia e só a terceira realiza anualmente essa análise para verificação da qualidade de água de irrigação.

Todos os filtros analisados em campo eram da marca Marbella do Brasil, sendo observadas, visualmente, condições externas ótimas, com poucas incidências de corrosões ou descascamento da pintura, exceto para os filtros de uma das propriedades, que devido o tempo de uso (15 anos) estavam com a pintura em péssimo estado de conservação (Figura 24).



Figura 24: Filtros das propriedades visitadas mostrando as condições externas dos equipamentos, na propriedade Ponte Baixa (a), Estância Santa Maria (b) e Vem Flor Esmeralda (c).

Os filtros foram abertos e analisados internamente, sendo constatado que todos apresentavam camada filtrante com elevada espessura ou altura, ou seja, os filtros estavam completamente cheios de areia ou com a superfície superior próxima ao difusor, não havendo espaço suficiente para proceder à expansão do leito durante a retrolavagem, conforme recomendação (Figura 25). Este fato ocorre porque os fornecedores de filtro não especificam a altura de leito filtrante, mas sim, indicam a quantidade, em peso, ou em número de sacos de 25 kg, que deverão ser colocados no interior de cada filtro.

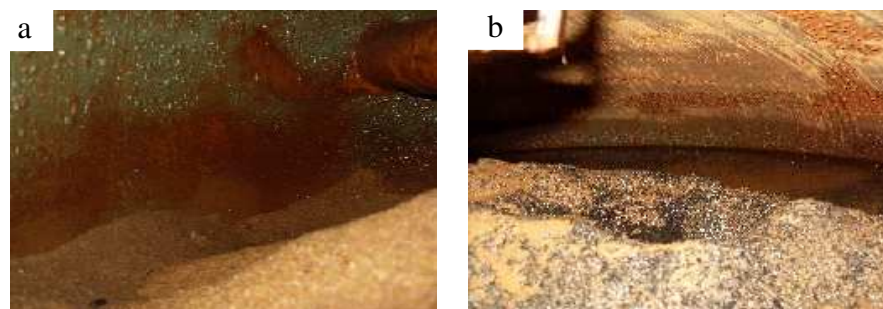


Figura 25: Condições internas dos filtros das propriedades visitadas, Ponte Baixa (a) e Estância Santa Maria (b)

A visualização interna dos filtros avaliados permitiu observar uma deformação da camada superficial da areia, ou seja, havia pontos de acumulação e de retirada do material, caracteriza por rebaixamento nas regiões próximas às paredes do filtro e elevações na parte central. Essa condição continuou a existir, antes e após a aplicação da retrolavagem, exceto para os filtros da propriedade Vem Flor Esmeralda, que apresentavam superfícies mais planas depois da retrolavagem. Pode-se observar também a existência de quantidades significativas de material orgânico na superfície filtrante antes da retrolavagem e que, após a realização da lavagem dos leitos, ainda permaneciam pequenas quantidades dessas impurezas, exceto para o segundo conjunto de filtragem da propriedade Vem Flor Esmeralda que se apresentou totalmente isenta de resíduos após a retrolavagem.

A Tabela 16, apresenta os valores dos dados coletados de vazão total do sistema de filtragem (Q_t), vazão de retrolavagem (Q_r), pressão de entrada (P_e), pressão de saída (P_s) e pressão durante a retrolavagem (P_r), e valores estimados de taxa de filtração (T_f) e diferencial de pressão (ΔP), durante as quatro avaliações realizadas em campo nas três propriedades.

Tabela 16: Dados coletados e estimados durante as visitas aos produtores.

Local	Parâmetros Avaliados								
	Q_t ($m^3.h^{-1}$)	Ø do filtro (m)	Nº de filtros	T_f ($m^3.m^{-2}.h^{-1}$)	Q_r ($m^3.h^{-1}$)	P_e (kPa)	P_s (kPa)	ΔP (kPa)	P_r (kPa)
P1	19,3	0,6	2	34	6,4	691	667	24	-
P2	170	1,2	4	37,6	21	716	647	69	392

Nota-se que os valores calculados de taxa de filtração (T_f) ficaram dentro do aceitável para a primeira e segunda propriedade visitada, mantendo-se abaixo de $61 m^3.m^{-2}.h^{-1}$ sugerido por BENHAM & ROSS (2002). Observa-se que para terceira propriedade, não foi possível

determinar T_f por inadequação das instalações dos filtros, que não permitia a montagem do medidor de vazão dentro das especificações do fabricante desse equipamento.

Observa-se na Tabela 16 que os dados de diferencial de pressão, utilizado para se determinar o momento da retrolavagem, se encontravam diferentes do intervalo de perda de pressão de 39 a 59 kPa pelos filtros, recomendado por PIZZARO CABELO (1996), mostrando que a retrolavagem estava sendo antecipada em relação a variação de pressão para a propriedade Ponte Baixa, justificada pelo critério utilizado de tempo de irrigação para proceder essa ação. No entanto, a propriedade Estância Santa Maria, procedia a lavagem do leito filtrante posterior ao momento indicado pela literatura, utilizando o mesmo critério, ou seja, o tempo decorrido de irrigação.

A Tabela 17 mostra os valores de sólidos suspensos totais do afluente e efluente dos filtros avaliados, estimando os respectivos valores de eficiência de remoção.

Tabela 17: Valores de SST e da eficiência de remoção dos filtros avaliados nas visitas.

Local	Antes da Retrolavagem				Após a Retrolavagem				
	T.F ¹ (h)	SST1 ² (mg.L ⁻¹)	SST 2 ³ (mg.L ⁻¹)	E _R ⁴ (%)	T.R ⁵ (min)	SST 1 ² (mg.L ⁻¹)	SST 3 ⁶ (mg.L ⁻¹)	SST 4 ⁷ (mg.L ⁻¹)	E _R ⁸ (%)
P1	3	100	45	55,0	5	100	950	43	57,0
P2	3	140	61	56,4	3	140	1400	43	69,4
P3a	5	52	49	5,60	15	52	85	18	64,4
P3b	5	12	6	50,0	15	12	74	3	75,0

¹Tempo decorrido de filtragem antes da retrolavagem; ² Sólidos Suspensos Totais na fonte; ³ Sólidos Suspensos Totais no efluente antes da retrolavagem; ⁴ Eficiência de remoção antes da retrolavagem; ⁵ Tempo de duração da retrolavagem; ⁶ Sólidos Suspensos Totais logo após a retrolavagem; ⁷ Sólidos Suspensos Totais depois da retrolavagem; ⁸ Eficiência de remoção após a retrolavagem.

Observa-se pela Tabela 17 que a eficiência de remoção para os filtros da propriedade Estancia Santa Maria e Ponte Baixa, mantiveram-se próximos de 56%. Contudo, para uma das avaliações procedidas na propriedade Vem Flor Esmeralda, houve uma remoção insignificante com aproximadamente 6% de retenção de sólidos suspensos totais depois da filtragem. Esse fato pode ter ocorrido devido ao elevado tempo em que esses filtros operaram sem a realização da lavagem do leito filtrante, sendo justificado pelo acréscimo da remoção após proceder a retrolavagem, elevando os índices de remoção para 64%. Verifica-se que as retrolavagens foram eficazes, aumentando a eficiência de remoção dos filtros após a realização da lavagem das camadas filtrantes.

Nos primeiros minutos de filtração após a retrolavagem a concentração de sólidos suspensos totais foi significativamente maior que os valores encontrados na fonte de captação (Tabela 17). Esse fato pode ser atribuído à fluidização do leito, quando as impurezas desprendidas dos grãos de areia durante a retrolavagem e que não foram eliminadas pelo fluxo ascendente, ficam livres e são facilmente transportadas para o sistema de drenagem dos filtros e conduzidas nos primeiros minutos de filtração após a retrolavagem para o sistema de irrigação.

A dificuldade de conseguir contatos e concordância dos produtores que possuem filtros de areia instalado nas propriedades limitou o número da realização de visitas técnicas, o que possibilitaria a obtenção de resultados mais abrangentes. Entretanto, pode-se observar que a metodologia proposta abrange todos os itens importantes para o esclarecimento da utilização e do manejo dos filtros de areia para irrigação localizada. Porém, foi possível detectar limitações na aquisição de alguns dados em campo, como pressão e vazão, pelo fato dos equipamentos de medida exigir critérios técnicos de instalação que não poderá ser seguidos. . Como exemplo, os critérios de instalação de medidores da vazão recomendam a utilização de dez vezes o diâmetro da tubulação disponível e a não existência de tomadas de pressão em alguns cabeçais de controle dos sistemas de irrigação.

5.3 Caracterização do material filtrante

5.3.1 Características granulométricas da areia

A Tabela 18 apresenta os valores médios da massa, da porcentagem de massa retida e do percentual de massa que passou por cada malha das peneiras durante os ensaios granulométricos das amostras de areia, a partir dos dados disponibilizados nas Tabelas do ANEXO II, (Tabelas 22, 23 e 24), que apresentam todos os valores obtidos nos ensaios de granulometria.

Nota-se que G1, G2 e G3, apresentaram, respectivamente, 92,4; 93,0 e 75,1% de massa retida no intervalo granulométrico indicado pelo fornecedor, mostrando que a maior concentração de grãos, encontra-se no intervalo comercial fornecido. Entretanto, G3 apresentou 23,4% de massa retida acima do intervalo sugerido, mostrando que essa amostra de areia apresentava granulometria superior ao intervalo sugerido pelo fornecedor. Esse fato pode acarretar uma remoção de impurezas abaixo da faixa proposta para esse intervalo

granulométrico, consequência do diferente arranjo dos grãos (porosidade) na camada filtrante, possibilitando a passagem de contaminantes para o sistema de irrigação.

Tabela 18: Valores médios da massa (g), do percentual retido e do percentual que passou por cada malha das peneiras para as amostras de areia ensaiadas.

Malha # (mm)	G1 (0,5 - 1,0mm)			G2 (0,8 - 1,2mm)			G3 (1,0 - 1,5mm)		
	Massa retida (g)	% retido	% que passa	Massa retida (g)	% retido	% que passa	Massa retida (g)	% retido	% que passa
2,36	—	—	—	—	—	—	0,00	0,0	100
2,00	—	—	—	—	—	—	73,13	7,3	92,7
1,70	—	—	—	—	—	—	161,26	16,1	76,6
1,40	0,02	0,0	100	1,80	0,2	99,8	299,44	29,9	46,6
1,19	0,03	0,0	100	10,50	1,1	98,8	368,79	36,9	9,7
1,00	5,55	0,6	99,4	681,92	68,2	30,6	82,73	8,3	1,5
0,85	173,59	17,4	82,1	237,48	23,7	6,8	7,42	0,7	0,7
0,71	410,95	41,1	41,0	59,12	5,9	0,9	2,63	0,3	0,5
0,60	194,98	19,5	21,5	7,21	0,7	0,2	1,46	0,1	0,3
0,50	138,37	13,8	7,7	1,55	0,2	0,0	—	—	—
0,42	62,4	6,2	1,4	0,21	0,0	0,0	—	—	—
Fundo	14,11	1,4	0,0	0,19	0,0	0,0	3,14	0,3	0,0

Com os dados disponíveis na Tabela 18 foram construídas as curvas granulométricas para G1, G2 e G3 que estão apresentadas na Figura 26.

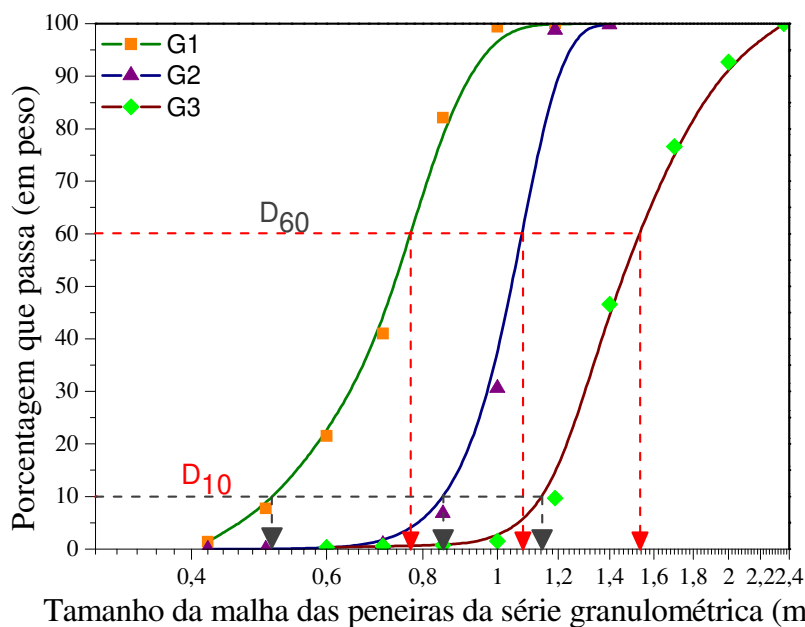


Figura 26: Curvas granulométricas das três amostras de areia ensaiadas

Observando as curvas granulométricas das três amostras na Figura 26, nota-se que G1 e G3 apresentam inclinações superiores a G2, indicando que uma maior variação no tamanho dos grãos presentes nessas amostras, o que pode ser confirmado na Tabela 18. O comportamento apresentado por G2 indica que a maioria dos grãos pertencia a uma mesma classificação de peneira, resultando em uma maior uniformidade da amostra. Esse fato é confirmado pela análise (Tabela 18), que mostra a presença de uma maior massa acumulada para essa amostra (681,92g) na peneira de 1,0mm e pelos valores de CU apresentados na Tabela 19, confirmando a tendência da curva granulométrica. GIL et al. (2002) avaliando areias processadas de rio utilizadas em filtros para irrigação localizada, encontraram comportamento semelhante para grãos de granulometria 0,8 a 1,2mm.

A partir da curva granulométrica de cada amostra obtiveram-se os valores de D_{10} e D_{60} , e a partir desses parâmetros determinou-se o coeficiente de uniformidade (CU), como mostra a Tabela 19.

Tabela 19: Parâmetros granulométricos D_{10} , D_{60} , CU das amostras avaliadas.

Amostra (G)	D_{10} (mm)	D_{60} (mm)	CU
1	0,51	0,77	1,51
2	0,85	1,08	1,27
3	1,15	1,54	1,34

Os valores do diâmetro efetivo (D_{10}) para as três amostras foram respectivamente 0,51; 0,85 e 1,15. Observa-se que o valor deste parâmetro ficou próximo ao valor mínimo para os intervalos granulométricos avaliados, indicando o diâmetro representativo para projetos de filtros de areia, o que equivaleria a uma camada entre 200 e 100 Mesh, respectivamente, valores recomendados para sistemas de irrigação localizada.

Os valores do coeficiente de uniformidade encontrados para as amostras foram de 1,51; 1,27 e 1,34, respectivamente, com a amostra 1, apresentando o maior valor de coeficiente, tendo, portanto, diâmetros de partículas mais heterogêneas. Entretanto, todas as amostras apresentaram valores desse coeficiente dentro dos limites citados por HAMAN et al. (1994), PIZARRO CABELO (1996) e LÓPEZ (2007), comprovando a homogeneidade do material adquirido.

5.3.2 Avaliação dos parâmetros físicos dos grãos de areia

Os valores dos parâmetros físicos estão apresentados nas Tabelas do ANEXO III, (Tabelas 24, 25, 26, 27 e 28) sendo os valores médios disponibilizados na Tabela 20.

Tabela 20: Valores médios do diâmetro equivalente, da densidade das partículas, da porosidade e da esfericidade para as amostras ensaiadas

Parâmetro	Amostras		
	G1	G2	G3
Deq (mm)	0,90	1,10	1,60
σ	0,01	0,01	0,04
CV (%)	3,30	1,80	3,60
ρ_s (g.cm ⁻³)	2,67	2,67	2,67
σ	0,00	0,01	0,01
CV (%)	0,10	0,20	0,30
ε (%)	43	42	41
σ	0,6	0,2	0,5
CV (%)	1,4	0,5	1,1
ψ	0,82	0,82	0,82
σ	0,05	0,05	0,06
CV (%)	6	6	7

Verifica-se que o D_{eq} para as amostras 1 e 2, foram respectivamente, 0,9 e 1,1mm, apresentando-se dentro do intervalo granulométrico e próximos ao nível máximo desse intervalo (Tabela 20). Para a amostra 3 o valor do D_{eq} foi de 1,6mm, acima do intervalo granulométrico. O valor deste parâmetro é importante para o estudo do processo de filtragem e de fluidização durante a retrolavagem, pois a sua utilização é recomendada por SIWIEC (2007), CHANG et. al. (1999) e CLEASBY & LOGSDON (1991), na determinação do número de Reynolds que caracteriza o regime de escoamento em meios porosos.

Todas as amostras apresentaram massa específica (ρ_s) de 2,67 g.cm⁻³ conforme sugerido pela literatura. O fato dos valores terem sido iguais se deve, provavelmente, a origem idêntica das amostras e por terem vindo do mesmo fornecedor, sofrendo, assim processos idênticos de formação e possuindo concentrações idênticas dos minerais formadores.

Os valores médios da porosidade de G1, G2 e G3 foram 43, 42 e 41%, respectivamente, dentro do intervalo proposto pelos autores, CLEASBY & FAN (1981); DHARMARAJAH & CLEASBY (1986); CLEASBY & WOODS (1975), que recomendaram valores entre 40 a 48%. CHANG et al. (1999), em seus estudos que avaliaram areia entre 0,5 e 1,5mm, encontraram valores de porosidade entre 40% a 43%, semelhantes aos valores encontrados nesse trabalho. Pode-se observar também que G3, com maior intervalo granulométrico, apresentou o menor valor de porosidade e G1, com menor intervalo granulométrico, a maior porosidade, comportamento idêntico ao encontrado por CHANG et al.

(1999). Esse fato demonstra que, da mesma forma que os solos, a porosidade da areia diminui com o aumento da granulometria das partículas. Essa relação ocorre devido ao arranjo espacial entre os grãos de areia, que cria uma maior porosidade total a partir da elevada fração de microporosidade presente em granulometrias menores, em contraste a uma menor porosidade total apresentada por granulometrias maiores formada por uma pequena fração de macroporos.

O valor da esfericidade (ψ) para as três granulometrias avaliadas foi de 0,82. Apesar de esse parâmetro ter sido determinado pelo método visual (direto), não recomendado pela literatura, o valor encontrado está em conformidade com os valores encontrados para areia de sílica utilizada na filtragem para irrigação. Dessa forma, segundo FAIR et al. (1968), essas areias podem ser caracterizadas de formato agudo e, próprias para aplicação em filtros filtros pressurizados por possuírem arestas afiadas e angulares (PHILLIPS, 1995).

Os valores de esfericidade e porosidade encontrados para as amostras coincidem com dos dados propostos por CLEASBY & FAN (1981) apresentados na Tabela 5, e próximos a valores da curva de média compactação apresentada por SIWIEC (2007).

Os valores encontrados para os parâmetros físicos das amostras confirmam que as areias selecionadas para esse trabalho se encontravam dentro dos limites aceitáveis para utilização em filtro de areia empregado na irrigação localizada e adequadas para os ensaios hidráulicos a serem desenvolvidos no trabalho.

5.4 Caracterização hidráulica dos filtros de areia

5.4.1 Análise do efeito da estrutura do filtro na perda de carga

A partir dos valores médios de perda de carga em função da taxa de filtração para os três filtros avaliados para a condição de ausência da camada filtrante, cujos dados experimentais estão apresentados na Tabela 30, ANEXO IV, confeccionou-se as curvas apresentadas na Figura 27.

Ao se analisar as curvas apresentadas na Figura 27, verifica-se que o filtro 1 apresentou valores significativamente maiores de perda de carga quando comparado com os filtros 2 e 3 para os mesmos valores de taxa de filtração, isso se justifica pelo fato que o filtro 1 ser constituído por um difusor diferenciado, construído com tubo de seção quadrada, que conduz o afluente até a placa difusora (Figura 23a) e drenos do tipo braço coletor, sendo que

os filtros 2 e 3 utilizam crepinas e difusores dos tipos apresentados nas Figuras 23b e 23c, sem tubo condutor de afluente até o difusor. O formato e as dimensões reduzidas da saída da seção quadrada para a placa do difusor do filtro 1 acrescentam resistência adicional ao escoamento do afluente para dentro do corpo do filtro e, conseqüentemente, aumentam a dissipação de energia potencial no processo de filtração, elevando a perda de carga da estrutura desse equipamento.

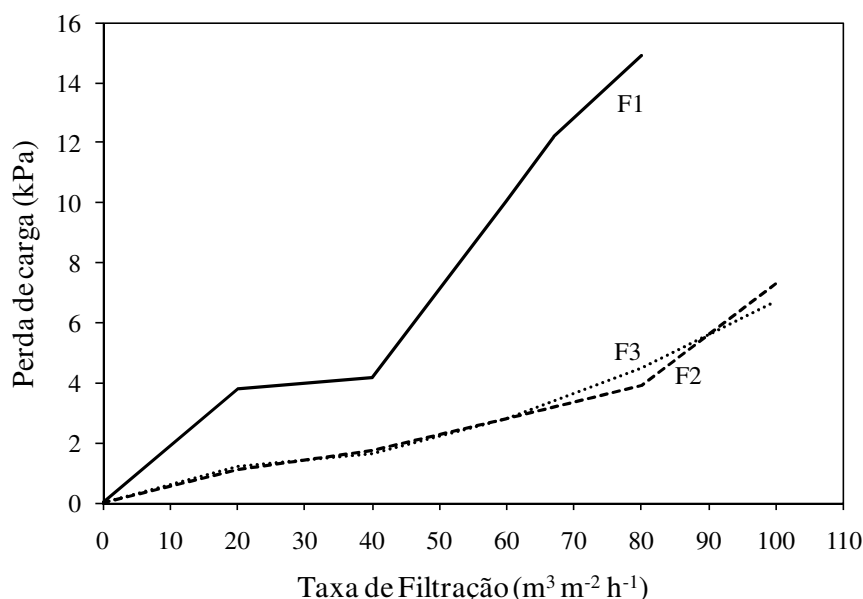


Figura 27: Curvas da variação da perda de carga em função da taxa de filtração para os três filtros avaliados na condição de ausência da areia no seu interior.

Além disso, pela Figura 27 é possível observar que os filtros 2 e 3 apresentaram comportamentos praticamente semelhantes, ou seja, proporcionaram variação idêntica da perda de carga com o incremento da taxa de filtração, sem variações significativas entre os valores encontrados para esses dois equipamentos. O comportamento hidráulico apresentados pelos filtros avaliados, sem a presença da areia nos seus interiores, pode ser justificado pela diferença entre os tipos de acessórios internos desses equipamentos.

Adicionalmente, parte do comportamento apresentado pelo filtro 1 pode ter sido resultado da utilização na montagem do módulo hidráulico de uma tubulação de entrada com diâmetro nominal de 50, ao invés de 75, como recomendado pelo fabricante desse filtro. Esse fato, determinado pela proposta de montagem do módulo antes da obtenção desse filtro, apesar do uso de uma luva de redução, pode ter ocasionado um aumento na velocidade de escoamento do fluido antes da entrada do equipamento, pelo não desenvolvimento completo

do perfil de velocidade, com valores acima de 2 m s^{-1} , valor máximo sugerido pela literatura em dutos forçados.

Observa-se na Figura 27 que o filtro 1 apresentou pequena variação nos valores de perda de carga para o intervalo da taxa de filtração entre 20 a $40\text{ m}^3\text{ m}^{-2}\text{ h}^{-1}$ e entre 20 a $60\text{ m}^3\text{ m}^{-2}\text{ h}^{-1}$ para os filtros 2 e 3, mostrando o potencial de utilização desses equipamentos dentro desses intervalos na realização da filtração.

A partir dos resultados obtidos nesses ensaios com os filtros vazios, pode-se afirmar que os tipos dos componentes internos contribuem diferentemente para o comportamento da variação da perda de carga em função da taxa de filtração durante o processo de filtração. As informações obtidas contribuirão para a formação do conhecimento do processo de filtração em filtros de areia, possibilitando o aperfeiçoamento dos projetos estruturais dos sistemas de drenagem e dos difusores de entrada e orientando a metodologia de fabricação desses equipamentos na busca de maiores eficiências hidráulicas na filtração de água para irrigação.

5.4.2 Avaliação da variação da perda de carga em função da granulometria da areia e altura da camada filtrante

A Figura 28 apresenta os gráficos da variação da perda de carga em função da taxa de filtração e do número de Reynolds para os três filtros ensaiados nas diferentes condições de experimentais. Esses gráficos foram produzidos a partir dos valores médios de perda de carga para diferentes cargas hidráulicas, granulometria e altura de camada filtrante, cujos dados experimentais estão apresentados nas Tabelas 31, 32 e 33, ANEXO IV, durante o processo de filtração com água limpa. Os nove gráficos apresentados na Figura 28, estão dispostos em linhas e colunas, onde as linhas representam os modelos de filtros ensaiados e as colunas as granulometrias testadas.

Analisando a Figura 28, observa-se que os três modelos de filtros apresentaram comportamentos semelhantes, ou seja, aumento da perda de carga com o incremento de taxa de filtração e do número de Reynolds, e também com o aumento da altura da camada filtrante, cujas curvas acompanharam a tendência do padrão de crescimento da curva do filtro vazio. Confirmando, assim, o efeito das componentes estruturais internos de cada filtro no processo de perda de carga, sendo que o filtro 1, caracterizou-se por possuir maiores valores de perda de carga em relação aos mesmos valores de taxa de filtração quando aplicados nos filtros 2 e 3.

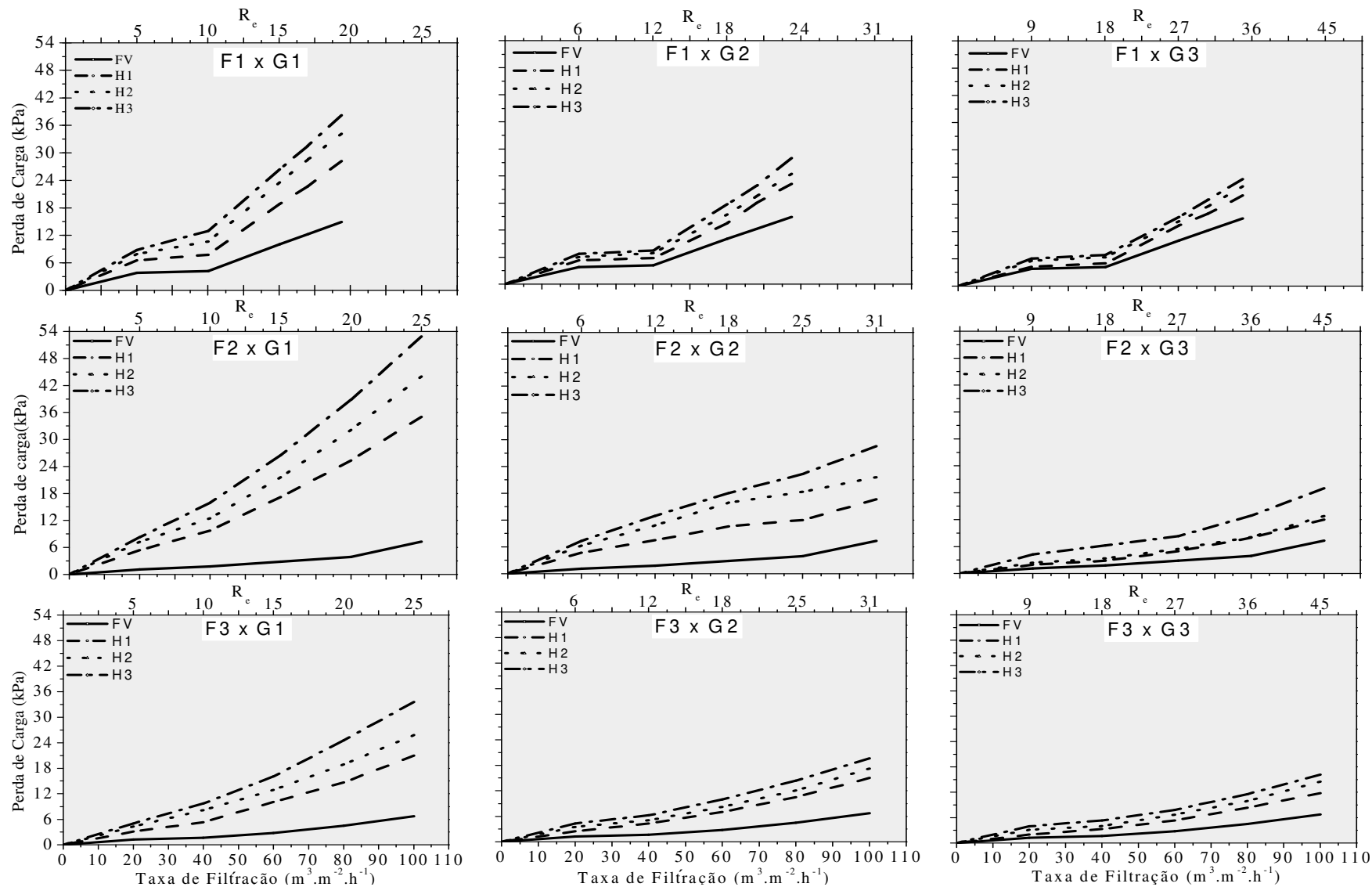


Figura 28: Curvas da variação da perda de carga em função da taxa de filtração para os três modelos de filtros nas diferentes condições de ensaio.

Para os intervalos de taxa de filtração 20 a 40 $\text{m}^3.\text{m}^{-2}.\text{h}^{-1}$, para o filtro 1, e 20 a 60 $\text{m}^3.\text{m}^{-2}.\text{h}^{-1}$ para os filtros 2 e 3, as curvas apresentaram tendências à linearidade, e para valores superiores de taxa de filtração mostraram comportamentos de não-linearidade (exponencial), comportamento identificado por FOCHHEIRMER (1901) e posteriormente revisado por TRUSSEL E CHANG (1999). A caracterização do escoamento pelo número de Reynolds permite identificar esses comportamentos de não-linearidade. Assim, nota-se que para a granulometria G1 (0,5 a 1,0 mm) apresenta-se mais susceptível ao aumento do número de Reynolds, com a zona linear variando entre os valores 5 a 10, com alterações significativas de perda de carga após essa faixa.

Dessa forma, analisando os intervalos do número de Reynolds encontrados para todas as condições experimentais nos três filtros avaliados, pode-se considerar que o regime de escoamento do fluido nessas condições foi inercial, segundo o critério proposto por TRUSSEL & CHANG (1999), ou seja, para o intervalo de $0,5 \leq R_e \leq 50$. Nesse caso existe a predominância de fluxo rigorosamente constante (laminar), porém, progressivamente influenciado por forças inerciais causadas pela turbulência do fluido, observando na superfície superior do leito um regime de fluxo estacionário formando vórtices entre os grãos de areia.

Para valores de taxa de filtração de 60 $\text{m}^3.\text{m}^{-2}.\text{h}^{-1}$, limite máximo recomendado pela literatura, o filtro 1 apresentou valores de perda de carga aproximadamente 240% maiores que o filtro 2 e 3 na condição de vazio. Porém, quando avaliado o efeito da camada filtrante, essa diferença se tornou praticamente nula em relação ao filtro 2, para todas as alturas de camada e para as granulometrias G1 e G2. No entanto, para a granulometria G3 do filtro 2 e para os valores de granulometria e de altura filtrante do filtro 3, os valores de perda de carga do filtro 1 permaneceram em torno de 60% maiores. Esse comportamento pode ser justificado pelo excessivo movimento do leito filtrante durante o ensaio para os filtros 2 e 3 elevando a perda de pressão para esses filtros.

Esse fenômeno, que está assinalado na Figura 29, ocorreu em todos os ensaios, para todas as granulometrias e alturas ensaiadas dos filtros 2 e 3, criando-se uma superfície deformada, com cumes elevados na região central do leito filtrante e depressões próximas as paredes do filtro. Importante salientar que esse fenômeno foi intensificado para cargas hidráulicas superiores a 60 $\text{m}^3.\text{m}^{-2}.\text{h}^{-1}$. BURT (1994) explica este fenômeno como sendo resultado de projetos inadequados de difusores que não distribuem o afluente de forma

uniforme na superfície filtrante, e a operação deficiente desse elemento para altas taxas de filtração, principalmente acima de $61 \text{ m}^3\text{h}^{-1}\text{m}^2$, criando zonas de turbulência próximas as paredes do filtro.



Figura 29: Fotos realçando o fenômeno da movimentação da superfície de filtração para os filtros 2 e 3.

Importante lembrar, que esse fenômeno também foi verificado nas visitas às propriedades, quando aplicada a metodologia de avaliação do desempenho dos filtros. A superfície irregular da camada de areia cria caminhos preferências para a filtração, podendo a partir desses, obter efluentes de pior qualidade e determinar carreiras menores de filtração para granulometrias menores, e exigindo uma frequência maior de retrolavagem para funcionamento em mesmas condições.

Observando o comportamento hidráulico dos três filtros para as diferentes granulometrias, pode-se afirmar que a variação da perda de carga é inversamente proporcional ao diâmetro efetivo das areias utilizadas. Esse comportamento é semelhante ao encontrado por CHANG et al. (1999) que avaliaram em laboratório a perda de carga de filtros pilotos limpos, utilizando areias com diâmetros efetivos de 0,47, 1,08 e 1,5 mm. Estes autores afirmaram que a teoria clássica de escoamento em meio poroso sugere que a perda de carga deve aumentar com o inverso do quadrado do diâmetro do grão de areia, e que, por essa razão a perda de carga em grãos de menor diâmetro pode ser até nove vezes maiores que em grãos de maior diâmetro. Dessa forma, as maiores variações encontradas neste trabalho foram de aproximadamente cinco e sete vezes para a mudança da granulometria G1 para G3, no filtro 2, sendo que para os filtros 1 e 3 as variações encontradas ficaram entre duas e três vezes maiores para G1 e G3, nas diferentes alturas ensaiadas, analisando na taxa de filtração de $60 \text{ m}^3.\text{m}^{-2}\text{h}^{-1}$.

Salienta-se que na magnitude da variação de perda de carga em função do aumento do diâmetro efetivo também está incluído o efeito da mudança dos valores de porosidade com a troca da granulometria da areia. Nesse estudo, a areia de menor granulometria (G1) possuía a

maior porosidade (43%) enquanto as areias com granulometrias G2 e G3 apresentavam valores iguais a 42 a 41%, respectivamente. Entretanto, a porosidade real da camada filtrante, determinada pelo grau de compactação, consequência da taxa de filtração e da pressão de serviço do filtro, não foi determinada nesse estudo, não sendo possível separar a contribuição desse parâmetro no processo de perda de carga. Estudos posteriores poderão ser realizados para avaliar o efeito da mudança do valor da porosidade para uma mesma granulometria de areia na determinação da perda de carga, buscando conhecer esse comportamento.

Verificou-se também nesses ensaios que a elevação da perda de carga nos filtros de areia é diretamente proporcional à altura da camada filtrante. Esse efeito é minimizado com o aumento da granulometria, pois as curvas de perda de carga para os filtros ensaiados ficaram mais próximas para os intervalos granulométricos G2 e G3 quando comparado com G1, mostrando valores pouco superiores para os ensaios com alturas maiores em relação às menores. MATSURA et al. (1989) ao avaliarem um filtro de areia com 66cm de diâmetro por 72cm de altura, utilizando a areia com D10 de 0,55mm e CU igual 1,45, e as alturas de 40,5 cm, 28,5 cm e 19,0 cm, encontraram pequenas variações de perda de carga com o aumento da altura do leito filtrante. Entretanto, observa-se que para G3 não houve praticamente variação dos valores de perda de carga com a variação da altura, exceto para F2 x G3, que apresentou uma pequena variação em relação a H2 e H3. Esse comportamento pode ser justificado pela susceptibilidade dos grãos de menores diâmetros à elevação da turbulência caracterizada pelo aumento do número de Reynolds. Conseqüentemente, com o aumento da camada estes grãos ficam mais expostos à ação da turbulência provocada pela variação da velocidade superficial do fluido com o leito filtrante.

Dessa forma pode se afirmar que o tempo de duração de uma carreira de filtração é inversamente proporcional ao diâmetro efetivo da areia que compõe a camada filtrante, definindo maiores frequências de retrolavagem do leito e, conseqüentemente, diminuindo o tempo efetivo de filtragem dos filtros. Assim, pode-se afirmar que a granulometria G2, para todos os filtros avaliados se mostrou a mais indicada hidraulicamente para utilização em filtros de areia de irrigação, pois apresentou menor perda de carga em relação à granulometria G1 e pequena elevação comparada a G3, podendo proporcionar um efluente de melhor qualidade do que a granulometria mais grosseira. Por outro lado, a altura mais indicada para os filtros foi H2 (relação H/h igual a 58%), pois, apresentou pequenas variações de perda de carga em

ralação a H1, para G2 e G3, e por disponibilizar maior altura livre no interior do filtro para proceder a retrolavagem quando comparada com a altura H1.

Ao analisar as curvas características de perda de carga obtidas nas condições de ensaio do experimento, pode-se confirmar que a taxa de filtração máxima indicada para a filtragem nesses filtros é de $60 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^2$, pois a partir desse valor ocorre um aumento exponencial da perda de carga com intensificação da movimentação da superfície do leito filtrante. Esse valor está de acordo com os limites propostos por PIZARRO CABELO (1996), BENHAM & ROSS (2002) e PHILLIPS (1995). Os valores máximos de perda de carga encontrados ficaram próximos de 20 kPa para as maiores alturas de camada ensaiada, exceto para o filtro 1 e 2 em G1 que apresentaram 24 e 27 kPa, respectivamente, concordado com os valores máximos sugeridos por PIZARRO CABELO (1996) e PHILLIPS (1995), de 20 kPa para filtros limpos.

5.5 Modelagem matemática do comportamento hidráulico de filtros de areias

5.5.1 Efeito da estrutura hidráulica na perda de carga

Os dados experimentais de perda de carga em função da vazão para os filtros ensaiados sem camada filtrante foram ajustados matematicamente aos modelos alométrico linear e exponencial, buscando assim, o modelo que melhor explicasse o fenômeno físico do comportamento dos difusores e drenos no processo hidráulico de filtragem dos filtros de areia ensaiados.

Os resultados das análises mostraram que o modelo exponencial foi o que apresentou melhor ajuste ao comportamento hidráulico, físico, dos filtros de areia (ANEXO V). Pôde-se observar, pela análise de variância, apresentada nas Tabelas de 34 a 39, que a função exponencial explicou, significativamente, o comportamento hidráulico dos elementos estruturais dos filtros de areia durante o processo de filtragem, obtendo as seguintes Equações ajustadas, Tabela 21.

Tabela 21: Equação de perda de carga em função da vazão ($\text{m}^3 \text{ h}^{-1}$) para os três filtros de areia avaliados.

Equipamento	Equação de Perda de Carga Unitária	R^2
filtro 1	$H_f = 1,955 \cdot e^{0,059 \cdot Q}$	0,912
filtro2	$H_f = 0,688 \cdot e^{0,183 \cdot Q}$	0,991
filtro 3	$H_f = 0,736 \cdot e^{0,113 \cdot Q}$	0,989

Obs: H_f : perda de carga (kPa);

Observa-se que os coeficientes de determinação das equações mostraram-se acima de 90%, com nível de significação de 1% para todos os ajustes realizados. Portanto, é possível afirmar que o modelo matemático proposto representa, significativamente, o comportamento físico dos filtros de areia avaliados, para condição sem o elemento filtrante. Porém, é importante ressaltar que para vazões zero a equação assumida apresenta um valor positivo de perda de carga, mas próximo de zero, o que fisicamente seria impossível, permitindo um pequeno erro neste ajuste, o que não o descaracteriza como aceitável para explicar este fenômeno.

As Figuras 30, 31 e 32, mostram as curvas exponenciais ajustadas para os filtros de areia ensaiados com os respectivos valores experimentais.

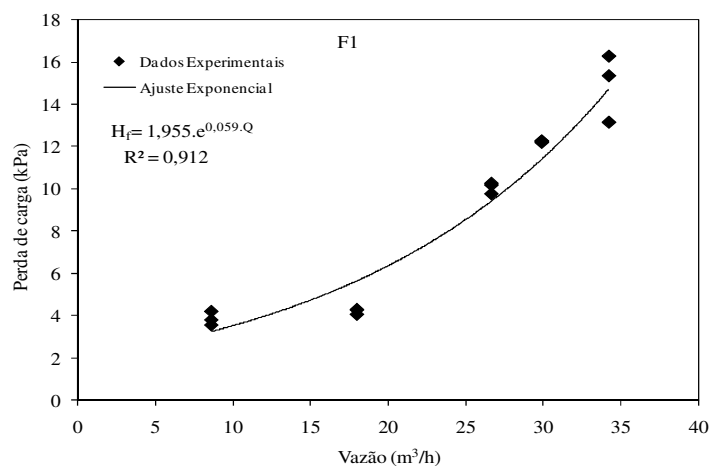


Figura 30: Curva característica de perda de carga em função da vazão para o filtro 1 sem camada filtrante.

Pela Figura 30, correspondente ao Filtro 1, pode se observar que o menor valor de determinação é causado pela maior variabilidade dos dados, principalmente para o intervalo de 10 a 20 m³h⁻¹, resultante do comportamento específico deste filtro, por possuir sistema de difusão e de drenagem totalmente diferentes dos demais filtros avaliados.

As figuras 30, 31 e 32 mostram que a maior variabilidade dos dados experimentais de perda de carga ocorre para o maior valor de vazão, causada pelo aumento da turbulência do fluido no interior do filtro.

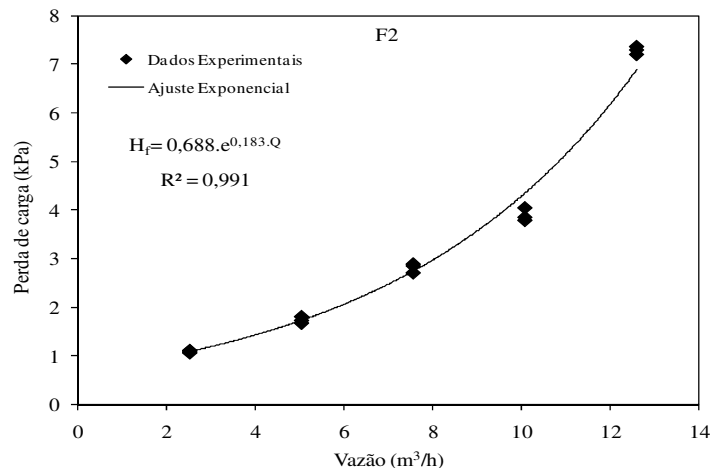


Figura 31: Curva característica de perda de carga em função da vazão para o filtro 2 sem camada filtrante.

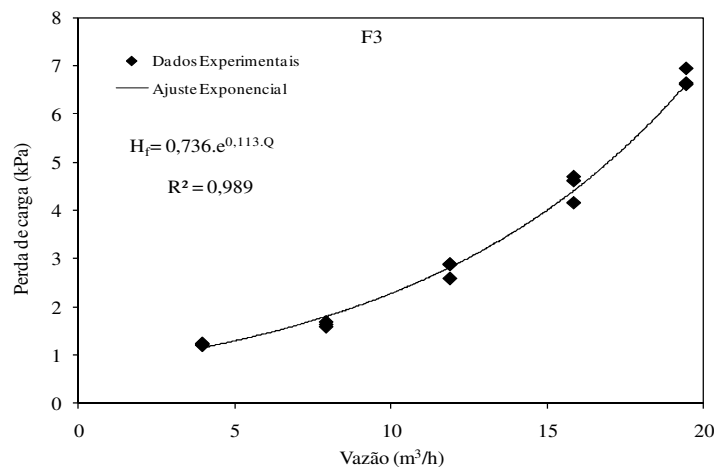


Figura 32: Curva característica de perda de carga em função da vazão para o filtro 3 sem camada filtrante.

Analisando-se as curvas ajustadas dos filtros ensaiados, percebe-se que o incremento da perda de carga por unidade de vazão do filtro 2 é superior aos demais filtros ensaiados, o que pode ser comprovado pelo valor de β_1 nas equações. Esse fato pode ser explicado pelo fato da crepina cilíndrica desse filtro ser um modelo reduzido de filtros de disco utilizados na irrigação localizada, o que exige a passagem da água filtrada pela espessura do disco, aumentando assim a turbulência na saída do elemento. Portanto, a geometria das crepinas e as dimensões dos orifícios de saída desses componentes, bem como suas dimensões, podem causar elevação na turbulência do fluido próxima aos drenos, conseqüentemente, aumentando a perda de carga da estrutura.

Os parâmetros que afetaram a variação da perda de carga para filtros de areia vazios e utilizando água limpa, além das características do fluido, foram os componentes de drenagem

e de difusores, isso porque as demais características estruturais dos filtros são semelhantes como, posição de entrada do afluente e formato do corpo cilíndrico. O comportamento desses parâmetros foi caracterizado pela equação de cada filtro, não havendo a dissociação para cada elemento em específico. O modelo deste estudo estima que a perda da carga, para diferentes filtros de areia, com uma precisão aceitável, dentro dos limites das variáveis estudadas. Dessa forma, o modelo também vai ajudar a melhorar o conhecimento do processo de filtração e de fabricação dos filtros de areia, aperfeiçoando os projetos estruturais dos sistemas de drenagem e difusores dos equipamentos nacionais, buscando-se maiores eficiências hidráulicas.

5.5.2 Efeito da camada filtrante e da granulometria na perda de carga

As Figura 33, 34 e 35, mostram a relação entre os valores de perda de carga experimentais e estimados para os três filtros ensaiados, onde são apresentadas duas sequências de valores estimados: a primeira proveniente da aplicação do modelo matemático sugerido por TRUSSEL & CHANG (1999), denominada TC, determinada a partir das condições experimentais aplicadas aos filtros ensaiados, dados granulométricos da areia e a altura da camada filtrante, e a segunda da soma dos resultados da aplicação do modelo de TC, com os valores estimados pela função exponencial determinada para a condição de filtro vazio e correspondente ao efeito da estrutura hidráulica dos filtros denominada (TC + FEx).

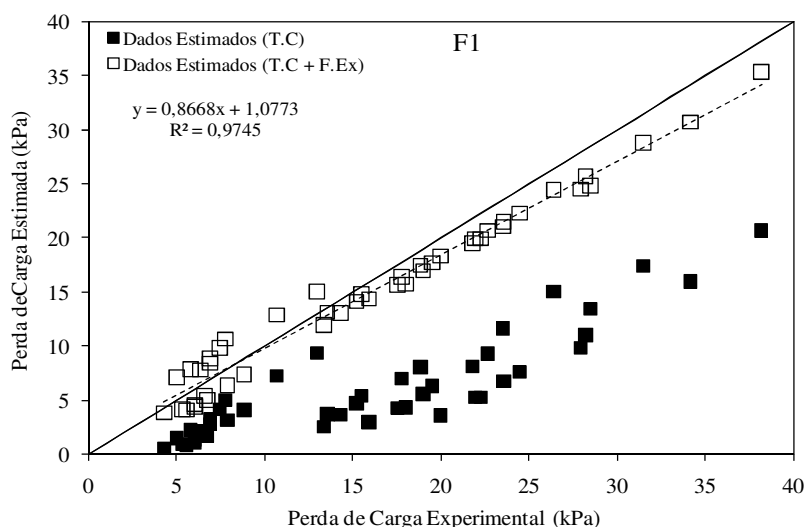


Figura 33: Comparação da perda de carga estimada e experimental para o filtro 1, utilizando o modelo de TRUSSEL & CHANG (1999) e o modelo combinado que considera o efeito das características hidráulicas do filtro.

Na Figura 33 é possível verificar que os valores estimados somente pelo modelo TC subestimam os valores experimentais, apresentando erros quando comparados aos valores encontrados nos experimentos. Entretanto, para os valores estimados pelo modelo combinado (TC + FEx) houve uma redução dos erros entre estimados e experimentais, ficando estes próximos aos valores encontrados nesse trabalho.

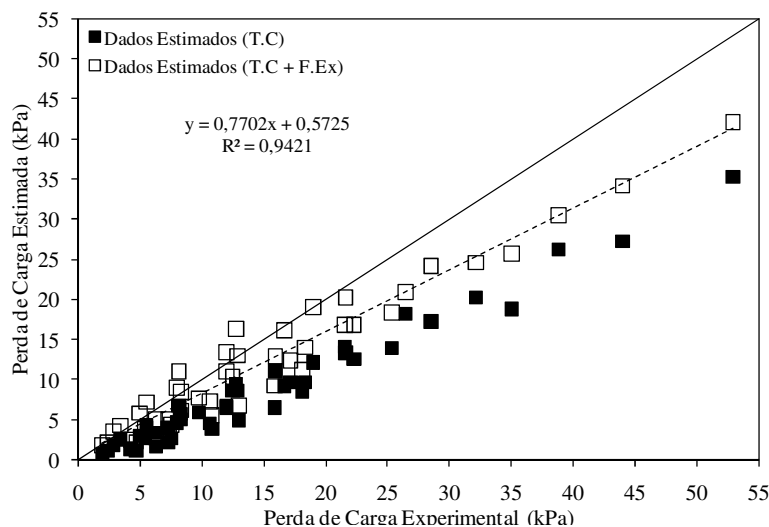


Figura 34: Comparação da perda de carga estimada e experimental para o filtro 2, utilizando o modelo de TRUSSEL & CHANG (1999) e o modelo combinado que considera o efeito das características hidráulicas do filtro.

Avaliando a Figura 34, observa-se que os dados estimados pelo modelo TC subestimou valores de perda de carga e o modelo combinado TC+FEx apresentou valores próximos aos valores experimentais durante os ensaios. Entretanto, os valores estimados pelo método combinado apresentaram uma variação em relação à TC, justificado pelo fato de que este filtro durante os experimento apresentou-se susceptível a granulometria G1, isto é, apresentou maiores valores de perda de carga para cada incremento de taxa de filtração. Assim, o modelo matemático proposto por TRUSSEL & CHANG (1999) e o método combinado proposto nesse trabalho, não explicaram significativamente a variabilidade dos valores de perda de carga para esta granulometria, caracterizando um comportamento específico para o filtro 2.

O gráfico apresentado na Figura 35 demonstra que os valores calculados pelo modelo TC subestimou os valores experimentais, apesar de apresentar um menor desvio, principalmente para os menores valores de perda de carga. Entretanto, o modelo combinado TC+FEx, apresentou valores estimados próximos aos valores experimentais encontrados

durante os ensaios. Pode-se observar ainda que a contribuição da estrutura hidráulica para este filtro foi menor quando comparada aos outros dois modelos e de suma importância para o entendimento do comportamento hidráulico do filtro.

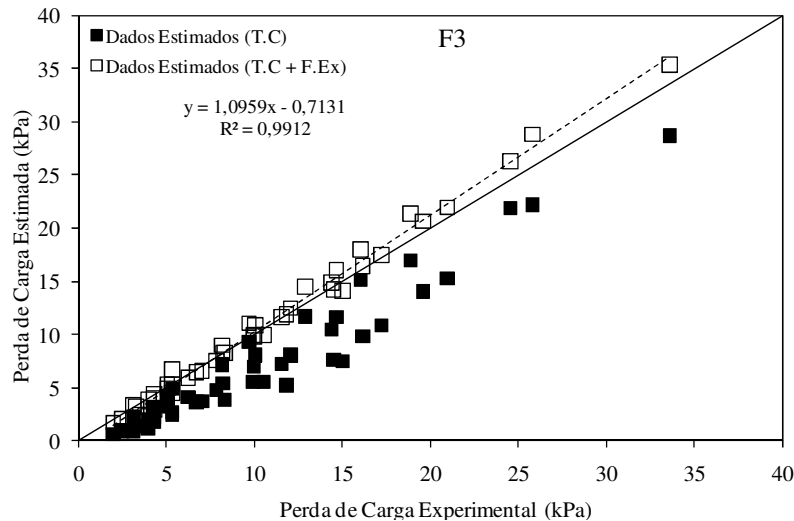


Figura 35: Comparação da perda de carga estimada e experimental para o filtro 3, utilizando o modelo de TRUSSEL & CHANG (1999) e o modelo combinado que considera o efeito das características hidráulicas do filtro.

Dessa forma, ao analisar o comportamento da perda de carga estimada somente pelo modelo proposto por TRUSSEL & CHANG (1999), observou-se que a sua aplicação gerou valores subestimados da perda de carga experimental para os três filtros avaliados. Esse comportamento pode ser explicado pelo fato deste modelo ter sido proposto para determinação do comportamento hidráulico apresentado na camada filtrante sob interação das características físicas do material filtrante e do escoamento do fluido nessa camada na condição de filtros pilotos experimentais, que não possuíam estruturas hidráulicas idênticas aos filtros comercializados. Porém, ao adicionar o ajuste exponencial característico de cada filtro, notou que os valores estimados pelo modelo combinado apresentaram erros menores, ficando mais próximos dos dados experimentais e demonstrando que a melhor representação do comportamento hidráulico durante o processo de filtragem para filtros limpos, pode ser obtida pela Equação 23:

$$Hf_T(filtro) = Hf_{vazio} + \Delta H \quad (23)$$

Ou seja, a perda de carga do filtro de areia utilizando água limpa pode ser dividida em duas componentes:

- Efeito da estrutura interna do filtro, determinado pela combinação do tipo de difusor e de dreno utilizado;
- Efeito das características da camada filtrante e do fluido: diâmetro efetivo, porosidade, esfericidade, viscosidade e densidade da água.

Substituindo na Equação 23 os modelos matemáticos correspondentes a cada uma dessas componentes, tem-se a Equação 24.

$$H_f = (\beta_0 \cdot e^{Q \cdot \beta_1}) + [\Delta L \cdot (\alpha_F V + \beta_F V^2)] \quad (24)$$

Sendo:

H_f = perda de carga total dos filtros de areia (L);

β_0 e β_1 = parâmetros ajustados da equação;

Q = vazão ($L^3 \cdot T^{-1}$);

ΔL = altura da camada filtrante (L);

V = velocidade superficial ($L \cdot T^{-1}$);

α_F = coeficiente de permeabilidade associado à componente linear da perda de carga;

β_F = coeficiente de permeabilidade associado à componente não linear da perda de carga.

Analisando as regressões lineares entre os valores estimados pelo modelo combinado e os valores experimentais, disponibilizadas nas Figuras 33, 34 e 35, com os respectivos valores dos coeficientes de determinação, cujas tabelas de análises de variância estão disponíveis na Tabela 40, (ANEXO V), observa-se que os filtros 1 e 3 apresentaram valores de coeficiente angular próximos de 1 e lineares próximos do valor zero. Esse fato comprova que o modelo combinado explica o comportamento hidráulico dos filtros a um nível de significância de 1% comprovando a sua validade. Por outro lado, o filtro 2 não apresenta esse mesmo comportamento devido aos fatores já explicados anteriormente.

A simulação matemática para caracterização do comportamento hidráulico utilizando o modelo proposto nesse trabalho, mostrou-se adequado para determinar a perda de carga para filtros de areia limpo, permitindo ser uma ferramenta essencial para o dimensionamento correto da contribuição desses equipamentos na estimativa da altura manométrica total do sistema de irrigação.

6 CONCLUSÕES

Considerando os resultados obtidos nessa pesquisa pode-se concluir que:

- Os filtros comercializados no Brasil apresentam diferenças com relação aos seus componentes internos, como difusores de entrada e drenos, assim como, as informações e recomendações de projeto como vazão nominal, taxa de filtração e pressão máxima de serviço e orientações quanto ao tipo e características da areia a ser utilizada como material filtrante;
- Os produtores rurais visitados mostraram pouco conhecimento sobre filtros de areia, principalmente, como proceder à operação de filtração e retrolavagem.
- As areias selecionadas para os ensaios apresentaram valores dos parâmetros físicos dentro dos limites aceitáveis definidos pela literatura para utilização em filtros empregados na irrigação localizada.
- Para a condição de filtros vazios, os componentes internos do filtro 1 determinaram valores de perda de carga maiores que os filtros 2 e 3, que apresentaram comportamentos idênticos. Os componentes, difusor e drenos, em conjunto com cargas hidráulicas acima de $60 \text{ m}^3.\text{m}^{-2}.\text{h}^{-1}$, alteraram a superfície do leito filtrante para os filtros ensaiados.
- O valor da taxa de filtração máxima recomendada para a filtração utilizando as três granulometrias e alturas da camada ensaiadas foi $60 \text{ m}^3.\text{m}^{-2}.\text{h}^{-1}$ e a mínima de $20 \text{ m}^3.\text{m}^{-2}.\text{h}^{-1}$, usando água limpa.
- A perda de carga para os três filtros avaliados utilizando água limpa se mostrou diretamente proporcional ao aumento da taxa de filtração e ao incremento da altura do leito filtrante e inversamente proporcional ao aumento da granulometria.
- O modelo matemático composto obtido: $Hf = (\beta_0.e^{Q.\beta_1}) + [\Delta L.(\alpha_F V + \beta_F V^2)]$, representou bem o comportamento de perda de carga dos filtros de areia em função da vazão de filtração.

7 RECOMENDAÇÕES

O desenvolvimento dessa pesquisa permitiu uma série de reflexões que, são sugeridas para uso em outros trabalhos, como:

- Desenvolver e propor norma de classificação e comercialização do material filtrante para filtros de areia apresentando; intervalos granulométricos específicos para concentrações de impureza encontrada na água, identificando os ensaios que devem ser realizados no material (diâmetro efetivo, coeficiente de uniformidade, friabilidade, entre outros) e os limites aceitáveis para a filtração;
- Deve ser realizada a reavaliação dos filtros nas mesmas condições ensaiados neste trabalho, utilizando água com impurezas, ou seja, nas condições encontradas nas propriedades agrícolas. Esse procedimento deve avaliar os principais fatores de projeto, granulometria, altura da camada filtrante e taxa de filtração, sobre o processo de filtração e retrolavagem em filtros de areia objetivando determinar a eficiência de remoção de partículas para diferentes tipos de filtros comerciais;
- Desenvolver estudos de melhoria nos filtros de areia, visando estudar e projetar diferentes tipos de difusores e sistemas de drenagem e avaliar seu comportamento durante o processo de filtração e retrolavagem;
- Projetar um modelo de filtro de areia com características hidráulicas que atenda os padrões específicos das águas brasileiras e possibilitar a otimização o seu comportamento, tanto para a filtração como para a retrolavagem e adequando o seu uso pelos produtores rurais;
- Definir limites operacionais dos equipamentos em campo, identificando vazão e tempo máximo e mínimo de funcionamento para a filtração e retrolavagem que garanta maiores eficiências de ambos os processos concordando com as dimensões dos equipamentos utilizados.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADIN, A; ALON, G. Mechanisms and process parameters of filter screens. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, 112 (4), p. 293–304, 1986.

ADIN, A.; SACKS, M. Dripper clogging factors in wastewater irrigation. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.117, n.6, p. 813-826, 1991.

ADIN, A.; ELIMELECH, M. Particle filtration for wastewater irrigation. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.115, n.3, p. 474-487, 1989.

AIROLDI, R. P. da S. Eficiência dos meios filtrantes disco e manta sintética não tecida em fertirrigação por gotejamento. 2003. 204f. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP.

ALVES, E. N. B. Remoção de ferro em águas de irrigação através de filtração em areia e zeólita. 2008. 129f. **Tese** (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Lavras, Lavras-MG.

AMANCO BRASIL. Soluções Agrícolas; Disponível em <http://www.amanco.com.br/catalogovirtual/_media/cp3.pdf>. Acesso em Novembro/2009.

AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION. **Water quality and treatment: Handbook of community water supplies**. 5. ed. USA: McGraw Hill Inc., 1999.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS (ASTM). Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate. C128 -07a, 2007.

AMIAD. Filtration systems. Disponível em <http://www.amiad.com/filters/sandMediaFilters_2.asp>. Acesso em Novembro/2009.

ARKAL. Filtration systems. Disponível em <http://www.arkal-filters.com/pro_media.html>. Acesso em Novembro/2009.

ASABE American society Agricultural and Biological Engineers ANSI/ASAE S539 **Media Filters for Irrigation—Testing and Performance Reporting** March 1994 (R2008)

ASAE STANDARDS. Design and installation of microirrigation systems. ASAE EP405.1 (DEC92). **American Society of Agricultural Engineers**. St. Joseph, MI. 1993.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. EB 2097: **Material Filtrante: Areia, antracito e pedregulho – Especificação**. 1990.

AYERS, R.S.; WESTCOT, D.W. A qualidade de água na agricultura. **Trad. H.R. Gheyi, J. F. de Medeiros, FAV Damasceno**. Campina Grande: UFPB, 1991. 218p. (Estudos FAO 29. 1985).

BASTOS, R.K.X. Fertirrigação com águas residuárias. In : FOLEGATTI, M. V. (Coord.) **Fertirrigação: citrus, flores, hortaliças**. Guaíba: Agropecuária, p. 279-291. 1999.

BENHAM, B.; ROSS, B. **Filtration, Treatment, and Maintenance**: Considerations for Micro-Irrigation Systems. Virginia Cooperative Extension. 2002 (PUBLICATION 442-757).

BERNARDO, S; SOARES, A.A.; MANTOVANI, E.C. **Manual de irrigação**. 8.ed. Viçosa: Imprensa Universitária, UFV, 2006. 625p.

BRANDÃO, C. C. S.; AMARAL, S. F.; ARANTES, C.; MELO, A. E. S.; MATOS, J. G. S.; MEDEIROS, C. A. T. S. **Filtração direta ascendente em pedregulho seguida da filtração rápida aplicada à remoção de algas**: otimização de taxas de filtração e granulometrias dos filtros de pedregulho, FINEP, Brasil, 2001.

BURT, C. M. Media Tanks for Filtration Part I: Tank Sizing and Media Selection. **Irrigation Journal**, p. 15 - 17, 1994.

CAIXETA, A.V. Perda de carga em tubos e conexões de PVC utilizados em sistemas portáteis de irrigação localizada. 1991. 115p. **Dissertação** (Mestrado em Irrigação e Drenagem) Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1991.

CAPRA, A.; SCICOLONE, B. Emitter and filter tests for wastewater reuse by drip irrigation. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 68, p. 135 – 149, 2004.

CHANG, M., TRUSSELL, R., GUZMAN, V., MARTINEZ, J., DELANEY, C., Laboratory studies on the cleanbed headloss of filter media. **Aqua**, 49. 1999.

CLEASBY, J.L.;FAN, K.S.; **Predicting Fluidization and Expansion of the Filter Media**. In: **J. Environ. Eng. Div. ASCE**, 1981. Vol. 107 (EE3), Junho, p. 455.

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.

CLEASBY, J.L.; WOODS, C. F. Intermixing of dual media and multimedia granular filters. **JWWA**, v.67, n. 4, p.197, Apr. 1975.

CARMAN, P. Fluid flow through granular beds. **Trans. Inst. Of Chemical Eng.**, v. 15, p. 150. 1937.

COOKE, A.J., ROWE, R.K., Extension of porosity and surface area models for uniform porous media. **Journal of the Environmental Engineering**, p. 126-136. 1999.

DASBERG, S.; BRESSLER, E. Drip Irrigation Manual. **Bet Dagan: International Irrigation Information Center**. p. 95. 1985

DEHGHANISANIJ H., YAMAMOTO T., RASIAH V., UTSUNOMIYA J., INOUE M. Impact of biological clogging agents on filter and emitter discharge characteristics of microirrigation system. **Irrigation and Drainage** . V. 53, p.363–373, 2004.

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

DHARMARAJAH, A.H., CLEASBY J.L., Predicting the expansion behavior of filter media. **Journal AWWA**, p. 66-76. 1986.

ERGUN, S. Fluid flow through packed columns. **Chem. Eng. Prog.** V. 43, p. 89-94. 1952.

FAIR, G.M.; GEYER, J.C.; OKUN, D.A., **Water and Wastewater Engineering**. John Willey & Sons, Inc. New York. 1968.

FORCHHEIMER, P. Wasserbewegung durch boden. **Forschtlft ver. D. Ing.**, v. 45, p. 1782 – 1788 (in German). 1901.

GIL, J. A.; KHAN P. L.; H. A. Arenas de río procesadas como filtros de riegos localizados. **Agronomía Trop.**, v.52, n.4, p.463-483. oct. 2002

GILBERT, R.G.; FORD, H.W. Operational principles. In: NAKAYAMA, F.S.; BUCKS, D.A. **Trickle irrigation for crop production: design, operation and management**. Amsterdam: Elsevier, 1986. chap. 3, p. 148-163.

GUPTA, C. K.; SATHIYAMOORTHY. D.; **Fluid bed technology in materials processing** New York: Library of congress. 1999. Cap 1, p. 1-125.

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.

HERNANDEZ, F. B. T. **Anais do Curso Capacitação em Agricultura Irrigada**. Ilha Solteira: UNESP/FEIS. 1999, 55p.

HIDRO SOLO INDÚSTRIA E COMÉRCIO Ltda - **Tratamento de Água e Irrigação**. Disponível em <<http://www.pluvitec.com.br/pdfs/SistemasFiltracao.pdf>>. Acesso em Novembro/2009.

HUMBY, M. S.; FITZPATRICK, C. S. B; STEVENSON, D.G. **Development of a friability test for granular filter media**. J.CIWEM, 5p. 1996.

IVES, K. J. Specifications for granular filter media. **Effl. & Wat. Treat. J.**, 1975, 15, (6), 296-305.

KELLER, J.; BLIESNER, R.D. **Sprinkle and trickle irrigation**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1990. 652p.

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.

LÓPEZ, T. M. **Riego localizado: diseño de instalaciones**. 2 ed. Vicente J. Montesinos. Valencia. 2007. p.255.

LÓPEZ, J.R. ABREU, J.M.; REGALO, A.P.; HERNANDEZ, J.F.G. **Riego localizado**. 2 ed. Madri: Mundi Prensa, 1992. 405p.

MARBELA DO BRASIL. Irrigação e tratamento de água. Disponível em <<http://www.marbella.com.br/v2.0/html/irrigacao/filtro-de-areia.html>> Acesso em Novembro/2009.

MATSURA, E.E.; TESTEZLAF, R.; ALMEIDA NETO, J. A. Perda de carga nos filtros de areia e tela do sistema de irrigação por gotejamento. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola 18, 1989.Recife, **Anais ...Vol. II**. SBEA. 1989.584-607

MESQUITA, M.; FREITAS, A.; TESTEZLAF, R.; RAMIREZ, J. C. S. Análise operacional em campo de filtros de areia utilizados na irrigação localizada na macro-região de Campinas, SP. In: XXXVIII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 2009, Juazeiro, BA/Petrolina, PE. **Anais...**: SBEA. 2009. v. 1. p. 1-4

MONTEIRO. G.V., **Instrumentação Industrial. Edição eletrônica**. FXS, Gestão de Marketing, Lda. Lisboa, Portugal. 2005. p. 770.

NAKAYAMA, F. S.; BUCKS, D.A. **Trickle Irrigation for Crop Production: design, operation and management**. Elsevier Science Publishers. 1986, p.383.

NIVEN, R. K., Physical insight into the Ergun and Wen & Yu equations for fluid flow in packed and fluidised beds. **Chemical Engineering Science**, V.57, n. 3, 2002, p 527-534.

ODIS. Irrigation rquipamt LTD. Disponível em <<http://www.odis.co.il/4000.html>> Acesso em Novembro/2009.

OLIVEIRA, C. F. Perda de carga em filtros de tela e de discos utilizados na irrigação localizada. **Dissertação** (Mestrado em Agronomia) Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

OLIVEIRA, C. F.; FRIZZONE, J. A.; NETO, O. R. Recomendação de Equações para Determinação da Perda de Carga em Filtros de Tela. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**. v.1, n.1, p. 3–8, 2007.

PHILLIPS, K.P. Long-term operation of microirrigation filtration systems: successes, failures and operational solutions. In: **International Microirrigation Congress, 15.**, Orlando, 1995. Microirrigation for a changing World: Conserving resources/preserving the environment. Orlando: ASAE. 1995. p. 579-585.

PHILLIPS, K.P. Filtration's role in water quality: Polishing water for low volume irrigation. **Irrigation Journal**, Orlando.v.43, n.4, p.8-12, 1993.

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

POVOA, A.F.; HILLS, D.J. Sensitivity of microirrigation system pressure to emitter plugging and lateral line perforations. **Transactions of the ASAE**, v.37, n.3, p.793-799, 1994.

PUIG-BARGUÉS J., RAMÍREZ DE CARTAGENA F., BARRAGÁN J. Development of equations for calculating the head loss in effluent filtration in microirrigation systems using dimensional analysis. **Biosystems Engineering**. v. 92, n.3, p. 383-390. 2005

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

RAZUMOW, J.M., 1975. Fluidisation and pneumatic transport of loose materials. **InŜynieria Chemiczna**, WNT, Warszawa [in Polish].

RICHTER, A. C.; AZEVEDO, J. M. N. **Tratamento de água tecnologia atualizada**. Ed. Blucher. SP. 332p. 1993.

ROMAN, B. Tackling emitter clogging problems. **Irrigation Journal**, Berlin, v. 49, n. 4, p. 8, 1999.

RUMPF, H., GUPTE, A.; Einsflusse der porositat und korngroBenverteilung in Widerstandsgesetz der porenstromun. **Chemie Ingenieur Technik**, v.43, p.367 – 375 (in German). 1971.

SCALOPPI, E.J. Características dos principais sistemas de irrigação. **ITEM – Irrigação e Tecnologia Moderna**, n.25, p.22-27, 1986.

SCHEIDEGGER, A.E., **The physics of flow through porous media**. Univeristy Toronto Press. 1960.

SIDIROPOULOU, M. G., KONSTADINOS, N. M., VASSILIOS, A. T. Determination of Forchheimer equation coefficients *a* and *b*. **Hydrological Precesses**. V.21, n.4, p.534-554, 2006.

SILVA, L.G, F, MANTOVANI,E.C., RAMOS, M.M. Irrigação Localizada. In: MIRANDA, J. H. & PIRES, R.C.M.. **Irrigação: Série Engenharia Agrícola**. Vol 2. Piracicaba, FUNEP, 2003. Cap. 12. p.259-309.

SILVA, L.B. Utilização de mantas sintéticas não tecidas na filtração sob pressão. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade de Campinas, 1996.

SIWIEC, T. The sphericity of grains of filtration beds applied for water treatment on examples of selected minerals. **Electronic Journal of Polish Agricultural Universities**. Vol. 10, n. 1, p. 20. 2007.

SMAJSTRLA, A.G. Causes and prevention of emitter clogging in microirrigation systems. **Irrigation Journal**. p.14-17, Apr. 1995.

SUGUIO, K. **Introdução à sedimentologia**. São Paulo: Edgar Blucher, 1973. p.318.

TESTEZLAF, R.; RAMOS, J. P. S. Sistemas automatizados para determinação de perda de carga em filtros de tela e disco usados na irrigação localizada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília. v.30, p.1079-1088, 1995.

TESTEZLAF, R.; MATSURA, E. E. Efeito da camada filtrante na perda de carga de filtros de areia. In: Congresso Nacional de Irrigação e Drenagem, 15., 2005, Teresina. **Anais...** Brasília: Associação Brasileira de Irrigação e Drenagem, 2005. v.1, p.1-6.

TESTEZLAF, R.. Técnicas de filtragem para irrigação. In: IV Simpósio de Citricultura Irrigada, 2006, Bebedouro. **CD-Rom ...Bebedouro**, SP : GTACC, 2006. p. 1-43.

TESTEZLAF, R. Filtros de areia aplicados à irrigação localizada: teoria e prática. **Eng. Agríc.** 2008, v. 28, n. 3, pp. 604-613.

TURAN, M, SABAH. E, GULSEN. H, **Influence of media characteristic on energy dissipation in filter backwashing**. In: Enviromental science & technology, v.37, n.18, p 4288-4292, 2003.

TRUSSEL, R.R.; CHANG, M. Review of flow through porous media as applied to head loss in water filters. **Journal of Environmental Engineering**. ASCE. V. 25 (11). p. 998-1006. 1999.



TRUSSEL, R.R.; CHANG, M., LANG, J., GUZMAN, V., HODGES, W.; Measurement of porosity in a full-scale water filter. **J. AWWA**. 1999

VERMEREIN, L.; JOBLING, G.A. **Localized Irrigation**. Irrigation and Drainage Paper 36. Rome, Italy: FAO. 1984. 203p.

ZIER, K. R.; HILLS, J. D. Trickle irrigation screen filter performance as affected by sand size and concentration. **Transactions of ASAE**. 1987. Vol. 30(3). p 735-739.

ANEXOS

ANEXO I: QUESTIONÁRIO E METODOLOGIA DE VISITAS EM CAMPO PARA AVALIAÇÃO DE FILTROS DE AREIA

	Universidade Estadual de Campinas Faculdade de Engenharia Agrícola Grupo de Pesquisa Tecnologia de Irrigação e Meio Ambiente	
	Avaliação de Sistemas de Filtragem	

Identificação da Propriedade	
Nome da Propriedade:	
Endereço da Propriedade:	
Nome do Proprietário:	
Nome do Responsável:	
Contato com o Responsável:	

Caracterização do sistema de irrigação	
Sistema de Irrigação: () Gotejamento () Microaspersão () Outro:	
Cultura irrigada:	
Tempo de implantação do sistema:	
Emissores: Marca:	Modelo: Vazão Nominal:
Obs:	
Conjunto Motobomba:	Modelo:
Pressão de projeto:	
Obs.:	
Fonte da água: () rio () lago () reservatório (açude) () poço	
Obs:	
Análise da água: () Não () Sim. Frequência:	
Obs:	
Problemas de entupimento: () Não () Sim Intensidade:	
Causa:	
Solução adotada:	
Troca de emissores: () Não () Sim Periodicidade da troca:	
Manejo de irrigação: frequência:	

Caracterização do sistema de filtragem	
Descrição geral:	Modelo: N° de filtros:
Pressão projeto na filtragem:	Vazão projeto na filtragem:
Pressão na retrolavagem:	Vazão da retrolavagem:
Dimensões dos filtros: Altura total:	Diâmetro:
Obs.:	
Tipo de operação dos filtros (inclui retrolavagem): () Manual () Automática	
Obs:	
Tempo de implantação do sistema:	
Orientação pela adoção do filtro de areia: () Empresa () Pesquisa () Sugestão:	
Obs:	
Orientação atual da retrolavagem: () Empresa () Assistência Técnica () Critério Pessoal () outro:	
Obs:	
Dificuldades na operação do filtro: () Não () Sim	
Quais:	
Problemas com o filtro: () Não () Sim	
Quais:	
Solicitou assistência técnica para o filtro: () Não () Sim	
Razão:	
Manutenção no filtro: () Não () Sim Razão	

Tipo de material filtrante utilizado: () Areia () Antracito () Carvão Ativado () Zeólita () Outro:
Granulometria utilizada:
Houve opções e/ou orientações durante a escolha do material filtrante? () Não () Sim. Qual:
Troca do material filtrante () Não () Sim. Periodicidade:
Usa outro sistema de tratamento de água: () Não () Sim Qual:

Caracterização do processo de retrolavagem	
Orientação atual da retrolavagem: () empresa () assistência técnica () critério pessoal () outro	
Problemas específicos com a retrolavagem: () Não () Sim	
Qual:	
Indicador utilizado para determinar o momento da retrolavagem () Tempo de filtragem () Perda de pressão () Cor da areia () Outro: _____	
Frequência de retrolavagem: () min () horas: ____ () dias: ____ () semanas: ____ () mensal: ____ () mensal: ____	
Duração da retrolavagem normal:	
Percebe perdas de areia durante a retrolavagem: () Não () Sim	
Quantifica as perdas de areia: () Não () Sim	
Qual método:	

Avaliação do sistema de filtragem	
Estado da estrutura física dos filtros de areia:	
Interna:	Externa:
Procedimento 1: Abrir tampa superior de um dos filtros com sistema de irrigação desligado	
Avaliar estado da superfície do material filtrante: () Presença de material orgânico () Presença de canais preferenciais Outros:	
Retirar amostra de areia para análise da contaminação	
Procedimento 2: Fechar filtros e ligar o sistema de irrigação	
Medir vazão total do sistema de filtragem:	
Estimar Taxa de filtração:	
Medir Pressão do sistema: Antes do filtro:	Depois do Filtro
Estimar Diferencial de Pressão no filtro antes da retrolavagem	
Coletar amostras de água para avaliação da SST:	
Na fonte:	Depois do filtro:
Estimar Eficiência de remoção antes da retrolavagem	
Procedimento 3: Realizar a retrolavagem	
Medir vazão da retrolavagem:	
Tempo de retrolavagem:	
Analisar qualidade da água da retrolavagem:	
Pressão do sistema: Antes do filtro:	Depois do Filtro
Procedimento 4: Abrir tampa superior do mesmo filtro com sistema de irrigação desligado	
Avaliar estado da superfície do material filtrante: () Presença de material orgânico () Presença de canais preferenciais Outros:	
Retirar amostras de areia para análise da contaminação e eficiência de retrolavagem	
Procedimento 5: Reiniciar a irrigação	
Medir Pressão do sistema: Antes do filtro:	Depois do Filtro
Estimar Diferencial de Pressão no filtro depois da retrolavagem	
Coletar amostras de água para avaliação da SST:	
Depois do filtro:	Linha de irrigação:
Estimar Eficiência de remoção depois da retrolavagem:	

ANEXO II: ANÁLISE GRANULOMETRICA DAS AMOSTRAS UTILIZADAS NOS EXPERIMENTOS.

Tabela 22: Dados de ensaio para determinação da curva granulometria 0,5 a 1,0 (mm)

Granulometria de 0,5 a 1,0 (mm)								
Abertura da malha (mm)	Ensaio			\bar{X}	σ	CV	% retido	% que passa
	M.r1 (g)	M.r2 (g)	M.r3 (g)					
1,40	0,00	0,05	0	0,02	0,03	1,73	0,0	100
1,19	0,05	0,04	0	0,03	0,03	0,88	0,0	100
1,00	6,37	6,15	4,14	5,55	1,23	0,22	0,6	99,4
0,85	162,73	178,47	179,57	173,59	9,42	0,05	17,4	82,1
0,71	400,09	416,61	416,14	410,95	9,41	0,02	41,1	41,0
0,60	200,78	190,87	193,3	194,98	5,17	0,03	19,5	21,5
0,50	143,35	132,47	139,28	138,37	5,50	0,0	13,8	7,7
0,42	70,03	61,09	56,08	62,40	7,07	0,11	6,2	1,4
Fundo	16,60	14,25	11,49	14,11	2,56	0,18	1,4	0,0

Tabela 23: Dados de ensaio para determinação da curva granulometria 0,8 a 1,2 (mm)

Granulometria de 0,8 a 1,2 (mm)								
Abertura da malha (mm)	Ensaio			\bar{X}	σ	CV	% retido	% que passa
	M.r1 (g)	M.r2 (g)	M.r3 (g)					
1,40	3,29	0,54	1,58	1,80	1,39	0,77	0,2	99,8
1,19	9,86	9,36	12,29	10,50	1,57	0,15	1,1	98,8
1,00	716,41	712,53	616,83	681,92	56,41	0,08	68,2	30,6
0,85	196,16	205,67	310,62	237,48	63,52	0,27	23,7	6,8
0,71	63,49	62,21	51,66	59,12	6,49	0,11	5,9	0,9
0,60	8,39	7,55	5,7	7,21	1,38	0,19	0,7	0,2
0,50	1,76	1,75	1,15	1,55	0,35	0,22	0,2	0,0
0,42	0,38	0,17	0,07	0,21	0,16	0,77	0,0	0,0
Fundo	0,26	0,22	0,1	0,19	0,08	0,43	0,0	0,0

Tabela 24: Dados de ensaio para determinação da curva granulometria 1,0 a 1,5 (mm)

Granulometria de 0,8 a 1,2 (mm)								
Abertura da malha (mm)	Ensaio			\bar{X}	σ	CV	% retido	% que passa
	M.r1 (g)	M.r2 (g)	M.r3 (g)					
2,36	0	0	0	0	0	0	0,0	100
2,00	58,37	69,43	91,6	73,13	16,92	0,23	7,3	92,7
1,70	142,15	161,7	179,92	161,26	18,89	0,12	16,1	76,6
1,40	306,95	292,91	298,45	299,44	7,07	0,02	29,9	46,6
1,19	384,27	375,87	346,22	368,79	19,99	0,05	36,9	9,7
1,00	94,12	83,57	70,51	82,73	11,83	0,14	8,3	1,5
0,85	8,66	7,85	5,76	7,42	1,50	0,20	0,7	0,7
0,71	1,61	3,57	2,71	2,63	0,98	0,37	0,3	0,5
0,60	1,1	1,71	1,57	1,46	0,32	0,22	0,1	0,3
Fundo	2,77	3,39	3,26	3,14	0,33	0,10	0,3	0,0

ANEXO III: ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DAS AMOSTRAS UTILIZADAS NOS EXPERIMENTOS

Tabela 25: Dados do ensaio para determinação da porosidade para a granulometria de 0,5 a 1,0 (mm)

Granulometria de 0,5 a 1,0								
	R1	R2	R3	R4	R5	Média	σ	C.V
Massa dos grãos (g)	309,8	309	307,2	304,2	303,9	306,8	2,7	0,009
Vol. Coluna (cm ³)	200	200	200	200	200	200	-	-
Vol. Dos Grãos	114,7	114,4	113,8	112,7	112,6	113,6	1,0	0,009
ε (%)	42,6	42,8	43,1	43,7	43,7	43,2	0,5	0,01

Tabela 26: Dados do ensaio para determinação da porosidade para a granulometria de 0,8 a 1,2 (mm)

Granulometria de 0,8 a 1,2								
	R1	R2	R3	R4	R5	Média	σ	C.V
Massa dos grãos (g)	313,4	311,5	310,5	311,3	312,5	311,84	1,13	0,004
Vol. Coluna (cm ³)	200	200	200	200	200	200	-	-
Vol. Dos Grãos	116,1	115,4	115,0	115,3	115,7	115,5	0,4	0,004
ε (%)	42,0	42,3	42,5	42,4	42,1	42,3	0,2	0,005

Tabela 27: Dados do ensaio para determinação da porosidade para a granulometria de 1,0 a 1,5 (mm)

Granulometria de 1,0 a 1,5								
	R1	R2	R3	R4	R5	Média	σ	C.V
Massa dos grãos (g)	318,6	318,3	318	316,1	324,5	319,1	3,17	0,01
Vol. Coluna (cm ³)	200	200	200	200	200	200	-	-
Vol. Dos Grãos	118,0	117,9	117,8	117,1	120,2	118,2	1,2	0,01
ε (%)	41,0	41,1	41,1	41,5	39,9	40,9	0,6	0,01

Tabela 28: Valores médios do diâmetro equivalente (D_{eq})

Granulometria	\bar{m}	σ	CV	N	\bar{m}/N	D_{eq}
0,5 a 1,0 (mm)	0,294	0,01	3,3	300	0,001	0,9
0,8 a 1,2 (mm)	0,512	0,01	1,8	250	0,002	1,1
1,0 a 1,5 (mm)	1,206	0,04	3,6	200	0,006	1,6

Tabela 29: Valores médios de esfericidade (ψ)

Granulometria (mm)	$\bar{\psi}$	σ	CV (%)
0,5 a 1,0	0,82	0,05	6
0,8 a 1,2	0,82	0,05	6
1,0 a 1,5	0,82	0,06	7

ANEXO IV: VALORES DE PERDA DE CARGA PARA OS FILTROS AVALIADOS VAZIOS E COM CAMADA FILTRANTE.

Tabela 30: Valores de perda de carga para os três filtros avaliados vazios para diferentes cargas hidráulicas e os respectivos valores de desvio padrão e coeficientes de variações.

Filtro 1				Filtro 2				Filtro 3			
C.H ¹	h _f (kPa)	σ	CV (%)	C.H ¹	h _f (kPa)	σ	CV (%)	C.H ¹	h _f (kPa)	σ	CV (%)
20	3,8	0,003	5,6	20	1,1	0,000	1,9	20	1,2	0,000	1,2
40	4,2	0,001	1,1	40	1,7	0,001	3,4	40	1,6	0,001	1,7
60	10,1	0,003	1,0	60	2,8	0,001	3,1	60	2,8	0,002	3,0
68	12,2	0,000	0,1	80	3,9	0,001	3,2	80	4,5	0,003	3,1
78	14,9	0,016	3,8	100	7,3	0,001	1,0	100	6,7	0,002	1,3

¹ Taxa de filtração (m³.h⁻¹.m²) aplicada durante os ensaios.

Tabela 31: Valores médios de perda de carga do filtro 1 para as alturas de 20, 29 e 37,5 cm nas três granulometrias avaliadas.

C.H (m ³ .h ⁻¹ .m ²)	Altura do leito em relação à percentagem efetiva do corpo do filtro								
	20 cm			29 cm			37,5 cm		
	h _f (kPa)	σ	CV (%)	h _f (kPa)	σ	CV (%)	h _f (kPa)	σ	CV (%)
Granulometria 0,5 a 1,0 mm									
20	6,6	0,002	2,3	7,9	0,001	1,2	8,8	0,002	1,6
40	7,8	0,004	2,3	10,7	0,003	1,6	12,9	0,002	0,8
60	18,8	0,006	1,6	23,5	0,006	1,5	26,4	0,002	0,5
68	22,7	0,004	1,0	28,5	0,002	0,4	31,5	0,001	0,3
78	28,2	0,002	0,4	34,1	0,001	0,2	38,2	0,002	0,3
Granulometria 0,8 a 1,2 mm									
20	5,3	0,001	0,3	6,0	0,001	0,2	6,7	0,002	0,4
40	5,8	0,007	1,6	6,9	0,005	1,2	7,5	0,002	0,4
60	13,5	0,003	1,0	15,5	0,009	2,7	17,7	0,006	1,7
68	18,0	0,003	1,8	19,5	0,003	1,7	21,8	0,002	1,0
78	22,2	0,001	1,6	24,5	0,001	1,1	27,9	0,002	2,4
Granulometria 1,0 a 1,5 mm									
20	4,3	0,008	1,7	5,6	0,002	0,4	6,0	0,004	0,8
40	5,0	0,005	1,3	6,4	0,005	1,3	6,9	0,006	1,4
60	13,4	0,014	4,5	14,3	0,007	2,3	15,2	0,006	1,8
68	15,9	0,002	1,7	17,5	0,002	1,2	19,0	0,004	2,9
78	20,0	0,003	4,0	21,9	0,002	3,0	23,5	0,002	1,8

Tabela 32: Valores médios de perda de carga do filtro 2 para as alturas 24, 34,8 e 45 cm nas três granulometrias avaliadas.

C.H (m ³ .h ⁻¹ .m ²)	Altura do leito em relação à percentagem efetiva do corpo do filtro								
	24 cm			34,8 cm			45 cm		
	h _f (kPa)	σ	CV (%)	h _f (kPa)	σ	CV (%)	h _f (kPa)	σ	CV (%)
Granulometria 0,5 a 1,0 mm									
20	5,4	0,003	6,2	7,2	0,002	3,0	8,3	0,002	2,3
40	9,7	0,001	0,8	12,5	0,001	0,5	15,9	0,002	1,4
60	17,2	0,004	2,4	21,6	0,003	1,5	26,5	0,003	1,1
80	25,4	0,004	1,6	32,1	0,007	2,3	38,8	0,003	0,8
100	35,0	0,005	1,3	44,0	0,006	1,3	52,9	0,004	0,7
Granulometria 0,8 a 1,2 mm									
20	4,7	0,001	1,5	6,3	0,000	0,2	7,3	0,001	1,3
40	7,5	0,002	2,1	10,8	0,000	0,1	12,9	0,000	0,1
60	10,6	0,001	0,9	15,9	0,000	0,2	18,1	0,006	3,0
80	12,0	0,004	3,1	18,3	0,004	1,9	22,3	0,009	3,7
100	16,6	0,003	1,6	21,6	0,003	1,4	28,5	0,010	3,5
Granulometria 1,0 a 1,5 mm									
20	1,9	0,001	4,7	2,4	0,001	2,3	4,2	0,02	3,4
40	2,9	0,000	1,3	3,4	0,001	2,1	6,2	0,001	1,3
60	5,0	0,001	1,3	5,5	0,001	1,3	8,3	0,003	2,9
80	8,0	0,001	1,5	8,1	0,001	1,2	12,9	0,004	2,8
100	12,0	0,001	0,7	12,8	0,004	2,6	19,0	0,003	1,5

Tabela 33: Valores médios de perda de carga do filtro 3 para as alturas de 24, 34,8 e 45 cm nas três granulometrias avaliadas.,

Tf (m ³ .h ⁻¹ .m ²)	Altura do leito em relação à percentagem efetiva do corpo do filtro								
	24 cm			34,8 cm			45 cm		
	h _f ¹ (kPa)	σ	CV (%)	h _f ¹ (kPa)	σ	CV (%)	h _f ¹ (kPa)	σ	CV (%)
Granulometria 0,5 a 1,0 mm									
20	3,1	0,001	2,2	4,3	0,001	2,9	5,0	0,002	3,1
40	5,3	0,001	1,0	8,2	0,004	3,6	9,7	0,004	3,4
60	10,1	0,004	3,1	12,9	0,007	4,2	16,1	0,004	2,0
80	14,7	0,006	2,8	18,9	0,004	1,6	24,6	0,004	1,4
100	21,0	0,003	1,0	25,8	0,001	0,2	33,6	0,006	1,5
Granulometria 0,8 a 1,2 mm									
20	2,5	0,001	3,9	3,5	0,002	4,2	4,3	0,002	3,4
40	4,3	0,000	0,6	5,1	0,001	0,9	6,2	0,002	2,9
60	7,0	0,000	0,4	8,2	0,002	1,4	10,0	0,005	3,6
80	10,5	0,001	0,8	12,1	0,004	2,4	14,4	0,006	2,9
100	15,0	0,006	2,7	17,2	0,001	0,4	19,6	0,002	0,7
Granulometria 1,0 a 1,5 mm									
20	2,0	0,001	3,8	3,1	0,001	3,2	3,9	0,001	1,3
40	3,3	0,001	1,9	4,0	0,001	2,7	5,3	0,003	3,7
60	5,3	0,001	1,2	6,7	0,003	2,9	7,8	0,003	2,7
80	8,3	0,001	0,6	9,9	0,001	0,9	11,6	0,007	3,9
100	11,8	0,003	1,4	14,5	0,000	0,2	16,2	0,003	1,3

ANEXO V: ANÁLISE DE VARIÂNCIAS

Tabela 34: Análise de variância para o modelo alométrico linear característico do filtro 1.

Fonte de Variação	G. L.	S. Q.	Q. M.	F	F de significação
Regressão	1	3,882229	3,882229	56,7283	4,3E-06
Resíduo	13	0,889661	0,068435		
Total	14	4,771891			

Tabela 35: Análise de variância para o modelo alométrico linear característico do filtro 2.

Fonte de Variação	G. L.	S. Q.	Q. M.	F	F de significação
Regressão	1	5,963558	5,963558	176,4858	6,11E-09
Resíduo	13	0,439277	0,033791		
Total	14	6,402835			

Tabela 36: Análise de variância para o modelo alométrico linear característico do filtro 3.

Fonte de Variação	G.L	S.Q.	Q. M.	F	F de significação
Regressão	1	5,342774	5,342774	132,8942	3,38E-08
Resíduo	13	0,522642	0,040203		
Total	14	5,865415			

Tabela 37: Análise de variância para a função exponencial característica do filtro 1.

Fonte de Variação	G. L.	S. Q.	Q. M.	F	F de significação
Regressão	1	4,354053	4,354053	135,4657	3,01E-08
Resíduo	13	0,417838	0,032141		
Total	14	4,771891			

Tabela 38: Análise de variância para a função exponencial característica do filtro 2.

Fonte de Variação	G. L.	S. Q.	Q. M.	F	F de significação
Regressão	1	6,346636	6,346636	1468,09	9,34E-15
Resíduo	13	0,0562	0,004323		
Total	14	6,402835			

Tabela 39: Análise de variância para a função exponencial característica do filtro 3.

Fonte de Variação	G. L.	S. Q.	Q. M.	F	F de significação
Regressão	1	5,804305	5,804305	1234,748	2,85E-14
Resíduo	13	0,06111	0,004701		
Total	14	5,865415			

Tabela 40: Análise de variância para os ajustes lineares utilizados na comparação dos dados experimentais e estimados pelo modelo proposto.

Fonte de Variação	G. L.	S. Q.	Q. M.	F	R ²
Filtro 1					
Regressão	1	3450,352	3450,352		
Resíduo	43	90,23755	2,098548	1644,162	0,9745
Total	44	3540,59			
Filtro 2					
Regressão	1	5544,467	5544,467		
Resíduo	43	340,6838	7,922879	699,8045	0,9421
Total	44	5885,151			
Filtro 3					
Regressão	1	2152,343	2152,343		
Resíduo	43	19,04773	0,44297	4858,886	0,9912
Total	44	2171,39			

ANEXO VI: DESENHOS TÉCNICOS DOS DIFUSORES DOS FILTROS AVALIADOS

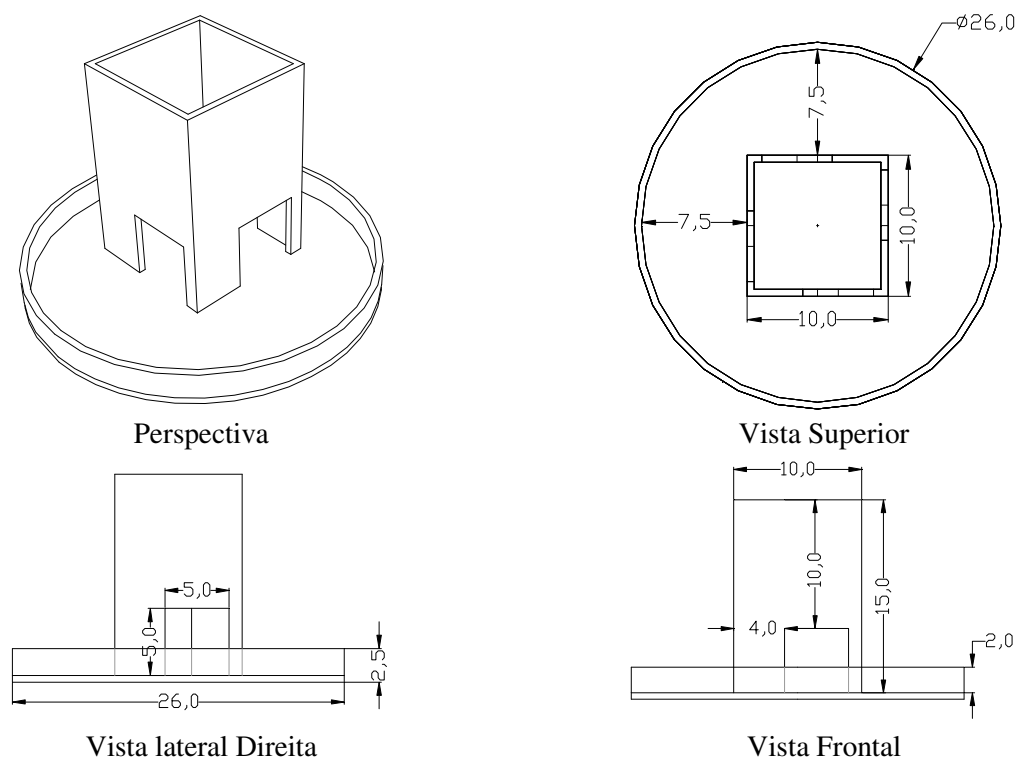
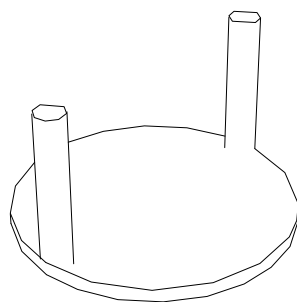
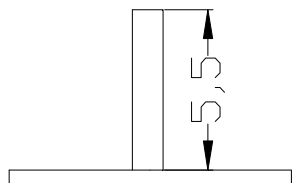


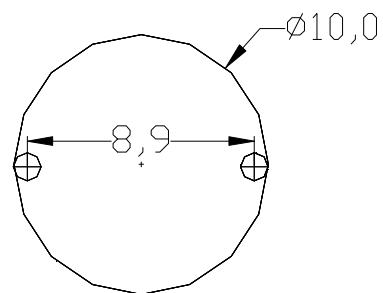
Figura 36: Esquema do projeto estrutural da placa difusora do filtro 1.



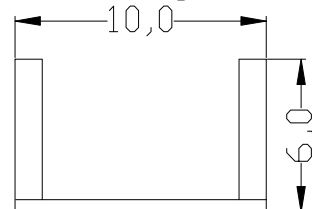
Perspectiva



Vista lateral Direita

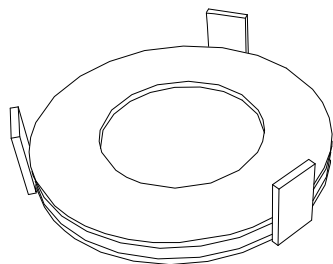


Vista Superior

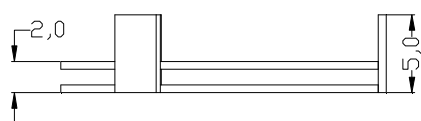


Vista Frontal

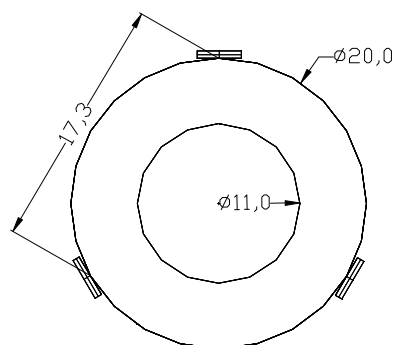
Figura 37: Esquema estrutural da placa difusora do filtro 2.



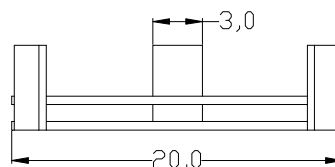
Perspectiva



Vista lateral Direita



Vista Superior



Vista Frontal

Figura 38: Esquema estrutural da placa difusora do filtro 3.