

ARTIGO DE REVISÃO

PROCESSO DA RETROLAVAGEM EM FILTROS DE AREIA USADOS NA IRRIGAÇÃO LOCALIZADA

JUAN C. SALCEDO¹, ROBERTO TESTEZLAF², MÁRCIO MESQUITA³

RESUMO: O processo da retrolavagem consiste na passagem da água através do filtro em sentido contrário ao fluxo de filtração com o objetivo de remover partículas orgânicas e inorgânicas retidas no meio filtrante. O projeto de filtros de areia com configurações ineficientes e a ocorrência de condições operacionais inadequadas contribuem para limitar o desempenho desse processo, causando deficiências na limpeza dos meios filtrantes e comprometendo o funcionamento dos sistemas de irrigação localizada. O objetivo do presente trabalho é proporcionar uma revisão sobre os conceitos associados ao processo da retrolavagem nos filtros de areia, relacionando informações existentes na literatura com experiências de laboratório. Foi gerado um texto básico com informações técnico-científicas sobre o tema, visando a criar um momento de reflexão sobre o processo de retrolavagem e a contribuir para a melhoria do desempenho desses equipamentos na irrigação localizada.

PALAVRAS-CHAVE: filtração, fluidização, camada filtrante.

BACKWASH PROCESS IN SAND FILTERS USED IN LOCALIZED IRRIGATION

ABSTRACT: The backwash process consists of water passing through the filter in the opposite direction of the filtering flow to remove organic and inorganic particles of media filter. Inefficient sand filters designs and the occurrence of inadequate operating conditions contribute to restrict the process performance, causing deficiencies in the filter cleaning and compromise the operation of localized irrigation systems. The objective of this study is to provide a review about concepts associated with the backwash process in sand filters, relating literature information with laboratory experiments. A basic documentation was produced with technical and scientific information on this subject to create a reflection about the backwash process and contribute to the improvement of the equipment performance in the localized irrigation.

KEYWORDS: Filtration, fluidization, filtering bed.

INTRODUÇÃO

Os filtros de areia são dispositivos que contêm uma camada de material filtrante para reter partículas orgânicas e inorgânicas presentes na água, sendo recomendados na presença de contaminação orgânica e de algas, devido a sua capacidade de retenção que ocorre entre o meio granular do material filtrante. Esses equipamentos possuem duas operações básicas de operação: filtração, para a remoção de matéria em suspensão presente na água mediante sua passagem pela areia, e a retrolavagem, etapa utilizada para a limpeza ou retirada da matéria ou de impurezas acumuladas ao longo da camada filtrante. A determinação da capacidade de filtração e o entendimento do processo de retrolavagem são essenciais para a operação adequada desses equipamentos.

Segundo CRUZ & ZANINI (2010), a elevada concentração de sólidos grosseiros (areia) nas águas utilizadas na irrigação vem comprometendo a eficiência dos sistemas, principalmente pela obstrução dos emissores. Esse processo de entupimento é o principal indicador que o sistema de filtração não está funcionando corretamente, principalmente por problemas gerados por procedimentos inadequados de projeto ou de operação dos filtros. Algumas falhas encontradas na

¹ Eng^o Agrícola, Mestre, Faculdade Engenharia Agrícola - UNICAMP, Campinas-SP, camilosalcedo2003@yahoo.es.

² Eng^o Agrícola, Professor Titular, Faculdade de Engenharia Agrícola - UNICAMP, Campinas - SP, bob@feagri.unicamp.br.

³ Eng^o Agrícola, Doutorando, Faculdade Engenharia Agrícola - UNICAMP, Campinas-SP, marcio.mesquita@feagri.unicamp.br.

Recebido pelo Conselho Editorial em: 6-2-2011

Aprovado pelo Conselho Editorial em: 18-7-2011

execução da retrolavagem de filtros de areia em campo são causadas pelo uso de vazões e tempos de limpeza incorretos, consequência da falta de conhecimento e de treinamento dos agricultores, aliada à pouca assistência técnica e a informações na operação e manutenção dos filtros de areia com pouco conhecimento teórico fornecido pelas próprias empresas fornecedoras dos equipamentos. Não existe uma metodologia ou técnica que permita a avaliação da eficiência do processo de retrolavagem em campo. Dessa forma, os procedimentos de operação dos filtros de areia são definidos a partir da experiência dos produtores com limitações técnicas, induzindo a sérios problemas no uso da irrigação localizada.

A operação correta do processo de retrolavagem requer que a camada filtrante seja fluidizada, expandindo-se em consequência do fluxo reverso da água. Esse procedimento deve ser baseado em vazões predeterminadas e controladas para atingir a eficácia desejada da limpeza e impedir perdas de areia da camada. Portanto, as vazões e as pressões apropriadas de retrolavagem que determinem a expansão correta da camada de areia estão sujeitas às características do modelo de filtro utilizado, da granulometria dos grãos e da uniformidade da areia.

Existem poucas referências bibliográficas sobre o projeto e a manutenção de equipamentos de filtração utilizados na irrigação associada a informações dispersas de fabricantes. Consequentemente, não se dispõe ainda no Brasil de procedimentos e informações técnicas detalhadas sobre a operação dos filtros adequadas às nossas condições. Portanto, o objetivo do presente trabalho é proporcionar uma revisão dos conceitos associados ao processo da retrolavagem em filtros de areia, definindo os princípios teóricos que regem o fenômeno e relacionando os parâmetros que afetam o seu desempenho.

REVISÃO

Segundo a ASABE (1994), a retrolavagem é definida como o procedimento de passagem da água através do filtro em sentido contrário ao fluxo de filtração com o objetivo de remover partículas orgânicas e inorgânicas retidas no meio filtrante. Dessa forma, todo sistema de filtração com areia deve possuir um mecanismo para reverter a direção do fluxo da água para facilitar sua limpeza, como recomenda BERNARDO et al. (2005). A retrolavagem em filtros de areia é necessária e complemento fundamental da filtração, melhorando a qualidade da água e diminuindo os níveis de turbidez presentes.

A Figura 1 ilustra o processo da retrolavagem de um filtro de areia convencional. O efluente previamente filtrado entra em direção ascendente pelas crepinas que distribuem o fluxo ao longo da camada de areia. A passagem do fluido no sentido contrário determina uma expansão da camada removendo as partículas aderidas pelas diferenças de densidade entre as partículas e o meio filtrante, sendo que as partículas com maior densidade ficam dentro do filtro, enquanto as partículas de menor densidade serão expulsas.

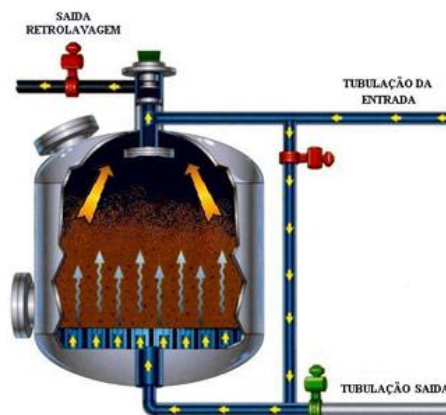


FIGURA 1. Esquema do processo da retrolavagem nos filtros de areia. **Outline of backwash process in sand filters.**

Esse procedimento é afetado por vários fatores para se alcançar a movimentação e a fluidização do meio filtrante. Os primeiros fatores estão relacionados ao tipo do meio filtrante, sendo que suas partículas devem possuir condições físicas e granulométricas que, quando estruturadas na camada, facilitem a passagem do fluxo ascendente. Outros fatores estão ligados à configuração mecânica dos equipamentos, como as formas de entrada e saída da água do seu interior e os seus componentes internos, denominados drenos ou crepinas, e placa difusora. A questão operacional determina que a vazão de retrolavagem aplique uma velocidade superficial suficiente para o levantamento das partículas da camada, evitando perdas do meio e causando perdas de pressão reduzidas pelos componentes internos do equipamento (drenos e difusores).

Processo de fluidização da camada filtrante

A retrolavagem é um procedimento que envolve mecanismos associados às teorias de fluidização de leitos porosos, e é definida por GUPTA & SATHIYAMOORTHY (1999) como o fenômeno de dar propriedades de um fluido a um leito de partículas sólidas, pela ação ou efeito de passar um fluido através deste, a uma velocidade tal que consiga levá-lo até uma determinada altura, evitando possíveis perdas de material do leito utilizado. A fluidização é dependente de parâmetros especiais da dinâmica de forças presentes, como forças capilares, forças eletrostáticas e de parâmetros da velocidade mínima de fluidização. Essa velocidade que determina os momentos de transição entre a camada fixa e as camadas em movimento e seu conhecimento permite controlar a ocorrência dos regimes da fluidização para possibilitar o emprego de seus comportamentos em aplicações específicas. Segundo LOPEZ (2009), o processo de fluidização de leitos é constituído ao longo de sua ocorrência de fases ou diferentes comportamentos da camada que originam distintos regimes, cuja existência permite que a fluidização seja aplicada em múltiplas áreas de desenvolvimento. SALCEDO (2010) identificou os regimes de fluidização que acontecem no processo de retrolavagem, como mostra a Figura 2. Entretanto, esse autor afirma que as transições entre regimes não são fáceis de serem observadas ou identificadas.

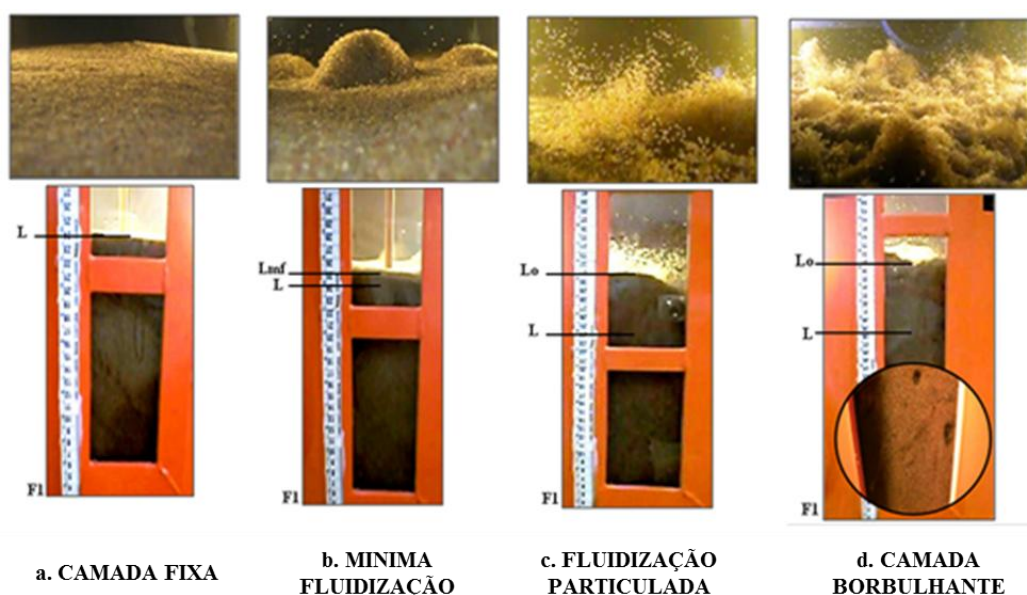


FIGURA 2. Visualização dos regimes de fluidização durante o processo de retrolavagem em filtros de areia (Fonte: SALCEDO, 2010). **Fluidization regimes visualization during sand filters backwash process.**

A camada fixa é o primeiro regime que ocorre no processo de fluidização (Figura 2a), caracterizado pelo comportamento estático sem movimentação de partículas e baixas velocidades superficiais, sendo que a camada conserva sua altura inicial (L). O segundo regime de mínima fluidização ou borbulhamento localizado é identificado no momento em que as primeiras partículas de areia iniciavam a movimentação com um pequeno levantamento da camada (de L a L_{mf}) e com borbulhamentos na superfície da camada (Figura 2b). Nesse regime, as características da camada

filtrante sofrem modificações, principalmente a porosidade (ε), que aumenta seu valor pelo efeito da expansão do leito. O terceiro regime ocorre após da mínima fluidização, quando a camada de areia sofre uma expansão progressiva em sua totalidade, proporcional com o aumento da velocidade superficial, aparecendo uma movimentação desordenada e agitada, tanto na superfície como ao longo do leito (Figura 2c), e as partículas de areia mantêm-se suspensas, pois a camada neste ponto se encontra totalmente fluidizada. O último regime, denominado de regime da camada borbulhante, ocorre de forma momentânea a velocidades superficiais altas. Em alguns casos, esse regime aparece como parte do regime da fluidização particulada, que apresenta condições dinâmicas que determinam características de movimentação e agitação especiais nas camadas fluidizadas. Nesse regime, visualizam-se bolhas de pequenos diâmetros em momentos específicos (Figura 2d).

O entendimento dos comportamentos básicos da retrolavagem permite a determinação de critérios concretos nas análises dos parâmetros físicos e hidráulicos que afetam esse processo. Para fornecer uma recomendação do regime ótimo na retrolavagem, é preciso, antes de tudo, analisar a qualidade da água utilizada para irrigação e, principalmente, a concentração de sólidos suspensos para, assim, determinar as condições do que se quer eliminar. A identificação da ocorrência dos regimes de fluidização em filtros de areia possibilita a determinação das variáveis de controle da retrolavagem que vão tornar o processo de limpeza da camada filtrante mais eficaz.

Velocidade mínima de fluidização

As determinações da velocidade de fluidização mínima, (V_{mf}) e da velocidade superficial são necessárias e indispensáveis para descrever o processo da fluidização em camadas filtrantes. A *velocidade mínima de fluidização* pode ser definida como o momento em que as partículas da camada passam de um estado estático para um estado de movimentação (SALCEDO, 2010). Segundo CLEASBY & LOGSDON (1999), o cálculo da velocidade de mínima fluidização é necessário na determinação dos requisitos mínimos de vazão na retrolavagem, sendo que sua intensidade faz com que a camada se comporte de diferentes formas, permitindo estabelecer o ponto inicial da expansão da camada de areia.

WEN & YU (1966) determinaram, matematicamente, o valor da velocidade mínima de fluidização com o modelo simplificado da eq.(1), assumindo que a perda de pressão na camada fixa é igual ao valor constante da perda de pressão do leito no ponto de fluidização na eq.(1):

$$v_{mf} = \frac{\mu_d}{\rho D_{eq}} * \left[\left(33,7^2 + 0,0408 * D_{eq}^3 \frac{\rho(\rho_p - \rho)g}{\mu_d^2} \right)^{0,5} - 33,7 \right] \quad (1)$$

em que,

V_{mf} - velocidade mínima de fluidização, $m s^{-1}$;

D_{eq} - diâmetro equivalente da partícula, m;

ρ - densidade do fluido, $kg m^{-3}$;

ρ_p - massa específica da partícula, $kg m^{-3}$;

μ_d - viscosidade dinâmica do fluido, $kgm^{-1} s^{-1}$, e

g - aceleração da gravidade, $m s^{-2}$.

SALCEDO (2010) usou o modelo de WEN & YU (1966) para calcular a velocidade mínima de fluidização em três granulometrias diferentes e concluiu que o modelo foi capaz de determinar um valor indicativo do início da movimentação da camada para as condições ensaiadas, apesar de apresentar sensibilidade aos parâmetros físicos do material filtrante utilizado.

Existem outros modelos matemáticos de caráter empírico que, apesar de apresentarem certa complexidade, simulam o início do processo de retrolavagem, como o modelo de LEVA (1959) e o modelo de GOROSKO et al. (1958) representado nas eqs.(2) e (3), respectivamente:

$$V_{mf} = \frac{7,169 * 10^{-4} d_p^{1,82} (\rho_p - \rho)^{0,94} g}{\rho^{0,006} * \mu_d^{0,88}} \quad (2)$$

$$V_{mf} = \frac{\mu_d}{\rho * d_p} \left(\frac{Ar}{1400 + 5,2\sqrt{Ar}} \right) \quad (3)$$

em que,

$$Ar - \text{número de Arquimedes} = 1823RE_{mf}^{1,07} + 21,27RE_{mf}^2$$

$$RE_{mf} - \text{número de Reynolds na mínima fluidização} = RE_{mf} = \frac{V_s * \rho * D_{ef}}{\mu_d}$$

V_{mf} - velocidade mínima de fluidização, $m s^{-1}$;

V_s - velocidade superficial, m ;

D_{ef} - diâmetro efetivo, m ;

ρ - densidade do fluido, $kg m^{-3}$;

ρ_p - massa específica da partícula, $kg m^{-3}$;

μ_d - viscosidade dinâmica do fluido, $kgm^{-1} s^{-1}$, e

g - aceleração da gravidade, $m s^{-2}$.

A comparação dos resultados obtidos por diferentes propostas é uma das formas de se avaliar o comportamento teórico de diferentes parâmetros na precisão da estimativa e de se atingir uma simulação mais próxima do processo real da retrolavagem. Na prática, o conhecimento da velocidade mínima de fluidização permite determinar o momento em que a camada filtrante inicia sua movimentação ou fluidização e contribuir para o desenvolvimento da automação do processo e da realização de um controle mais detalhado e específico do tempo e duração do processo de retrolavagem.

Expansão da camada filtrante

A partir da velocidade mínima de fluidização, o processo de retrolavagem passa para o regime de fluidização particulada quando o leito filtrante se expande proporcionalmente ao aumento da velocidade superficial. A caracterização do processo de expansão da camada de areia permite determinar o nível máximo de levantamento do leito de forma a evitar perdas do meio filtrante e garantir a máxima remoção das impurezas retidas.

A variação da expansão da camada filtrante durante o processo da fluidização é definida como a diferença entre a altura de expansão e a altura estática da camada em relação á altura inicial, e é expressa pela eq.(4) (SIWIEC, 2007).

$$\% E = \frac{L_0 - L}{L} * 100 \quad (4)$$

em que,

E - percentagem de expansão, %;

L_0 - expansão da camada, m , e

L - altura da camada estática, m .

Segundo SIWIEC (2007), a expansão do leito afeta significativamente a eficácia da limpeza, especialmente por duas razões:

- Com as partículas desprendidas da camada, é mais fácil transportar as impurezas dos espaços intersticiais para fora do filtro, e

- A existência de forças de cisalhamento durante o fluxo de água em torno das partículas ajuda a remover as impurezas aderidas aos grãos.

Na Figura 3, mostra-se o comportamento característico da expansão em diferentes materiais usados como meio filtrantes (SIWIEC, 2007).

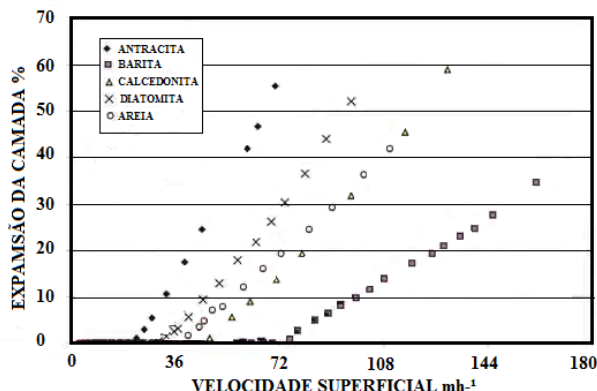


FIGURA 3. Comportamento da expansão de camada para diferentes materiais (Fonte: SIWIEC, 2007). **Expansion layer behavior for different materials.**

Nota-se na Figura 3 que o comportamento da areia é intermediário aos outros materiais, indicando uma declividade mais uniforme com o aumento da velocidade. É possível observar na figura que materiais menos densos alcançam sua maior expansão com menor velocidade superficial do que os materiais mais densos. Isto significa, em termos práticos, que é possível atingir velocidades ideais de expansão sem restrições no uso de energia e conseguir fluidizar satisfatoriamente o meio. SALCEDO (2010) confirmou esse comportamento usando areia de diferentes granulometrias e determinou que, a partir do início da movimentação, as menores alturas de camadas apresentaram maior percentual de expansão para um mesmo valor de velocidade superficial quando comparadas as maiores alturas de camada. As camadas com maior granulometria precisaram de maiores valores de velocidade superficial para atingir a mesma expansão das camadas de menor granulometria.

Uma informação importante no processo de retrolavagem é a definição do grau de expansão que um leito fluidizado deve alcançar para proporcionar a limpeza eficiente das impurezas retidas em seu meio. Para WEBER (1979), CLEASBY (1972) e AKKOYUNLU (2003), a expansão mínima que deve sofrer a camada para gerar limpeza do meio filtrante é de 25% da altura total da camada. Entretanto, a relação da expansão da camada com a eficiência de remoção depende do tipo do material usado como meio filtrante. Existem materiais filtrantes que apresentam boas expansões, mas que não apresentam condições granulométricas ótimas para reter partículas em suspensão. Estudos que avaliem essa relação expansão-meio filtrante em função da concentração de impurezas retidas no filtro, contribuiriam para uma melhor definição de parâmetros de operação do processo de retrolavagem.

Caracterização da camada filtrante

Um meio filtrante deve ser constituído por um material com granulometria tal que retenha, durante o processo de filtração, uma quantidade significativa de sólidos de efluente em suspensão, e que facilite o processo de limpeza na retrolavagem (WEBER, 1979). Para a otimização da operação do filtro, é preciso buscar um equilíbrio entre essas condições; entretanto, é difícil chegar a essa posição pela quantidade de parâmetros que influenciam nos dois processos. Uma areia muito fina permite resultados ótimos de filtração, mas não permite uma boa penetração de sólidos na camada. Por outro lado, areias grosseiras toleram funcionamentos prolongados de processos com filtrações pouco efetivas, facilitam a lavagem do meio filtrante, mas precisam de altas vazões para conseguir expansões que permitam a remoção dos contaminantes. Para garantir a eficiência de remoção do filtro, TESTEZLAF (2008) recomenda a escolha correta do elemento filtrante como fator importante, e para isso é necessário conhecer as principais características do meio filtrante, apresentadas na Tabela 1, definidas a partir da experiência de alguns autores.

TABELA 1. Propriedades características de meios filtrantes usados em filtros de areia. **Filter media characteristics properties used in sand filters.**

Característica	Definição	Recomendação
Diâmetro efetivo da partícula	O tamanho da abertura de uma tela pela qual passam 10% (D ₁₀) de uma amostra. Indica o tamanho da partícula que pode ser retida pelo meio filtrante.	Depende do tipo de material filtrante (HAMAN et al., 1994).
Uniformidade do meio	Relação entre o tamanho da abertura da peneira pelo qual passa 60% (D ₆₀) e o diâmetro efetivo da amostra. (CU - coeficiente de uniformidade: D ₆₀ /D _{ef})	Valores de CU inferiores de 1,5 (BURT, 1994).
Diâmetro equivalente	Diâmetro de uma esfera equivalente ao volume da partícula $D_{eq} = \left[\frac{s}{\rho_p} * \frac{\text{massa média da partícula}}{\rho_p} \right]^{1/3}$ (5) Em que, ρ_p - Massa específica da partícula, kg cm ⁻³	(SUMMERFELT & CLEASBY, 1996)
Área superficial da partícula	Para partículas irregulares Superfície por unidade de volume de partícula: $S_p = \frac{\text{área da superfície da esfera}}{\text{volume da esfera}} = \frac{s}{D_p}$ (6) Em que, D_p - Diâmetro de partícula, cm; D_{eq} - Diâmetro equivalente, cm; ψ - esfericidade.	(SUMMERFELT & CLEASBY, 1996)
Massa específica da partícula	Relação entre a massa e o volume da partícula	Unidade (kg m ⁻³) Areia sílica 2.650 – 2.670 Carvão antracito 1.400 – 1.700 Granito 4.100 – 4.500 (CLEMENTS & HAARHOFF, 2006)
Esfericidade	Tendência em que a forma de uma partícula de se aproximar da forma esférica $\psi = \frac{\text{área da superfície da esfera de igual volume da partícula}}{\text{área da superfície da partícula}}$ (8) Partículas não esféricas: $\psi = \frac{s}{D_p * D_{eq}}$ (9) Em que, S_p - superfície da partícula, cm ² .	Areia Arredondada 0,86 Pontuda 0,66 Moída 0,8 - 0,9 Carvão Pulverizado 0,73 Moído 0,63 - 0,75 Carvão ativado 0,70 - 0,90 Mica laminada 0,28
Rugosidade	Está relacionada com a fricção entre partículas da camada filtrante e seu valor aumenta na medida em que a porosidade também aumenta, sendo que o incremento da porosidade reduz a resistência do fluxo do fluido.	(GUPTA & SATHIYAMOORTHY, 1999)
Número de Reynolds da partícula	O número de Reynolds calculado para uma partícula é usado para entender o comportamento dinâmico do fluxo nas proximidades de uma partícula isolada. $RE_p = \frac{V_s * \rho * D_{ef}}{\mu}$ (10) Em que, V_s - Velocidade superficial, ms ⁻¹ ; ρ - densidade do fluido, kg cm ³ ; D_{ef} - Diâmetro efetivo, cm; μ - Viscosidade dinâmica do fluido, kg m ⁻¹ s ⁻¹ .	Tipicamente da ordem de 1 a 10 e, fluxos em regime de transição com valores na ordem entre 0,2 < REp < 500 para meios porosos (BROUCKAERT, 2004).
Porosidade da camada	A porosidade da camada estática do meio granular é a fração do volume dentro da camada que não é ocupada pelas partículas $\varepsilon = \frac{\text{volume de poros}}{\text{volume da camada}}$ (11) Para uma fração porosa de areia limpa $\varepsilon = 1 - \left[\frac{(\text{total massa da areia}) / (\text{densidade de partícula da areia})}{\text{volume da camada}} \right]$ (12)	0,65 a 0,75 (AMIRTHARAJAH, 1978) e TURAM et al., 2003), para granulometria entre 0,5 a 0.6 mm. 0,41 a 0,43 (MESQUITA, 2010) para granulometrias entre 0,5 a 1,5.
Altura da camada	A altura da camada define a espessura do leito na qual as partículas ficarão retidas na filtração	50 a 100 cm VERMEREIN & JOBLING (1984)

Algumas características das partículas do meio filtrante citadas na Tabela 1, como a área superficial da partícula e a esfericidade, são de difícil determinação, não permitindo uma caracterização exata das condições do meio filtrante. Dessa forma, estudos sobre métodos-padrão laboratoriais dessas determinações precisam ser realizados para possibilitar maior precisão na estimativa dessas propriedades e aumentar a confiabilidade dos modelos matemáticos de simulação do processo de retrolavagem.

As interpretações conjuntas dos parâmetros de partícula e da camada propõem estabelecer as condições físicas favoráveis no momento da escolha do leito filtrante para garantir sua função principal e, assim, facilitar a execução da limpeza quando for realizado o processo de retrolavagem. É importante saber que a relação existente entre os parâmetros interage de forma tal que uma propriedade é fisicamente independente da outra; em consequência, um valor maior de diâmetro de partícula ou da esfericidade pode provocar mudanças significativas na porosidade da camada.

Perdas de carga no processo de retrolavagem

As perdas de carga no processo de retrolavagem podem ocorrer pela estrutura e componentes internos do filtro e pela camada filtrante. Os filtros de areia apresentam características estruturais próprias que podem causar fenômenos distintos durante a passagem do líquido em seu interior, como a influência dos componentes internos na perda de carga e determinada pelo tipo e pela estrutura e formato do componente. Por outro lado, a determinação da perda de carga localizada em conexões e peças especiais é complexa por causa das características estruturais do filtro (PUIG-BARGUES et al., 2005). Segundo PIZARRO CABELLO (1996), esse processo envolve distintas variáveis influenciadas pela geometria dos componentes e o processo de fabricação do equipamento, o regime de escoamento e a presença de correntes secundárias, entre outras.

A configuração dos elementos internos dos filtros, difusores e crepinas afeta o comportamento da perda de carga em função da carga hidráulica dos equipamentos. BURT (2010) comparou diferentes tipos de elementos filtrantes (crepinas) em filtros com diferente distribuição e área total de abertura livre, em ausência de meio filtrante, constatando que as perdas de carga nos filtros dependem da distribuição dos elementos internos que compõem os drenos, encontrando perdas de pressão entre os componentes avaliados em até 14 kPa. MESQUITA (2010) caracterizou a estrutura dos difusores presentes em três modelos de filtros e encontrou que o formato e as dimensões reduzidas dos difusores aumentam a perda de carga durante o processo de filtração. Isso foi evidenciado igualmente por SALCEDO (2010) no processo de retrolavagem, em que os formatos dos difusores influenciam pela geração de resistência ao fluxo e à mudança em sua direção na saída do filtro. Para o autor, os filtros de areia que possuam componentes internos caracterizados por baixos valores de perda de carga devem ser considerados ideais para ambas as operações de filtração e retrolavagem.

As características do meio filtrante também afetam o processo de perda de carga em filtros de areia durante o processo de retrolavagem. Para BURT (2010), essas perdas diminuem com o aumento da vazão, fenômeno que pode ser atribuído ao efeito restritivo quando a camada se expande. Esse fenômeno foi confirmado por SALCEDO (2010), que determinou que as perdas de carga no filtro com areia não foram afetadas pela altura de camada nem pelo intervalo granulométrico da areia utilizada.

Teoricamente, a perda de carga causada pelo meio filtrante em função da velocidade superficial do fluido, isolando o efeito da estrutura e componentes do filtro, apresenta o comportamento representado na Figura 4 (GUPTA & SATHIYAMOORTHY, 1999).

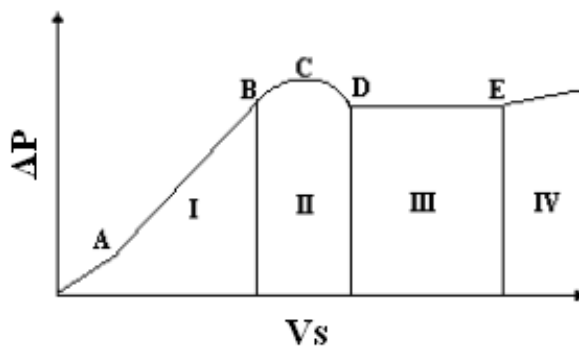


FIGURA 4: Variação da perda de carga produzida pelo meio filtrante durante a retrolavagem (Fonte: GUPTA & SATHIYAMOORTHY, 1999). **Variation of the head loss produced by the filter media during the backwash process.**

Na Figura 4, a região I, definida entre os pontos A e B, corresponde ao leito em regime de camada fixa, com o aumento proporcional da perda de carga ao incremento da velocidade superficial. O ponto C da curva, dentro da região II, indica a velocidade mínima de fluidização e o momento da ocorrência do maior valor da perda de carga no processo. Na região III, compreendida entre os pontos D e E, o valor da perda de carga permanece constante e corresponde ao regime de fluidização particulada.

O comportamento apresentado na Figura 4 foi confirmado experimentalmente por SALCEDO (2010), que avaliou o efeito da granulometria da areia em três modelos de filtro, caracterizando para cada um a perda de carga em função da velocidade superficial na ocorrência dos regimes de fluidização, obtendo perdas de 1 a 4 kPa em diferentes granulometrias. Os valores encontrados foram superiores aos valores obtidos por BURT (2010), em condições diferenciadas de ensaios, quando registrou perdas do meio filtrante na ordem de 2,75 kPa.

Existem vários modelos matemáticos, em sua maioria empíricos, que estimam as perdas de carga durante o processo de fluidização da camada e em seus diferentes regimes, como no caso do modelo de *Carman-Kozeny* da eq.(13) e o modelo de *Burke-Plummer* da eq.(14):

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{150 * \mu_d}{(\psi * D_{eq})^2} * \frac{(1 - \epsilon)^2}{\epsilon^3} * V_s \tag{13}$$

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{1,75 * \rho * V_s^2}{(\psi * D_{eq})} * \frac{(1 - \epsilon)}{\epsilon^3} \tag{14}$$

em que,

- ΔP - diferença de pressão, kg m⁻¹ s⁻²;
- L - altura da camada estática, m;
- D_{eq} - diâmetro equivalente, m;
- μ_d - viscosidade dinâmica do fluido, kg m⁻¹ s⁻¹;
- ρ - densidade do fluido, kg m⁻³;
- ρ_p - massa específica da partícula, kg m⁻³;
- ψ - esfericidade;
- ε - porosidade da camada, e
- V_s - velocidade superficial, m s⁻¹.

Um dos modelos mais aplicados nessa estimativa é o apresentado pela equação de *Ergun* (eq.15)). Essa equação é uma combinação dos modelos de *Carman-Kozeny* e *Burke-Plummer* e representa o comportamento da perda de carga em função da viscosidade e inércia do fluxo, sendo

recomendada tanto para prever comportamentos em camadas fluidizadas com altas velocidades superficiais (BROUCKAERT, 2004), como para estimar o valor da perda de carga constante dentro do regime de fluidização particulada, utilizando sua forma simplificada apresentada na eq.(16) (SUMMERFELT & CLEASBY, 1996).

$$\frac{\Delta P}{L} = 150 \frac{\mu_d}{(\psi * D_{eq})^2} * \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} * V_s + 1.75 \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon^3} * \frac{\rho}{\psi * D_{eq}} * V_s^2 \quad (15)$$

$$\frac{\Delta P}{L} = (1 - \varepsilon) * (\rho_p - \rho) * g \quad (16)$$

em que,

- ΔP - diferença de pressão, $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-2}$;
- L - altura da camada estática, m;
- D_{eq} - diâmetro equivalente, m;
- μ_d - viscosidade dinâmica do fluido, $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$;
- ρ - densidade do fluido, kg m^{-3} ;
- ρ_p - Massa específica da partícula, kg m^{-3} ;
- ψ - esfericidade;
- ε - porosidade da camada, e
- V_s - velocidade superficial, m s^{-1} .

SHOLJI & JOHNSON (1987) afirmam que existem novos modelos matemáticos que conseguem aproximar-se da avaliação do processo de retrolavagem, pois desenvolvem relações entre mais variáveis de importância, mas esses modelos não conseguem demonstrar a relação entre os regimes do fluxo em relação ao diâmetro das partículas de areia. Segundo TESTEZLAF (2008), o desenvolvimento de modelos matemáticos mais precisos que estimem a perda de carga em filtros de areia, em condições pressurizadas, que tenham como base a teoria de escoamento em meios porosos e considerem as diferenças estruturais entre equipamentos, permitirá a otimização do dimensionamento pela simulação de seu desempenho quando empregado em diferentes condições de operação.

Em termos gerais, a caracterização específica e particular dos componentes internos dos filtros de areia permitiria estabelecer relações entre as estruturas do equipamento e o comportamento da perda de carga em função da vazão para diferentes materiais filtrantes. A escolha dos componentes internos apropriados eleva os níveis de eficiência nos sistemas de filtração, permitindo funcionalidade na operação tanto da filtração como da retrolavagem, sendo que o comportamento dos componentes é função de requerimentos hidráulicos dos equipamentos.

CONCLUSÕES

A falta de informações técnicas-científicas sobre o processo de retrolavagem determina que sua operação e seu controle sejam realizados de forma ineficaz, podendo trazer sérios prejuízos aos produtores irrigantes.

Pretende-se com essa revisão apresentar tópicos relacionados com o processo de retrolavagem em filtros de areia, permitindo uma reflexão sobre os assuntos que afetam o desempenho desses equipamentos nessa condição. Busca-se, assim, fornecer informações e levantar questões que possam tornar-se objetos de pesquisas que produzam inovações sobre a filtração e criem novas ideias que aumentem o interesse pela prática do processo de retrolavagem de forma adequada.

A aplicação do conhecimento básico na operação de sistemas de filtração e em especial ao processo de retrolavagem permitirá que tanto produtores como fornecedores orientem suas técnicas e recomendações, estabelecendo padrões de operação e manutenção dos sistemas de filtração.

REFERÊNCIAS

- AKKOYUNLU, A. Expansion of granular water filters during backwash. *Environmental Engineering Science*, Larchmont, v.20, n.6, p.655-665, 2003.
- AMIRTHARAJAH, A. Optimum backwashing of sand filters. *Journal of Environmental Engineering*, New York, v.104, n.10, p.917-932, 1978.
- ASABE - AMERICAN SOCIETY AGRICULTURAL AND BIOLOGICAL ENGINEERS. *Media Filters for Irrigation - Testing and Performance Reporting*. St. Joseph, 1994. (ANSI/ASAE S539).
- BERNARDO, S.; SOARES, A.A.; MANTOVANI, C.E. *Manual de irrigação*. 7.ed. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2005. Cap. 9, p.483-548.
- BROUCKAERT, M.B. *Hydrodynamic detachment of deposited particles in fluidized bed filter backwashing*. 2004. 383 f. These (Doctor of Philosophy in Civil and Environmental Engineering) - Georgia Institute of Technology, Georgia, 2004.
- BURT, C.M. *Hydraulics of commercial sand media filters tanks used for agricultural drip irrigation: criteria for energy efficiency*. San Luis Obispo: Irrigation Training and Research Center, 2010. (Report N. R10-001). Disponível em: <www.itrc.org/reports/mediafilters.htm>. Acesso em: set. 2010.
- BURT, C.M. Media tanks for filtration. Part I: Tank sizing and media selection. *Irrigation Journal*, Urbana, p.15-17, 1994.
- CLEASBY, J.L. *Filtration*. In: WEBBER, W.J. *Physico-chemical processes for water quality control*. New York: Wiley-Interscience, 1972. p.139.
- CLEASBY, J.L.; LOGSDON, G.S. *Granular bed and precoat filtration*. In: AWWA. *Water quality & treatment*. 5th ed. New York: Mc Graw Hill, 1999, cap.8, p.8.1- 8.16.
- CLEMENTS, M.; HAARHOFF, J. *Filter media expansion during backwash: The effect of biological activity*. In: BIENNIAL CONFERENCE, 2006, Durban. *Proceedings...* South Africa: WISA, 2006. v.30, n.5, p.51-55.
- CRUZ, O.C. da; ZANINI, J.R. Eficiência de um hidrociclone de geometria "rietema" para pré-filtragem de água para irrigação. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v.30, n.4, p.637-645, 2010. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-69162010000400008&lng=pt&nrm=iso>. Acesso em: 2 abr. 2011.
- GOROSHKO, V.D.; ROZEMBAUM, R.B.; TOEDES, O.H. Approximate relationships for suspended beds and hindered fall. *Izvestiya Vuzov, Neft'i Gaz, Priborostroenie*, v.1, p.125, 1958.
- GUPTA, C.K.; SATHIYAMOORTHY, D. *Fluid bed technology in materials processing*. New York: CRC Press, 1999. p.1-125.
- HAMAN, D.Z.; SMAJSTRLA, A.G.; ZAZUETA, F.S. *Media filters for trickle irrigation in Florida*. Gainesville: University of Florida, 1994. 5 p. (Fact Sheet AE-57). Disponível em: <<http://edis.ifas.ufl.edu/WI008>>. Acesso em: 12 jun. 2008.
- LEVA, M. *Fluidization*. New York: McGraw-Hill, 1959.
- LÓPEZ, L.P. *Simulación numérica de un lecho fluido bidimensional para la determinación de la Velocidad de mínima fluidización*. 2009. Tesis (Grado de Ingeniería Térmica) - Escuela Politécnica Superior, Universidad Carlos III de Madrid, Madrid, 2009.
- MESQUITA, M. *Avaliação dos componentes hidráulicos e do material filtrante em filtros de areia utilizados na irrigação*. 2010. 120 f. Tese (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Agrícola Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.

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

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*, London, v.92, n.3, p.383-390, 2005.

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

SHOLJI, I.; JOHNSON, F.A. Comparison of backwash models for granular media. *Journal of Environmental Engineering*, New York, v.113, p.532-549, 1987.

SIWIEC, T. *The experimental verification of Richardson-Zaki law on example of selected beds used in water treatment*. *Electronic Journal of Polish agricultural Universities*, v.10, n.2, 2007. Disponível em: www.ejpau.media.pl/volume10/issue2/art-05.html. Acesso em: jan. 2009.

SUMMERFELT, S.T.; CLEASBY, J.L. A Review of Hydraulics in fluidized-bed biological filters. *Transactions of ASAE*, St. Joseph, v.39, n.3, p.1.161-1.173, 1996.

TESTEZLAF, R. *Filtros de areia aplicados à irrigação localizada: teoria e prática*. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v.28, n.3, p.604-613, 2008.

TURAN, M.; SABAH, E.; GULSEN, H. *Influence of media characteristic on energy dissipation in filter backwashing*. *Environmental Science & Technology*, v.37, n.18, p.4.288-4.292, 2003.

VERMEREIN, L.; JOBLING, G.A. *Localized irrigation. Irrigation and drainage*. Rome: FAO, 1984. 203 p. (Paper, 36).

WEBER JR., W.J. *Control de la calidad del agua. Procesos fisicoquímicos*. Barcelona: Ed. Reverte, 1979.

WEN, C.Y.; YU, Y.H. *A generalized method for predicting the minimum fluidization velocity*. *Chemical Engineering Journal*, Lausanne, v.12, p.610-612, 1966.