

II-434 - FILTROS PERCOLADORES EM ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO: CONSIDERAÇÕES RELACIONADAS AO MEIO SUPORTE A PARTIR DA ANÁLISE DE CASOS VERIFICADOS EM ESCALA OPERACIONAL

Aliny Lucia Borges Borba⁽¹⁾

Engenheira de Produção Civil pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Mestre em Ciências Ambientais pelo Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente Urbano e Industrial (PPGMAUI) da Universidade Federal do Paraná (UFPR) e *Universität Stuttgart*. Engenheira Civil na Companhia de Saneamento do Paraná (Sanepar).

Karen Juliana do Amaral⁽²⁾

Engenheira Civil, Mestre e Doutora em Engenharia Civil, com ênfase em Recursos Hídricos, pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ) e *Universität Stuttgart*, Alemanha. Iniciou suas atividades como pesquisadora da Universidade de Stuttgart em 2010, alocada no Brasil. Desde 2001 participa de diversos projetos de cooperação nacionais e internacionais realizados entre Instituições de Ensino, órgãos públicos e indústria, de natureza nacionais e internacionais, com foco em parcerias Brasil-Alemanha. Professora do Programa de Pós-Graduação - Mestrado Internacional em Meio Ambiente Urbano e Industrial (PPGMAUI) da UFPR, *Universität Stuttgart* e SENAI-PR.

Daniela Neuffer⁽³⁾

Engenheira Civil e pós-graduada em Engenharia Civil pela *Universität Stuttgart*, Alemanha. Doutora em Técnicas de Proteção Ambiental pela *Universität Stuttgart*. Atualmente é pesquisadora e consultora da *Universität Stuttgart* no *Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte und Abfallwirtschaft* (Instituto de Engenharia Sanitária, Qualidade da Água e Resíduos Sólidos, ISWA) na *Universität Stuttgart* e na empresa TTI GmbH. Coordenadora da Dupla Diplomação e professora do Programa de Pós Graduação - Mestrado Internacional em Meio Ambiente Urbano e Industrial (PPGMAUI) da UFPR, *Universität Stuttgart* e SENAI-PR. Membro do comitê assessor AK-11.6 (Resíduos de óleo e graxas) da *Deutsch Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall* (Associação Alemã para Gerenciamento de Água, Águas Residuárias e Resíduos, DWA).

Endereço⁽¹⁾: Eng. Rebouças, 1376, Curitiba - PR - CEP: 80.215-900 - Brasil - Tel: (41) 99111-8693 - e-mail: alborba@sanepar.com.br

RESUMO

O estudo utiliza verificações teóricas e experiência observadas em escala operacional para apresentar considerações relacionadas ao meio suporte de filtros percoladores para tratamento de esgoto, abordando aspectos de projeto, implantação, operação e manutenção que influenciam o bom funcionamento desse processo unitário. O estudo apresenta, portanto, aspectos relacionados ao meio suporte que influenciam as etapas de projeto, implantação, operação e manutenção de filtros percoladores verificados em ETEs em escala operacional, apontando dificuldades verificadas em ETEs em escala operacional e soluções adotadas ou possíveis, bem como discutindo a influência dos aspectos relacionados ao meio suporte nas etapas de projeto, implantação, operação e manutenção de filtros percoladores e apontando sugestões relacionadas à utilização de meio suporte em pedra brita e em plástico estruturado de fluxo cruzado visando à melhoria dos aspectos abordados e visando o bom funcionamento de um filtro percolador em uma estação de tratamento de esgoto.

PALAVRAS-CHAVE: Tratamento de esgoto, Filtros percoladores, Meio Suporte.

INTRODUÇÃO

Os filtros percoladores utilizam o princípio da atuação de micro-organismos aderidos a um meio suporte fixo, promovendo um tratamento biológico aeróbio, sendo a aeração realizada de forma natural, a partir do fluxo de ar entre a parte interna e externa do filtro. As eficiências obtidas para remoção de matéria orgânica e a obtenção de nitrificação dependem da caracterização do afluente, do dimensionamento do filtro, das

características do meio suporte utilizado, entre outras variáveis (METCALF & EDDY, 2016; VON SPERLING E CHERNICHARO, 2005).

Por funcionar a partir de um processo de aeração natural, os filtros percoladores apresentam vantagens em relação ao consumo de energia se comparado a outros processos de aeração forçada. Por ser um processo biológico, não há demanda de produtos químicos adicionais, apresentando vantagens também se comparado a processos físico-químicos para tratamento de esgoto.

Tais aspectos tornam os filtros percoladores interessantes quanto aos custos operacionais, quanto à simplicidade de funcionamento e quanto à qualidade do efluente tratado, agregando características sustentáveis a uma ETE, sendo apontado como um processo unitário adequado, sobretudo para países em desenvolvimento como o Brasil.

OBJETIVO GERAL E OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Considerando que a degradação da matéria orgânica e a nitrificação ocorrem ao longo do meio suporte, por onde percola o afluente e onde se desenvolve a biomassa responsável pelo tratamento biológico aeróbio, o presente estudo objetiva apresentar considerações sobre a influência dos aspectos relacionados ao meio suporte nas etapas de projeto, implantação, operação e manutenção de filtros percoladores a partir da análise de casos verificados em escala operacional.

Para atingir o objetivo geral proposto, são apresentados como objetivos específicos (i) apresentar aspectos relacionados ao meio suporte que influenciam as etapas de projeto, implantação, operação e manutenção de filtros percoladores verificados em ETEs em escala operacional; (ii) apontar dificuldades verificadas em ETEs em escala operacional e soluções adotadas ou possíveis; (iii) discutir a influência dos aspectos relacionados ao meio suporte nas etapas de projeto, implantação, operação e manutenção de filtros percoladores.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para apresentar experiências práticas verificadas em ETEs em operação, o estudo adotou como cenário o Estado do Paraná, localizado na região sul do Brasil, considerando que foram identificadas diversas estações de tratamento de esgoto com filtros percoladores em uma mesma companhia de saneamento, facilitando o acesso e a compilação das informações.

Identificadas as ETEs com filtros percoladores, a cada visita realizada, foi possível analisar aspectos relacionados ao meio suporte, com o levantamento de dificuldades e soluções pertinentes, relacionando os fatos relatados e verificados em campo com afirmações teóricas, identificando a influência de tais aspectos nas etapas de projeto, implantação, operação e manutenção de filtros percoladores.

A apresentação dos resultados foi organizada por aspecto observado e analisado, descrevendo dificuldades verificadas e soluções implementadas ou possíveis. Os resultados apresentaram, portanto, as análises e discussões acerca de cada aspecto relacionado ao meio suporte e considerações sobre a influência de tais aspectos nas etapas de projeto, implantação, operação e manutenção de filtros percoladores a partir de experiências verificadas em escala operacional.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Quanto às recomendações gerais normatizadas

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), através da Norma Brasileira Regulamentadora NBR 12.209/2011 “Elaboração de projetos hidráulico-sanitários de estações de tratamento de esgotos sanitários”, recomenda que o filtro percolador seja dimensionado para atender a vazão média de projeto. A dinâmica de funcionamento de um filtro percolador, entretanto, tende a ser mais estável quando a vazão afluente tende a uma vazão constante, pois reflete diretamente na taxa de aplicação hidráulica, na carga orgânica volumétrica e no desenvolvimento do biofilme, responsável pelo tratamento biológico.

Para o meio suporte do filtro, a ABNT sugere pedra brita 4, sendo 95 % do material entre 5 e 8 cm. A Norma também cita o seixo rolado e os materiais plásticos como opção para meio suporte. A distribuição do afluente ao filtro deve ser feita por meio de sistema de distribuição rotativo, com braços e aspersores, de tal forma a manter uma vazão aplicada uniformemente, igual em qualquer ponto da área superficial do filtro (ABNT, 2011).

Para filtros de alta taxa com pedra brita, a NBR indica altura útil de até 3 m, carga orgânica volumétrica em termos de DBO menor ou igual a $1,2 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{d}$ e taxa de aplicação hidráulica menor ou igual a $50 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$, enquanto para filtros de baixa taxa, a carga orgânica recomendada é menor ou igual a $0,3 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{d}$ de DBO e taxa de aplicação hidráulica menor ou igual a $5 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ (ABNT, 2011).

Já para filtros com meio suporte plástico, a NBR sugere que a altura útil pode chegar a 12 m, com carga orgânica volumétrica em termos de DBO menor ou igual a $3 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{d}$ e taxa de aplicação hidráulica entre 10 e $75 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ (ABNT, 2011).

Os parâmetros e as recomendações citadas na NBR 12.209/2011 vão ao encontro de outras referências como Metcalf & Eddy (2016), Jordão e Pessoa (2014) e Von Sperling e Chernicharo (2005), entre outras, com pequenas variações de faixas de valores para cada parâmetro, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1: Parâmetros de projeto e taxas de operação para filtros percoladores

Tipo do filtro percolador	Baixa taxa	Alta taxa	Alta taxa
Meio suporte	Brita	Brita	Plástico
Eficiência de remoção em termos de DBO (%)	80 - 90 ⁽¹⁾ 80 - 85 ⁽⁴⁾	80 - 90 ^(1,a) 50 - 90 65 - 80 ⁽⁴⁾	70 - 90 ^(1,a) 60 - 90 65 - 85 ⁽⁴⁾
DBO efluente (mg/l)	< 30,0 ⁽¹⁾	< 30,0 ^(1,a)	< 30,0 ⁽¹⁾
Objetivo quanto à nitrificação	Ocorre nitrificação	Não ocorre nitrificação ⁽¹⁾⁽²⁾ ou Nitrificação parcial ⁽⁴⁾⁽⁵⁾	Não ocorre nitrificação
NH ₄ ⁺ efluente (mg/l)	< 5,0 ⁽¹⁾	> 5,0 ^(1,a)	> 5,0 ⁽¹⁾
Taxa de aplicação hidráulica ou Carga hidráulica ($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$)	(Baixa Taxa) 1,0 - 4,0 ⁽¹⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾ < 5,0 ⁽²⁾⁽³⁾ 1,0 - 3,6 ⁽⁷⁾	(Alta Taxa) 4,0 - 40,0 ^(1,a) 10,0 - 50,0 ⁽²⁾ < 50,0 ⁽³⁾ 10,0 - 40,0 ⁽⁴⁾⁽⁵⁾ 9,4 - 36,6 ⁽⁷⁾	(Alta Taxa) 15,0 - 75,0 ^(1,a) > 43,2 ^(1,a,P90º) 10,0 - 75,0 ⁽²⁾⁽³⁾ 12,0 - 70,0 ⁽⁴⁾
Carga orgânica volumétrica em termos de DBO ($\text{kg}/\text{m}^3 \cdot \text{d}$)	(Baixa Carga) 0,08 - 0,3 ⁽¹⁾ < 0,3 ^(2, 3) 0,1 - 0,4 ⁽⁴⁾⁽⁵⁾ 0,1 - 0,2 ⁽⁷⁾ < 0,4 ⁽⁶⁾	(Alta carga) 0,6 - 1,6 ^(1,a) < 1,2 ^(2, 3) 0,5 - 1,0 ⁽⁴⁾⁽⁵⁾ 0,4 - 1,8 ⁽⁷⁾ 0,64 - 1,6 ⁽⁶⁾	(Alta carga) 0,6 - 2,4 ^(1,a) < 3,0 ^(2, 3) 0,5 - 1,6 ⁽⁴⁾

Tabela 1: Parâmetros de projeto e taxas de operação para filtros percoladores (continuação)

Tipo do filtro percolador	Baixa taxa	Alta taxa	Alta taxa
Meio suporte	Brita	Brita	Plástico
Altura útil ^(h) (m)	1,0 - 2,5 ⁽¹⁾ 1,5 - 3,0 ⁽²⁾ 1,8 - 2,5 ⁽⁴⁾⁽⁵⁾	1,0 - 2,5 ^(1,a) 1,5 - 2,5 ⁽²⁾ 0,9 - 3,0 ⁽⁴⁾⁽⁵⁾	3,0 - 12,0 ^{(1,a)(4)} 4,0 - 12,0 ⁽²⁾
Taxa de recirculação (Q_R/Q)	0 - 1 ⁽¹⁾	1 - 2 ^(1,a)	1 - 2 ^(1,a)
Frequência de recirculação	Mínima ⁽⁴⁾⁽⁵⁾	Sempre ⁽⁴⁾	Sempre ⁽⁴⁾
Presença de moscas e vetores	Muita ⁽²⁾⁽⁴⁾	Variável ⁽²⁾⁽⁴⁾	Pouca ⁽²⁾⁽⁴⁾
Perda de biofilme	Intermitente ⁽⁴⁾	Contínua ⁽⁴⁾	Contínua ⁽⁴⁾

FONTE: ⁽¹⁾ Metcalf & Eddy (2016), ⁽²⁾ Jordão e Pessoa (2014), ⁽³⁾ ABNT (2011), ⁽⁴⁾ Von Sperling e Chernicharo (2005), ⁽⁵⁾ Chernicharo (2001), ⁽⁶⁾ WEF (2000), ⁽⁷⁾ WEF (1992).

Notas: ^(a) Aeração forçada promovida por sopradores de baixa pressão. ^(B) Pedra brita. ^(P) Plástico. ^(P90°) Plástico estruturado de fluxo vertical 90°. ^(P60°) Plástico estruturado de fluxo cruzado 60°. ^(h) Ao variar a altura útil em projeto, deve-se verificar o perfil hidráulico da ETE, a perda de carga e a necessidade de prever elevatória de recuperação de nível para a vazão afluente e para a vazão a ser recirculada.

Quanto à escolha e definição do material a ser utilizado como meio suporte

A escolha do material a ser utilizado como meio suporte pode variar conforme a eficiência desejada para a estação de tratamento. Os volumes do filtro variam conforme o meio suporte adotado. Também em função do meio suporte, diferentes materiais construtivos e soluções construtivas poderão ser adotados.

Dentre os materiais mais utilizados como meio suporte para o biofilme do filtro percolador, cita-se os materiais em pedra britada e pedra lava, que, conforme a norma reguladora, deve ter medidas entre 50 mm e 76 mm (ABNT, 1993), plásticos randômicos e plásticos estruturados.

Atualmente, inúmeros estudos realizados já verificaram o comportamento de diferentes materiais. Os materiais plásticos randômicos (não estruturados) não apresentam resistência estrutural ao peso próprio quando colonizados, não sendo, por esse motivo indicados para utilização. Conforme a biomassa aderida ao meio suporte cresce, a massa específica do meio suporte aumenta, as camadas mais inferiores sofrem esmagamento e ocorre a colmatção do filtro (METCALF & EDDY, 2016).

As pedras e os materiais plásticos são largamente utilizados, tanto em novos empreendimentos quanto em ETEs em que é necessária a substituição de meio suporte de filtros percoladores mais antigos. Nesses casos, o objetivo pode ser eliminar problemas de colmatção do meio suporte anterior ou aumentar a capacidade de tratamento do filtro existente, por exemplo (METCALF & EDDY, 2016).

As principais características físicas dos materiais mais utilizados como meio suporte estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2: Propriedades físicas dos materiais utilizados como meio suporte para filtros percoladores




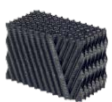
		Área superficial específica (m ² /m ³)	Índice de vazios (%)	Altura máxima do filtro (m)	Massa específica aparente (kg/m ³)
Pedra brita Pedra “lava”		50 – 70	< 55	1,5 - 2,5 ⁽¹⁾ < 3,0 ⁽²⁾⁽³⁾	1000 - 1300
Pedra “lava”		50 – 70	< 55	1,5 - 2,5 ⁽¹⁾ < 3,0 ⁽²⁾⁽³⁾	1000 - 1300

Tabela 2: Propriedades físicas dos materiais utilizados como meio suporte para filtros percoladores (continuação)

		Área superficial específica (m ² /m ³)	Índice de vazios (%)	Altura máxima do filtro (m)	Massa específica aparente (kg/m ³)
Plástico randômico ⁽⁵⁾		98 – 125	< 95	⁽⁴⁾	27 - 53
Plástico estruturado de fluxo cruzado ⁽⁵⁾		100 - 223	> 95	12,0 ⁽¹⁾⁽²⁾	25 - 45

FONTE: Adaptado de Bruce e Merkens (1970), Parker e Richards (1986) Harrison e Daigger (1987), Tchobanoglous (2003), Jordão e Pessoa (2014) e Metcalf & Eddy (2016).

Notas: ⁽¹⁾ Filtros de baixa taxa. ⁽²⁾ Filtros de alta taxa. ⁽³⁾ Altura limitada em função da manutenção da aeração natural. ⁽⁴⁾ Altura limitada em função da manutenção da aeração natural e da possibilidade de amassamento das peças plásticas devido à massa específica do biofilme aderido ao plástico. ⁽⁵⁾ Características dos materiais podem variar conforme o fornecedor.

Enquanto a altura máxima para filtros com pedra brita é de 3 m, filtros com meio suporte plástico estruturado podem ser projetados com até 12 m, por serem mais leves e por possuírem maior índice de vazios, sem prejudicar o fluxo de ar ao longo da profundidade do filtro. A maior profundidade útil do filtro aumenta o tempo de contato do líquido com a biomassa, realizando a degradação da matéria orgânica e atingindo a nitrificação do efluente no mesmo filtro.

O plástico estruturado oferece ainda uma área superficial específica maior e peso específico significativamente menor, se comparado à brita. Estas duas características implicam em redução de volume útil necessário do meio suporte e redução das dimensões do filtro, compensando no orçamento da obra o fato de que o plástico estruturado apresenta valor de aquisição maior se comparado à brita.

Por ser um material autoportante, o plástico estruturado permite a eliminação da laje de drenagem perfurada, necessária para apoiar o volume de pedra brita, e a eliminação das paredes estruturais, necessárias em função dos esforços que a brita exerce lateralmente às paredes do filtro. O fato de o plástico estruturado ser significativamente mais leve se comparado ao peso específico da pedra brita, resulta na concepção de filtros com estruturas mais esbeltas e possibilita variar soluções construtivas, refletindo em compensação ou redução de custos de obra e ainda em agilidade de execução da obra.

Na Figura 1 está exemplificado um projeto em planta e em corte de uma laje de drenagem perfurada, bem como uma imagem de um filtro com a laje instalada.

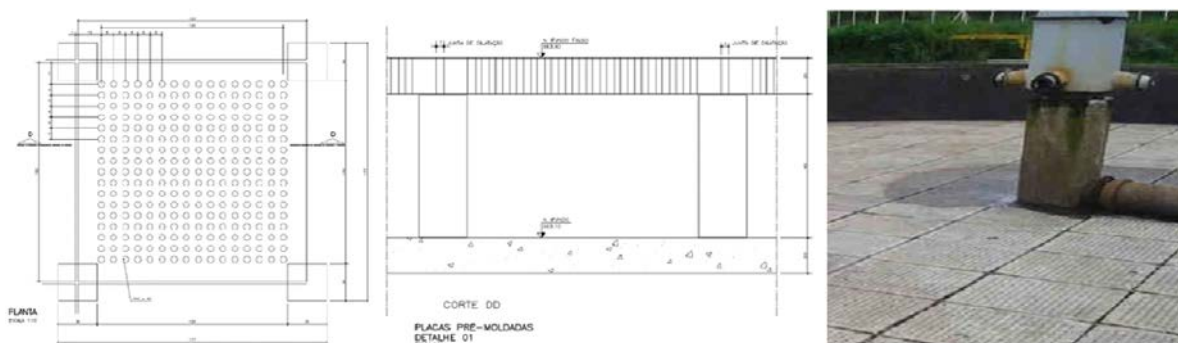


Figura 1: Laje de drenagem perfurada em filtros percoladores com meio suporte em pedra brita

Já na Figura 2 está apresentada a forma como o meio suporte plástico estruturado é apoiado, em vigas ou pilares a partir da laje de fundo, excluindo a necessidade de laje de drenagem, além de mostrar uma solução de vedação simplificada e que substitui as paredes de concreto com função estrutural.



Figura 2: Vigas ou blocos pré-moldados na laje de fundo do filtro para apoiar o meio suporte plástico estruturado e paredes laterais em alvenaria e em placas pré-fabricadas, sem função estrutural

Todas as variáveis apresentadas e discutidas influenciam cálculos e parâmetros de projeto e de operação, incluindo perda de carga, altura do meio suporte, taxa de aplicação hidráulica, carga orgânica volumétrica, área superficial disponível para desenvolvimento do biofilme e eficiência do tratamento, entre outras.

Quanto à taxa de aplicação hidráulica, por exemplo, para filtros que operam em regime de baixa taxa de aplicação hidráulica e baixa carga orgânica, a pedra brita, desde que criteriosamente selecionada, pode ser mais viável tecnicamente e financeiramente (METCALF & EDDY, 2016). Por outro lado, a alta capacidade de escoamento, o elevado índice de vazios e a menor propensão a entupimento e colmatção fazem com que os materiais plásticos estruturados sejam mais adequados para utilização em filtros que operam em regime de alta taxa de aplicação hidráulica e alta carga orgânica (METCALF & EDDY, 2016). A partir de experimentos realizados no Brasil, Almeida (2007) apontou que a pedra brita apresentou resultados mais satisfatórios se comparados aos resultados obtidos com meio suporte plástico randômico (não estruturado) quanto à remoção de matéria orgânica e conversão de nitrogênio para filtros percoladores que operam em regime de baixa taxa hidráulica e baixa carga orgânica. Por outro lado, aumentando a carga orgânica volumétrica e a taxa de aplicação superficial, os materiais plásticos empregados como meio suporte oferecem mais eficiência em relação à pedra brita, confirmando o que foi apresentado por Metcalf & Eddy (2016).

Já quanto à carga orgânica volumétrica, Grady et al. (1999) observaram que filtros percoladores com meio suporte em brita e em plástico operando com cargas orgânicas inferiores a $1,0 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{d}$ de DBO apresentaram o mesmo desempenho. Já na operação com elevadas cargas orgânicas, o plástico estruturado apresentou desempenho muito superior à brita, resultante da maior área superficial específica para fixação do biofilme e do maior índice de vazios, favorecendo a circulação de ar e o desprendimento do excesso de biofilme, natural ou provocado pela lavagem ou *flushing* (METCALF & EDDY, 2016).

Considerando que a definição do meio suporte a ser adotado influencia todas as variáveis supracitadas, o material a ser utilizado como meio suporte e suas principais características devem ser definidos em etapa de concepção do projeto. Nessa etapa, devem ser elaborados pré-dimensionamentos e estudos de viabilidade financeira, operacional e ambiental que contemplem não apenas o custo de aquisição do material, mas também as demais variações possíveis apresentadas e discutidas ao utilizar um ou outro material. Deve-se considerar que a escolha do material reflete na rotina de operação e de manutenção e na eficiência do tratamento, e, por isso, a definição da melhor opção de meio suporte deve ser realizada a partir de estudos para cada caso.

Quanto às equações de dimensionamento e aos parâmetros relacionados ao meio suporte

A área superficial específica do meio suporte é uma característica física do material, utilizada como referência para definir valores adotados para taxa de aplicação hidráulica e carga orgânica volumétrica no dimensionamento, considerando que maiores áreas superficiais específicas suportam maiores taxas hidráulicas e maiores cargas orgânicas aplicadas.

A utilização de equações de dimensionamento mais modernas como a de Velz modificada, porposta pela WEF (2011) (equação 1) e utilizada também no método de dimensionamento recentemente publicado pela DWA

(2016) (equação 2), para o cálculo da degradação de matéria orgânica, consideram, entre outras variáveis, a área superficial específica do material, de forma que os resultados de volume do filtro e de concentração de DBO e DQO do efluente final variam conforme o meio suporte adotado.

A utilização dessas equações e de métodos mais recentemente elaborados é indicada justamente por considerar mais variáveis, se comparada a equações mais antigas, tornando os resultados das estimativas de eficiência mais confiáveis. As equações são apresentadas a seguir, porém recomenda-se verificar os coeficientes e parâmetros a serem aplicados nas variáveis e verificar o método de cálculo que emprega tais equações nas respectivas referências, a citar Metcalf & Eddy (2016) e DWA (2016).

$$S_e = \frac{S_o}{(R+1) \cdot e^{\left[\frac{k_{20} \cdot A_s \cdot D \cdot \theta^{(T-20)}}{[q(R+1)]^n} \right]} - R} \quad (1)$$

Sendo:

- S_e : concentração de DBO efluente do decantador secundário (g/m^3)
- S_o : concentração de DBO afluente (g/m^3)
- R : taxa de recirculação (adimensional)
- k_{20} : constante de tratamento do filtro (l/s) 0,5/m
- A_s : área superficial específica (m^2/m^3)
- D : profundidade do meio suporte (m)
- θ : coeficiente de correção da temperatura (adimensional)
- T : temperatura do afluente ($^{\circ}C$)
- q : taxa de alimentação da superfície do filtro ($m^3/(m^2 \cdot h)$)
- n : coeficiente hidráulico (adimensional)

$$S_{DQO, \text{ efluente } \epsilon} = \frac{S_{DQO, \text{ afluente } \epsilon}}{e^{\frac{A_{esp} \cdot k_{20} \cdot \theta_{C, 20^{\circ}C}^{(T-20)} \cdot h_{\epsilon}}{q_A^n}}} \quad (2)$$

Sendo:

- ϵ : segmento do filtro percolador a ser calculado (m)
- $S_{DQO, \text{ efluente } \epsilon}$: concentração de DQO do efluente do segmento ϵ (mg/l)
- $S_{DQO, \text{ afluente } \epsilon}$: concentração de DQO do afluente do segmento ϵ (mg/l)
- A_{esp} : área superficial específica (m^2/m^3)
- k_{20} : coeficiente de tratabilidade ($(m^3/(h \cdot m^2))^n$)
- $\theta_{C, x^{\circ}C}$: fator de correção da temperatura (adimensional)
- T : temperatura do afluente ($^{\circ}C$)
- h_{ϵ} : altura do segmento ϵ (m)
- q_A : taxa de alimentação da superfície do filtro ($m^3/(m^2 \cdot h)$)
- n : coeficiente hidráulico (adimensional)

É importante realizar cálculos de pré-dimensionamento na etapa de concepção e conferir o dimensionamento em etapa de detalhamento de projeto, de acordo com as demais variáveis definidas. A alteração do meio suporte em etapas posteriores de detalhamento de projeto implica em revisão dos cálculos de perda de carga, das variáveis e parâmetros de entrada e revisão dos projetos hidráulico, estrutural e geotécnico, entre outros.

A substituição do material utilizado como meio suporte em um filtro já em operação, por motivos de colmatção ou de necessidade de melhoria da qualidade final do efluente tratado, também demanda revisão de todos os cálculos de dimensionamento, além da conferência dos parâmetros de projeto e de operação adequados ao objetivo do filtro quanto à remoção de matéria orgânica e quanto à realização de nitrificação.

Quanto ao cálculo de perda de carga variando em função do material utilizado como meio suporte

Metcalf & Eddy (2016) apresentam as equações 3 e 4, que relacionam a perda de carga à velocidade superficial de escoamento, entre outras variáveis.

$$N_P = 10,33 \cdot (D) \cdot e^{(1,36 \cdot 10^{-5}) \left(\frac{L}{A}\right)} \quad (3)$$

$$\Delta P = N_P \cdot \left(\frac{v^2}{2 \cdot g}\right) \quad (4)$$

Sendo:

- N_P : número de resistência da torre (adimensional)
 D : altura do meio suporte (m)
 L : carga de líquido (kg/h)
 A : área da seção transversal do enchimento da torre (m²)
 ΔP : perda de carga total (kPa)
 g : aceleração gravitacional (m/s²)
 v : velocidade de escoamento superficial (Q/A) (m/s)

Tais equações foram originalmente concebidas para meio suporte plástico de fluxo vertical. Apesar de não haver equações similares para determinação da resistência para outros materiais utilizados como meio suporte, WEF (2010) e Metcalf & Eddy (2016) apresentam fatores de correção para brita, plástico randômico e plástico estruturado de fluxo cruzado, conforme a Tabela 3.

Tabela 3: Fatores de correção para cálculo de perda de carga em diferentes matérias utilizados como meio suporte

Meio suporte	Área superficial específica (m ² /m ³)	Fator de correção
Brita	45	2,0
Plástico randômico	100	1,6
Plástico estruturado de fluxo cruzado	100	1,3
	140	1,6

FONTE: Adaptado de WEF (2010) e Metcalf & Eddy (2016).

Em etapa de projeto, portanto, o meio suporte a ser empregado deve ser considerado inclusive para verificação da perda de carga e do perfil hidráulico da ETE.

Quanto à especificação da pedra brita e do meio suporte plástico estruturado

Para projetos com meio suporte em pedra brita, deve-se especificar a granulometria ideal, conforme recomenda a literatura e as normas regulamentadoras, bem como as características geomorfológicas da pedra. Materiais de origem sedimentar podem fragmentar e gerar material de granulometria inferior à estabelecida, produzindo quantidades não desejadas de pó de pedra, resultando na aceleração do processo de colmatção em um filtro, prejudicando e comprometendo a operação do filtro percolador e a influência do tratamento.

Para projetos com meio suporte plástico estruturado, deve-se definir a área superficial específica, o tipo de plástico e a resistência estrutural necessária para o plástico, considerando o peso próprio do meio suporte somado ao peso da biomassa aderida. Ao definir tais características, é importante observar o que está disponível em mercado, para que a especificação não restrinja o número de fornecedores. Para garantir que as camadas mais inferiores suportem o peso específico de todo o meio suporte e da biomassa aderida, as peças de plástico devem ser fabricadas com plástico de maior densidade. As camadas mais superiores poderão ser especificadas com plástico de menor densidade, reduzindo os custos de aquisição, porém o material deve ter resistência suficiente para que seja possível caminhar sobre o meio suporte sem danificar a superfície do filtro, conforme situação de amassamento do material exemplificada na Figura 3.



Figura 3: Meio suporte plástico estruturado em PVC, com a superfície danificada ao longo do tempo

Outra característica do meio suporte que pode interferir na eficiência do filtro percolador e que pode ser especificada em projeto é a rugosidade da superfície do material. Estudos realizados por Almeida (2007) indicam que há uma possível relação entre a rugosidade da superfície em que o biofilme se forma, a fixação e o desenvolvimento do biofilme e a consequente eficiência do filtro e que alguns fatores como o menor índice de vazios e a maior rugosidade da superfície da pedra facilitam a fixação da biomassa e o desenvolvimento do biofilme. Em experimentos realizados, Medeiros (2011) verificou que a velocidade de formação do biofilme na pedra brita foi significativamente maior se comparada à do meio suporte plástico randômico, atribuindo esta verificação ao fato de a rugosidade da superfície da pedra ser maior em relação à da superfície do material plástico, facilitando a aderência e fixação do biofilme em formação.

Enquanto a pedra brita apresenta mais rugosidade, favorecendo a aderência e fixação do biofilme na superfície, materiais plásticos tendem a ser menos rugosos, podendo dificultar a fixação do biofilme quando operando a baixas taxas de aplicação, podendo inclusive perder biofilme no efluente em função da dificuldade de fixação do mesmo na superfície plástica.

É importante, portanto, especificar a rugosidade mínima do material, tal que permita a fixação e o desenvolvimento da biomassa. Estudos realizados no Brasil em escala experimental (ALMEIDA, 2007; MEDEIROS, 2011) observaram o crescimento do biofilme em pedra brita e em meio suporte plástico randômico (não estruturado), submetidos ao mesmo afluente e à mesma taxa de aplicação hidráulica. Ambos experimentos relataram que o biofilme se desenvolveu mais facilmente na pedra brita, relacionando esse fato a uma possível dificuldade de fixação do biofilme no plástico em função da rugosidade do material.

Quanto a dificuldades relacionadas ao orçamento e à aquisição do meio suporte

Ao elaborar o orçamento de obra, ainda em etapa de projeto devem ser previstos os custos conforme os fornecedores disponíveis para cada obra. O projeto deve pesquisar fornecedores que atendam às especificações mínimas, prezando pela qualidade dos materiais e insumos. Para a pedra brita, deve-se prever detalhes como, por exemplo, a distância média de transporte entre a obra e uma jazida que atenda às especificações, enquanto que, para o plástico estruturado, deve-se prever variações cambiais que impactem os custos de importação ou variações de preço do produto no intervalo de tempo entre a elaboração do projeto e a execução da obra.

A partir de relatos de diferentes unidades regionais de obra da companhia de saneamento analisada, foi possível identificar que há dificuldades quanto ao fornecimento de pedra brita que atenda às especificações de projeto, seja quanto à granulometria ou quanto à qualidade da pedra, que não pode ser de origem sedimentar. Algumas unidades relataram que foi necessário revisar o orçamento, pois o fornecedor que atendia às especificações estava a uma distância média de transporte superior à considerada em projeto. Em outras unidades, foi relatada a necessidade de lavagem e de seleção do material entregue, em função de granulometria diferente da especificada e da presença de pó de pedra. Em ambos os casos, o custo real do material sofreu alterações em relação ao orçamento inicial, considerando as distâncias entre a obra e a jazida ou a mão de obra adicional utilizada para lavagem e seleção do material. Uma análise realizada para um caso específico de obra estima que o valor real pode ser da ordem de duas a três vezes superior, se comparado ao valor considerado em projeto.

Considerando os casos verificados, ressalta-se a importância de analisar de forma detalhada as possibilidades de fornecedores ainda em etapa de concepção do projeto. Da mesma forma, ressalta-se a importância e o papel fundamental que a fiscalização da obra exerce ao aprovar ou reprovar um material, atentando para o que está especificado. As dificuldades ou falhas de projeto ou de obra tendem a refletir em problemas operacionais que comprometem o bom funcionamento e a eficiência esperada para o tratamento.

Quanto à presença de pó de pedra no meio suporte e de resíduos sólidos no afluente ao filtro, dificuldades de operação e necessidade de manutenção preventiva e corretiva do meio suporte

Nos filtros com pedra brita analisados, foram verificados problemas relacionados à colmatção. Dentre os motivos que levaram à colmatção parcial ou total do meio suporte, pode-se citar a qualidade da pedra brita e a presença de pó de pedra, já discutidos anteriormente, bem como a presença de materiais sólidos e de gorduras no afluente ao filtro. A figura 4 exemplifica na primeira foto uma situação de um filtro com pedra brita colmatado e, na segunda foto, um filtro operando após a substituição do meio suporte em brita por plástico estruturado.



Figura 4: Filtro perclador antes e depois da substituição do meio suporte colmatado

A presença de resíduos e gorduras no afluente ao filtro pode estar relacionada a possíveis deficiências ou falhas de projeto, obra ou operação do gradeamento e peneiramento fino e desarenador, bem como do reator anaeróbio, incluindo detalhes de projeto e rotinas de operação para remoção de espuma ou descarte de lodo, implicando em uma quantidade de sólidos não desejada no afluente ao filtro, provocando acúmulo de sólidos, zonas mortas, e caminhos preferenciais, resultando em colmatagem, maus odores e ineficiência do tratamento. O projeto, a operação, a manutenção e a limpeza periódica de sistemas eficientes de remoção de sólidos, areia e gorduras a montante dos filtros percoladores é, portanto, fundamental para o funcionamento adequado de toda a ETE, influenciando principalmente o meio suporte do filtro e a eficiência esperada para o tratamento.

Deve-se prever gradeamento médio e gradeamento ou peneiramento fino no tratamento preliminar, bem como estabelecer rotinas de operação, limpeza e manutenção adequadas para todos os processos a montante do filtro.

Quanto aos reatores anaeróbios, o projeto deve prever soluções e mecanismos que facilitem a operação, a retirada de espuma periódica e o descarte de lodo adequado. Ao longo das visitas realizadas, foram verificados varios casos em que as ETEs não dispunham de gradeamento ou peneiramento fino, bem como vários casos em que não era realizada a retirada de espuma, implicando em perda de sólidos e gorduras no afluente do filtro percolador, acelerando processos de colmatagem e reduzindo ou comprometendo a eficiência do tratamento.

Quanto aos filtros percoladores, deve-se realizar vistoria e limpeza periódica no sistema de distribuição do afluente ao filtro, observando a desobstrução dos orifícios e a limpeza interna dos braços de distribuição do afluente. A literatura recomenda ainda a prática de lavagem (*flushing*) do meio suporte, realizada a partir da desaceleração da rotação do sistema de distribuição, com cálculos específicos para estabelecer a variação de taxa de aplicação hidráulica visando eliminar camadas de biofilme excedente para preservar a atividade aeróbia da biomassa responsável pelo tratamento.

Quanto a ações e desdobramentos relacionados à utilização da pedra brita e à utilização de meio suporte plástico estruturado de fluxo cruzado

A Tabela 4 e a Tabela 5 reuniram, respectivamente, sugestões de ações e desdobramentos relacionados à utilização de meio suporte em pedra brita e em plástico estruturado de fluxo cruzado, elaboradas a partir das verificações teóricas e da observação de experiências práticas em escala operacional.

Tabela 4: Ações e desdobramentos relacionados à utilização de meio suporte em pedra brita

Ação	Desdobramentos
Priorizar a utilização de pedra brita para filtros percoladores de baixa taxa	Utilizar pedra brita preferencialmente para filtros percoladores de baixa taxa (a literatura não exclui a possibilidade de utilização de pedra brita em filtros de alta taxa, porém os detalhes de projeto e as ações de operação e manutenção relacionadas à prevenção de colmatção devem ser fundamentalmente praticadas)
Estudar o uso combinado de filtros percoladores em alta e baixa taxa	Verificar a viabilidade do uso combinado de filtros percoladores em alta taxa com meio suporte plástico dimensionados para o abatimento de carga orgânica seguidos de filtros percoladores em baixa taxa com pedra brita dimensionados para promover a nitrificação, aproveitando assim as melhores características dos dois materiais
Estabelecer padrão de qualidade da pedra brita a ser fornecida	Elaborar especificação que contemple, além da faixa granulométrica, outras características como tipo de rocha, porosidade, rugosidade, entre outras, enfatizando a necessidade de lavagem após peneiramento e a importância da ausência de pó de pedra
Elaborar projeto com filtro percolador apoiado, sem parede dupla	Permitir melhor fluxo de ar entre o meio suporte e o ambiente externo, principalmente para materiais com índice de vazios reduzido como as pedras
Elaborar orçamento atualizado e preciso em etapa de projeto, com revisão em fase de licitação de obra	Considerar distância média de transporte da obra à jazida qualificada para fornecimento de material de qualidade, excluindo eventualmente jazidas mais próximas que não atendem aos requisitos mínimos de qualidade da pedra brita, evitando aditivos de valor em função do transporte do material da jazida ao local da obra
Fiscalizar obras de forma atuante e rígida	Exigir parâmetros de qualidade estabelecidos na especificação de projeto e desenvolver métodos padronizados aplicáveis à fiscalização da obra
Prever orçamento para lavagem da pedra brita antes da disposição no filtro	Padronizar a atividade de lavagem da pedra brita como obrigatória antes de inserir o material no interior do filtro para eliminar o pó de pedra, visando prevenir o filtro da colmatção ocasionada pelo pó de pedra
Prevenir processos de colmatção, formação de caminhos preferenciais e zonas mortas	Realizar operação e manutenção preventiva previstas e recomendadas para todos os processos a montante e para o meio suporte, visando à manutenção da alimentação uniforme em todo o volume de meio suporte, e definir rotina de lavagem ou <i>flushing</i> com base nas recomendações de literatura, adaptado à realidade operacional e ao crescimento do biofilme em cada ETE
Testar materiais semelhantes à pedra brita	Realizar busca e experimentos com outros materiais semelhantes à pedra brita para compor o meio suporte, tais como pedra lava, escória de alto forno, entre outros
Realizar ações periódicas de vistoria na rede coletora de esgoto	Vistoriar a rede coletora de esgoto periodicamente para identificar possíveis lançamentos irregulares que contenham quantidade excessiva de gorduras, atentando para vistoriar também se os empreendimentos ou residências possuem caixa de gordura adequada

Tabela 5: Ações e desdobramentos relacionados à utilização de meio suporte plástico estruturado de fluxo cruzado

Ação	Desdobramentos
Priorizar a utilização de plástico estruturado para filtros percoladores de alta taxa	Utilizar o plástico estruturado para filtros que objetivam receber altas taxas de aplicação hidráulica e altas cargas orgânicas volumétricas, não excluindo a possibilidade de realização de nitrificação no mesmo filtro, considerando a realização de recirculação
Estudar taxas de aplicação hidráulica para realização de nitrificação	Verificar taxas de aplicação hidráulica e faixas de operação adequadas para realização de nitrificação, considerando a realização de recirculação
Projetar filtros considerando a possibilidade de aumentar a altura útil do meio suporte em etapa futura	Prever incremento de altura útil do meio suporte para aumentar o volume total, aumentando a eficiência do tratamento
Estudar todos os aspectos e fatores que podem compor uma análise de viabilidade para utilização de meio suporte plástico estruturado	Levantar todos os aspectos significativos e que representam custos nas etapas de projeto, implantação, operação e manutenção de filtros percoladores para compor uma análise de viabilidade para utilização de meio suporte plástico estruturado
Estudar o uso combinado de filtros percoladores em alta e baixa taxa	Verificar a viabilidade do uso combinado de filtros percoladores em alta taxa com meio suporte plástico dimensionados para o abatimento de carga orgânica seguidos de filtros percoladores em baixa taxa com pedra brita dimensionados para promover a nitrificação, aproveitando assim as melhores características dos dois materiais
Estabelecer padrão de qualidade do meio suporte plástico a ser fornecido	Elaborar especificação que contemple tipo de plástico, resistência estrutural e mecânica, rugosidade suficiente para aderência da biomassa, entre outras características físicas importantes para o funcionamento adequado
Utilizar soluções de construção inovadoras nos projetos	Considerar materiais e métodos construtivos alternativos que passam a ser aplicáveis quando se utiliza o meio suporte plástico estruturado, que permite estruturas mais esbeltas, eliminação de laje de drenagem e fechamento lateral com materiais leves
Prever ações para evitar a formação de moscas, vetores e caramujos	Realizar operação e manutenção preventiva recomendada para prevenir a formação de moscas, vetores e caramujos, sendo que a proliferação de caramujos inibe a nitrificação e requer especial atenção
Estudar o estabelecimento da biomassa e a manutenção da eficiência ao longo de anos de uso do filtro percolador com meio suporte plástico estruturado	Observar o tempo de formação e estabilização do biofilme e relacionar o comportamento da biomassa aos resultados de eficiência
Estudar o aproveitamento real obtido com o incremento de área superficial específica	Comparar área superficial específica e ganho de eficiência para obter resultados quanto ao aproveitamento real obtido com o ganho de área superficial específica do meio suporte plástico, sendo tais resultados importantes para compor uma análise de viabilidade de utilização do meio suporte plástico estruturado
Fomentar o desenvolvimento de materiais plásticos nacionais	Buscar possíveis desenvolvedores e fornecedores para produzir meio suporte plástico estruturado de fluxo cruzado visando fomentar a produção nacional e reduzir o custo de aquisição desse material, tornando o material mais viável economicamente e ambientalmente

CONCLUSÕES

O estudo analisou estações de tratamento de esgoto com filtros percoladores em escala operacional e verificou aspectos relacionados ao meio suporte e a influência de tais aspectos nas etapas de projeto, implantação, operação e manutenção desse processo unitário de tratamento.

Os aspectos verificados no estudo foram relacionados à escolha e definição do material a ser utilizado como meio suporte; às equações e parâmetros de dimensionamento de filtros percoladores; à verificação da perda de carga hidráulica em função do meio suporte; às especificações técnicas da pedra brita ou do meio suporte plástico estruturado; às dificuldades para elaboração de orçamento e para aquisição do material; à presença de pó de pedra na brita e à presença de resíduos sólidos no meio suporte, ocasionando a colmatção dos filtros; e às dificuldades operacionais e necessidades de manutenções preventivas e corretivas nas ETES com filtros percoladores.

Todas as considerações foram apresentadas a partir de casos práticos verificados em estações de tratamento de esgoto em escala operacional, a partir de uma abordagem teórica e de experiências de projeto, obra e operação e manutenção de filtros percoladores.

As soluções verificadas que minimizam ou eliminam os problemas e as dificuldades constatadas são simples e podem ser facilmente previstas nas etapas de projeto e obra, ou, dependendo do caso, podem ser contornadas pela operação e pela realização de manutenção preventiva ou corretiva, visando sempre o funcionamento adequado e a qualidade do efluente.

A definição do material ideal para meio suporte deve considerar o objetivo do filtro percolador quanto à nitrificação, a área superficial específica para cada material para meio suporte, os custos de aquisição e os custos indiretos relacionados, bem como a durabilidade do material, o índice de vazios para que ocorra boa circulação de ar e minimização da colmatção e entupimentos, entre outros, compondo uma análise de viabilidade que aborde aspectos relacionados às etapas de concepção, dimensionamento, projeto, implantação, operação e manutenção.

Deve-se ressaltar ainda que para definição do meio suporte a ser adotado, quando da análise de viabilidade, deve-se verificar o custo da obra considerando não apenas o custo de aquisição do material adotado, mas ainda outros fatores como volume de meio suporte necessário, estrutura de concreto armado necessária, eficiência obtida, facilidades de operação e manutenção, entre outros aspectos que impactam principalmente as etapas de implantação, operação e manutenção, sendo que as experiências observadas em escala operacional confirmam e complementam o que está apresentado em literatura nacional e internacional, a citar referências como Metcalf & Eddy (2016), Jordão e Pessoa (2014), Von Sperling e Chernicharo (2005), entre outras.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALMEIDA, P. G. S. Efeito de diferentes tipos de meio suporte no desempenho de filtros biológicos percoladores aplicados ao pós-tratamento de efluentes de reatores UASB, com ênfase na nitrificação. Dissertação. Escola de Engenharia Universidade Federal de Minas Gerais-UFMG, 113p. Belo Horizonte. 2007.
2. ALMEIDA, P. G. S.; OLIVEIRA, S. C.; CHERNICHARO, C. A. L. Operação de filtros biológicos percoladores pós reatores UASB sem a etapa de decantação secundária. Engenharia Sanitária e Ambiental, v.16 n.3, 271-280. 2011.
3. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12.209: Elaboração de projetos hidráulico-sanitários de estações de tratamento de esgotos sanitários. Rio de Janeiro, 2011.
4. DWA. *Bemessung von Kläranlagen in warmen und kalten Klimazonen* (Dimensionamento de Estações de Tratamento de Esgoto em climas quentes e frios). p.84-108, p.260-274. Essen. 2016.
5. JORDÃO, Eduardo Pacheco; PESSÔA, Constantino Arruda. Tratamento de esgotos domésticos. 7 ed. Rio de Janeiro: ABES, 2014.
6. MEDEIROS, M. Pós Tratamento de efluente de lagoa facultativa fotossintética em filtros biológicos percoladores visando a remoção de nitrogênio amoniacal. 132p. São Paulo. 2011.

7. METCALF & EDDY, Inc. Tratamento de efluentes e recuperação de recursos. 5thEd. 1980p. Porto Alegre 2016.
8. VON SPERLING, M.; CHERNICHARO, C. A. de L. *Biological wastewater treatment in warm climate regions*. 1st. Ed. IWA UFMG. London. 2005.
9. WEF - Water Environment Federation. "Design of Municipal Wastewater Treatment Plant - WEF Manual of Practice N°8. Washington, EUA (1992).
10. WEF - Water Environment Federation. *Aerobic Fixed-Growth Reactors*. (2000).