

# Flotação por ar dissolvido aplicada no tratamento de efluente de leitos de drenagem

## *Dissolved air flotation applied to drainage effluent treatment*

• **Data de entrada:**  
27/09/2017

• **Data de aprovação:**  
15/03/2018

André Luiz de Oliveira\* | Nilton Fernandes de Oliveira

DOI: <https://doi.org/10.4322/dae.2019.032>

### Resumo

Neste trabalho foi avaliada a qualidade da água de lavagem de filtros e do lodo de decantador da Estação de Tratamento de Água Bom Jardim, localizada na cidade de Uberlândia-MG, após tratamento sequencial por leito de drenagem, flotação por ar dissolvido e filtração (LD-FAD-F), todos em escala de bancada. Foram avaliados os efluentes de leitos de drenagem compostos de três tipos de mantas geotêxteis distintas (LD1, LD2 e LD3). Os experimentos foram conduzidos inicialmente sem adição de agente coagulante ou auxiliar de coagulação/floculação na FAD, e em seguida foram conduzidos experimentos nos quais foram avaliadas as dosagens de Sulfato de Alumínio de 5, 10 e 15 mg/L. Os resultados obtidos confirmaram a eficiência do sistema e sua potencialidade de utilização no tratamento desse tipo de resíduo de ETA. Independentemente do leito de drenagem avaliado, o sistema FAD-F foi capaz de remover, em média, 95% de cor aparente, 98% de turbidez e 80% de cor verdadeira.

**Palavras-chave:** Leito de Drenagem. Flotação por Ar Dissolvido. Filtração.

### Abstract

*In this study, we evaluated the quality of the filter backwash water and sludge decanter Water Treatment Plant, located in Uberlandia, Minas Gerais, after sequential treatment with drainage bed, dissolved air flotation and filtration (LD -FAD-F), all in bench scale. They were evaluated effluent drainage bed made up of three distinct types of geotextile webs (LD1, LD2 and LD3). The experiments were first conducted without adding coagulant or aids in the coagulation/flocculation FAD and were then conducted experiments in which we evaluated the aluminum sulfate dosages of 5, 10 and 15 mg/L. The results obtained confirmed the efficiency of the system and their potential use in the treatment of such WTS. Regardless of the drainage bed evaluated FAD-F system was able to remove, on average, 95% of apparent color, turbidity 98% and 80% true color.*

**Keywords:** System Draining Beds. Dissolved Air Flotation. Filtration.

**André Luiz de Oliveira** – Engenheiro Civil pela Universidade Federal de Viçosa (UFV). Mestre e Doutor em Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP). Professor Associado da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia.

**Nilton Fernandes de Oliveira** – Engenheiro Ambiental pela Universidade de Uberaba (UNIUBE). Mestre em Engenharia Civil, com ênfase em Infraestrutura Engenharia Urbana, Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pela Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia.

\***Endereço para correspondência:** Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 1Y, UFU - Campus Santa Mônica, Uberlândia-MG. CEP: 38408-100. E-mail: andreoliveirafeciv@gmail.com.

## 1 INTRODUÇÃO

Os leitos de drenagem surgiram de uma adaptação dos leitos de secagem convencionais basicamente pela introdução de mantas geotêxteis como meios filtrantes. Os primeiros trabalhos para caracterização e avaliação da capacidade filtrante de tais mantas surgiram na década de 90. Até então, o leito de secagem tradicional era o sistema natural de desaguamento de resíduos de ETAs mais utilizado e não apresentou alterações significativas estruturais até a proposição do leito de drenagem, em que houve a substituição da areia pela manta geotêxtil. A partir daí os leitos de drenagem foram avaliados em função da eficiência de filtração e da vida útil do material sintético, da interferência do diâmetro dos poros dos geotêxteis na colmatação e na qualidade da água drenada, além de diversos outros estudos.

A técnica de leito de drenagem assemelha-se à filtração, em que as partículas formam uma torta na superfície do meio filtrante e essa massa de sólidos retida também atua como filtro (RICHTER, 2001). No leito de drenagem, o tempo de remoção da água constitui-se na soma do tempo de drenagem e de evaporação da água, evidenciando, desta maneira, a importância das condições climáticas e de drenagem neste procedimento.

Dentre os trabalhos desenvolvidos com leitos de drenagem, destacam-se aqueles elaborados por Martel (1989), Theriault (1991), Koerner & Koerner (1992), Cordeiro et al. (2001), Achon e Cordeiro (2003), Mendonça et al. (2004), Mortara (2011), Barroso (2007) e Santos (2012).

Martel (1989) avaliou em escala de laboratório a eficiência de um sistema natural de desaguamento, constituído de coluna de acrílico com diâmetro de 15 cm e funil na base para recolhimento do drenado no tratamento de lodo congelado. Na base da coluna foi posicionado o leito composto por cascalho, manta geotêxtil, areia

e novamente geotêxtil para evitar a mistura do lodo com a areia do sistema. O autor avaliou a interferência do congelamento e descongelamento do lodo no desaguamento do mesmo. Os resultados observados não foram conclusivos quanto à sua eficiência, evidenciando a necessidade de mais estudos em que fossem observados outros parâmetros de controle, como o clima da região de implantação do sistema.

Theriault (1991) observou um menor tempo de drenagem quando substituiu a areia do leito de secagem por manta geotêxtil e reforçou as vantagens e benefícios do sistema natural de desaguamento, destacando os baixos custos para implementação em função principalmente da exigência de menores áreas.

Para Cordeiro et al. (2001), em locais onde há a disponibilidade de grandes áreas próximas às ETAs, a adoção desses leitos é a solução mais fácil, uma vez que não são elevados os custos relacionados ao transporte do lodo e de retorno da água drenada. Para instalação de um leito de drenagem, é interessante que a área esteja situada em cotas mais baixas que os decantadores, evitando o bombeamento do lodo bruto.

Achon e Cordeiro (2003) destacam o desempenho dos leitos de drenagem, observando tempo de desaguamento do lodo de 7 dias, enquanto lagoas de lodo podem levar até meses para a remoção da água. Comparando o desaguamento de lodos gerados a partir de aplicação de distintos coagulantes, relatam que lodos de ETAs com cloreto de poli alumínio ou sulfato de alumínio, quando submetidos ao desaguamento por leito de drenagem, apresentam como resultado final redução semelhante de volume e porcentagem de sólidos totais. No entanto, o tempo de drenagem foi menor para o lodo com cloreto de poli alumínio.

Barroso (2007), após extensa investigação a respeito da aplicação de leitos de drenagem para

tratamento do lodo de ETAs com diferentes coagulantes primários, observou que o desempenho desse sistema para redução de volume alcançou cerca de 80% e 90% para os lodos de sulfato de alumínio e poli cloreto de alumínio e teor de sólidos de 30% a 90%, sem consumo de energia ou adição de produtos químicos, respectivamente. Na fase de drenagem, verificou que, independentemente do tipo e volume de lodo aplicado, a vazão de drenagem foi maior quanto menor o valor da taxa de aplicação de sólidos. O dreno/filtro constituído pelas mantas apresentou grande capacidade drenante de água livre e uma distribuição de tamanho dos poros capaz de reter partículas floculentas ou discretas.

Santos (2012) avaliou a influência parcial das condições climáticas no funcionamento de leitos de drenagem. Para tanto, avaliou o desempenho de seis leitos de drenagem em escala reduzida em diferentes condições de taxa de aplicação de sólidos (*TAS*). Em três leitos de drenagem, a influência das condições climáticas foi parcialmente limitada pela manutenção lateral de anteparos (que impediam a ação dos ventos na superfície dos leitos). Ao final dos experimentos, concluiu que os leitos de drenagem parcialmente protegidos produziram, para o mesmo tempo de ensaio, lodo com umidade 50% superior ao dos leitos de drenagem sem os anteparos laterais. Ressalta que, mesmo assim, as concentrações de sólidos obtidas foram elevadas; entretanto, para um tempo maior de operação. Esse trabalho foi importante no sentido de mostrar que, mesmo em condições climáticas desfavoráveis, o sistema de leito de drenagem pode ser usado com sucesso para o desaguamento de lodo de *ETAs*. Já em termos de qualidade do drenado, ressalta-se que não foram observadas diferenças significativas uma vez que as características deste tipo de efluente estão ligadas diretamente às características do geotêxtil utilizado na base do *LD*. Observa-se no drenado presença de sólidos suspensos e de metais precipitados (principalmente

os utilizados na coagulação). Este efluente mostra-se, portanto, susceptível ao tratamento por algum processo físico-químico de separação de fases, como é o caso do sistema de flotação por ar dissolvido (*FAD*).

Dentre as diversas modalidades de flotação, a *FAD* é a mais utilizada na área de saneamento, com eficiência comprovada no tratamento de água de abastecimento, em especial quando se trata de água de reservatório eutrofizado, e também no tratamento de efluentes, principalmente secundários, com vários trabalhos já publicados que corroboram sua aplicação também para esse fim.

A flotação tem várias vantagens sobre a sedimentação por gravidade, destacando-se: possibilidade de produção de água de melhor qualidade; operação em taxas de aplicação mais altas, resultando em estações de tratamento mais compactas; início de operação mais rápido; concentração de sólidos no lodo significativamente superior à produzida na sedimentação e menor tempo de detenção em uma estação de tratamento. Malley e Edzwald (1991) realizaram um estudo em que a flotação por ar dissolvido (*FAD*) foi comparada à sedimentação por gravidade (*SG*) em experimentos de laboratório, utilizando águas naturais e sulfato de alumínio como coagulante. Os ensaios de *FAD* foram conduzidos em um flotador de bancada e produziram resultados de turbidez remanescente significativamente inferiores aos obtidos com sedimentação para dois tipos de águas naturais, particularmente em temperaturas mais baixas. A diferença no desempenho entre *FAD* e *SG* pode ser explicada devido ao tamanho e densidade das partículas, temperatura e velocidade de sedimentação descritas pela *Lei de Stokes*. Os autores concluíram que a grande quantidade de microbolhas gerada durante a recirculação proporcionou condições (oportunidades) adequadas para a colisão entre as partículas e bolhas

de gás, reduzindo, assim, o tempo de floculação de 20 minutos obtido na sedimentação para 5 minutos na flotação, para obter os mesmos valores de turbidez remanescente.

O sistema de flotação por ar dissolvido (*FAD*) é composto basicamente de dois subprocessos: coagulação/floculação, responsável pela desestabilização das partículas e formação dos flocos e flotação, responsável pela remoção dos flocos por meio da agregação em microbolhas de ar. Lundh, Jonsson e Dahlquist (2002) afirmam que o mecanismo de flotação por ar dissolvido é descrito por pequenas bolhas de ar que aderem às partículas suspensas presentes na água; a ideia é gerar aglomerados com menor densidade que a água, causando a ascensão do floco até a superfície. As bolhas de gás são geradas pela redução da pressão de um fluxo de água saturada com ar. Uma parcela de ar dissolvido é liberada em forma de pequenas bolhas, usualmente menores que 100  $\mu\text{m}$  de diâmetro, da fase líquida para a gasosa. Para Di Bernardo (2001), o tamanho das bolhas é muito importante na flotação, pois bolhas pequenas, além de apresentarem maior superfície específica para a mesma quantidade de ar, necessitam deslocar menor quantidade de água da superfície das partículas onde vão aderir. Existe relação entre o diâmetro médio da bolha e a pressão de saturação, sendo que, em geral, o diâmetro da bolha é maior quanto menor for a pressão, dependendo do tipo de difusor. Segundo Hahn (1982), o tamanho das bolhas é da ordem de 100  $\mu\text{m}$  (ou menores) em sistemas de tratamento de águas residuárias.

Segundo Adin (1999), a remoção de sólidos particulados (já existentes ou formados pela coagulação/floculação) deve-se principalmente à habilidade que as pequenas bolhas têm para capturar os sólidos particulados/flocos. De fato, Edzwald (1995) afirma que a eficiência da *FAD* é fundamentalmente dependente da formação de pequenas bolhas de ar (dependente da pressão

de saturação) e do contato promovido entre essas bolhas e os flocos na zona de reação.

Independentemente de se prever um sistema de tratamento que emprega a sedimentação ou a flotação para remoção dos sólidos suspensos obtidos na floculação, na sequência do tratamento geralmente são previstas unidades de filtração, que têm a função de remover partículas suspensas e coloidais e microrganismos presentes na água que escoam através de um meio poroso, que atravessaram as unidades precedentes. Assim sendo, a filtração é o processo final da maioria das estações de tratamento de água no Brasil, antes da desinfecção e, atualmente, em configurações mais modernas, compõe sistemas de pós-tratamento de esgoto (OLIVEIRA, 2007).

De acordo com Di Bernardo (2001), a retenção de impurezas pela filtração é considerada resultado de dois mecanismos distintos, porém complementares: aderência e transporte. Os mecanismos de transporte são impacto inercial, interceptação, sedimentação, difusão e ação hidrodinâmica, e os mecanismos de aderência são interação combinada das forças eletrostáticas e de *Van Der Waals* e interação química. Iniciado o funcionamento e considerando constante a vazão afluyente a um filtro, as partículas são pouco a pouco retidas nos vazios intergranulares, causando diminuição das dimensões destes. Há, portanto, com o tempo, um conseqüente aumento da velocidade intersticial e força de cisalhamento. Esses dois fatores são responsáveis pelo arraste de partículas para subcamadas inferiores do meio filtrante até o momento em que estas atravessam completamente o leito, ocorrendo transpasse, um dos critérios de parada de uma carreira de filtração quando se está tratando água de abastecimento. Já para o pós-tratamento de efluentes, pode-se intuir que a carreira de filtração é dependente principalmente da carga hidráulica máxima disponível no filtro, devido aos requisitos menos restritivos de qualidade da

água produzida, em termos de turbidez e cor, entre outros, dependendo da aplicação do efluente tratado. Imagina-se que as características de água de lavagem de filtros e decantadores de ETAs, em termos de turbidez, aproximam-se mais das de efluentes oriundos de pós-tratamento de águas residuárias do que das características da água que deixa a unidade de decantação de ETA. De maneira geral, a adequação dos filtros para obtenção de melhor desempenho no tratamento de água ou efluente é uma questão de ponderação entre configuração do leito filtrante, taxa de filtração, dosagem de produtos químicos em vista da eficiência de remoção necessária e custos aceitáveis (determinados pela configuração do filtro, energia para limpeza e custo do produto químico) (OLIVEIRA, 2007).

Neste sentido, o presente trabalho buscou investigar a aplicação do sistema de Flotação por Ar Dissolvido seguido de Filtração no tratamento de lodo de decantador e água de lavagem de filtro de ETA após passagem por Leito de Drenagem. Diversos trabalhos sobre o tema já foram conduzidos, entretanto com foco no lançamento do drenado em corpos de água ou retorno para o processo de tratamento.

## 2 METODOLOGIA

Neste trabalho foi avaliada a qualidade da água de lodo de decantador e de lavagem de filtros da Estação de Tratamento de Água Bom Jardim, na cidade de Uberlândia-MG, após tratamento nas unidades sequenciais de leito de drenagem (LD), flotação por ar dissolvido (FAD) simulada no *floteste* e filtração, todos em escala de bancada. Foram utilizados três LD de características se-

melhantes, à exceção do tipo de manta geotêxtil utilizada em cada um deles. Foram utilizados três jarros do equipamento *Floteste* para a simulação da FAD, cada um recebendo efluente de um LD, e na sequência de cada jarro foram dispostos filtros com granulometrias semelhantes. Portanto, a sequência de tratamento do efluente composto por lodo de ETA e água de lavagem de filtros foi leito de drenagem, flotação por ar dissolvido e filtro: LD-FAD-F.

### 2.1 Descrição das instalações

As alíquotas de lodo de decantador e de água de lavagem de filtros foram coletadas na Estação de Tratamento de Água "Renato de Freitas" (ETA Sucupira), na cidade de Uberlândia/MG. Os *Leitos de Drenagem* eram compostos por tubos de PVC de 150 mm de diâmetro com 0,5 m de altura, base com cap de PVC com diâmetro de 150 mm no qual eram posicionadas a brita e a manta geotêxtil. A área de fundo ( $A_p$ ) era de 0,0178 m<sup>2</sup>, e a capacidade máxima (volume - V), de 8,8 L. Sua parte inferior era dotada de registro de esfera para coleta do drenado. Os geotêxteis, base dos LD, eram da marca *BIDIM*, do tipo não tecido agulhado de filamentos contínuos (100% poliéster), descritos pelo fabricante como *RT-21*, *RT-26* e *RT-31* e foram escolhidos a partir do trabalho realizado por Santos (2012), que comprovou serem os de melhor desempenho hidráulico e que produziram drenados de melhor qualidade dentre 16 avaliados. Neste trabalho, os protótipos de Leito de Drenagem com os geotêxteis *RT-21*, *RT-26* e *RT-31* são identificados como *LD1*, *LD2* e *LD3*, respectivamente. A Tabela 1 ilustra, conforme o fabricante, suas principais características.

**Tabela 1** – Propriedades hidráulicas e físicas dos geotêxteis que compuseram os LD

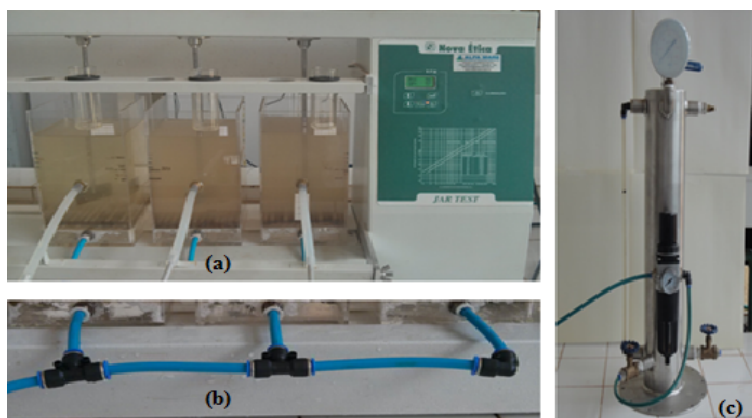
Propriedades	RT-21 (LD1)	RT-26 (LD2)	RT-31 (LD3)
Permissividade (s <sup>-1</sup> )	1,1	0,8	0,8
Fluxo de água (Lmin-1m <sup>-2</sup> )	3,420	2,760	2,340
Condutividade hidráulica (cms <sup>-1</sup> )	0,37	0,37	0,37
Abertura aparente (mm)	0,150	0,150	0,125
Matéria-prima e tecnologia	100% poliéster-filamentos contínuos		0,43

Fonte: Adaptado de BIDIM (2011)

O equipamento *floteste* era constituído de uma câmara de pressurização, três jarros para coagulação-floculação-flotação e conjunto agitador. Os jarros eram de acrílico transparente com dimensões de fundo de 115x115mm<sup>2</sup>. A base de

cada jarro era composta por duas placas de acrílico, espaçadas de 5 mm. Estes eram conectados à câmara de saturação, da qual recebia água saturada com ar. Na Figura 1 são mostrados os componentes do *floteste* e acessórios.

**Figura 1** – Equipamento *floteste* (FAD) e acessórios



**Legenda:** a) equipamento *floteste* com destaque para jarros, misturadores, tubulação de coleta de amostras, b) tubulações de entrada de água saturada, c) câmara de saturação

A placa inferior dos jarros era constituída de canais para condução de água saturada com ar para distribuição rápida e homogênea, preenchendo o espaço situado abaixo da placa superior. A placa superior continha orifícios de 2 mm de diâmetro, espaçados de 10 mm, que

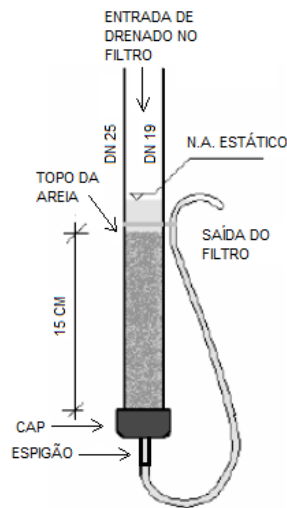
proporcionavam perda de carga suficiente para tal distribuição.

A *câmara de saturação* era constituída de aço inox com diâmetro interno de 100 mm, altura 400 mm e capacidade de 3,14 L de água. A parte superior da câmara era dotada de registro tipo esfera, vál-

vula tipo agulha, manômetro e filtro de ar comprimido com manômetro. Já a base da câmara era constituída de dois registros de esfera com a função de ajustar a entrada de ar e saída de água saturada e uma válvula agulha de ajuste fino para alimentação dos jarros.

Os filtros, posicionados na saída de cada um dos jarros, eram de PVC rígido DN 25, com diâmetro interno de 19 mm e CAP na parte inferior conectado a espigão e mangueira para saída do líquido filtrado, conforme Figura 2.

**Figura 2** – Detalhes dos filtros utilizados no tratamento do drenado



O meio filtrante tinha espessura de 15 cm e era composto por areia de granulometrias semelhantes para cada filtro. Para evitar o carreamento da areia junto com o filtrado, os filtros eram dotados de tela na parte inferior, posicionados dentro do CAP, com espessura da malha inferior à granulometria da areia. Para evitar o surgimento de caminhos preferenciais nos filtros, na parede interna de cada um deles foi aderida uma fina camada de areia. O meio filtrante foi escolhido conforme proposto por Centurione Filho e Di Bernardo (2002), ou seja, foi utilizada a granulometria de 0,42 mm em todos os filtros, escolhida de três avaliadas no trabalho: 0,42 mm, 0,84 mm e 1,19 mm. A cada início de ensaio a areia era lavada com água corrente utilizando-se uma peneira de granulometria

de malha inferior, e, posteriormente, repousada em água destilada. A areia era colocada no interior dos filtros utilizando um funil e água destilada. Para evitar a formação de vazios no interior dos filtros, era feita a compactação da areia batendo na parte inferior do filtro (CAP) com um bastão de vidro. Esse procedimento era realizado até que a espessura do meio filtrante atingisse 15 centímetros (Figura 2). A saída de água dos filtros era posicionada um pouco acima do topo do meio filtrante para que ficasse sempre submerso e fosse evitado o surgimento de pressões negativas em seu interior. Os três filtros foram fixados no suporte de madeira e presos na bancada, de forma que a entrada de cada um deles coincidissem com as saídas dos jarros.

## 2.2 Desenvolvimento do trabalho

Para a realização dos ensaios foi utilizada como amostra bruta uma composição (mistura) de lodo de decantador e água de lavagem de filtro. Tal medida foi de suma importância para a garantia de dois parâmetros de controle cruciais: volume suficiente de drenado, utilizado posteriormente na flotação e filtração (*FAD-F*), e taxa de aplicação de sólidos (*TAS*). Como a *TAS* nos leitos de drenagem (*LD*) geralmente é medida em termos de quilos de sólidos totais por metro quadrado de leito ( $\text{KgST.m}^{-2}$ ), nota-se que para uma dada *TAS*, quanto maior a concentração de sólidos na amostra a ser tratada, menor o volume necessário de amostra; por outro lado, quanto menor a concentração de sólidos, maior o volume de amostra necessário. Neste trabalho foi utilizada a *TAS* de  $3,5 \text{ Kg ST.m}^{-2}$ , extraída do trabalho de Santos (2012), cujas configurações mais adequadas foram aqui utilizadas. Para garantia dessa *TAS* foi necessária, como supracitado, a composição da amostra de lodo (decantador e filtro) uma vez que se utilizada apenas amostra de lodo do decantador, por ser muito concentrada, não haveria volume suficiente de drenado para tratamento nas unidades *FAD-F* seguintes. Ressalta-se que a “mistura” das amostras de lodo traz mudanças significativas apenas na concentração de sólidos, uma vez que a origem do lodo é a mesma e, portanto, guardando as mesmas características das amostras individuais.

Como o objetivo deste trabalho foi avaliar a aplicação da *FAD-F* no tratamento de efluente de *LD*, preliminarmente foram produzidas alíquotas de drenado em quantidade suficiente para condução dos ensaios. Portanto, foram conduzidos experimentos com os *LD* apenas na fase de drenagem, ou seja, não foram avaliadas as concentrações de sólidos no lodo retido ao longo do tempo. Nessa fase, após homogeneização da mistura do lodo do decantador com a água de lavagem dos filtros (efluente de composição)

para a *TAS* de  $3,5 \text{ kg ST.m}^{-2}$ , foi adicionado em cada protótipo do leito de drenagem um volume de  $4,7 \text{ L}$  com concentração de sólidos totais igual a  $0,013066 \text{ kgL}^{-1}$ , sabendo que a área de fundo do protótipo do *LD* era  $0,017671 \text{ m}^2$ , ou seja, o efluente de composição era descarregado em volume pré-determinado em função da *TAS* já definida. A taxa de aplicação de sólidos supracitada foi fixada para todos os experimentos. Após colocação do efluente de composição dentro do *LD*, era aberto o registro de esfera locado em sua base para dar início à fase de drenagem. O estabelecimento do fim dessa fase foi conforme Barroso (2007) na situação em que era alcançada a vazão de  $0,04 \text{ Lmin}^{-1}$ , correspondente a  $10 \text{ mL}$  de drenado em 15 minutos. Os drenados dos *LDs*, assim como o efluente de composição, foram caracterizados quanto ao pH, turbidez, cor aparente e cor verdadeira.

Após passagem da água do efluente de composição pelos *LDs*, era retirada uma alíquota de  $2 \text{ L}$  e adicionada em cada um dos três jarros do *floteste* (unidade de *FAD*). Depois de transcorridos os tempos de mistura rápida e mistura lenta (floculação), a água saturada com ar (oriunda da câmara de saturação) era encaminhada para cada um dos jarros. Conhecendo-se o volume de água em cada jarro e estabelecendo-se uma taxa de recirculação de 10%, foi possível calcular o volume adicional de água saturada para cada jarro. Ao término da introdução de água saturada eram aguardados 36 segundos ( $0,6 \text{ min}$ ) para coleta das amostras de água flotada e posterior encaminhamento para os filtros, uma vez que a velocidade de flotação ( $V_f$ ) considerada neste trabalho foi de  $10 \text{ cmmin}^{-1}$ . Eram coletados  $50 \text{ mL}$  de amostra na saída de cada jarro e de cada filtro para as análises dos parâmetros pH, turbidez, cor verdadeira e aparente. Como os filtros são de bancada e o fluxo não é contínuo (com duração relativa ao volume do jarro), não foram verificadas carreiras de filtração, indiferentes para o presente estudo, ou seja, apenas foi veri-



ficada a capacidade de retenção dos sólidos em cada um dos leitos filtrantes.

Os ensaios com o sistema composto por *LD-FAD-F* foram conduzidos utilizando-se concentrações do coagulante sulfato de alumínio na unidade de *FAD* nas concentrações de 0, 5, 10 e 15  $\text{mgL}^{-1}$ . Os parâmetros de controle da *FAD* foram mantidos constantes em: mistura rápida (tempo de mistura rápida -  $T_{mr} = 10$  s, gradiente médio de velocidade de mistura rápida -  $G_{mr} = 1000$   $\text{s}^{-1}$ ), floculação (tempo de floculação -  $T_f = 10$  min, gradiente médio de velocidade de floculação -  $G_f = 25$   $\text{s}^{-1}$ ) e flotação (pressão de saturação -  $P_{sat} = 400$  KPa, tempo de saturação -  $T_{sat} = 8$  min, velocidade de flotação -  $V_f = 10$  cm/min e taxa de recirculação -  $R = 10\%$ ).

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção são descritos e discutidos os resultados relativos à caracterização da água de estudo e simulação de tratamento em equipamento de bancada composto pelas unidades de leito de drenagem, flotação por ar dissolvido e Filtração.

#### 3.1 Caracterização da água de estudo

A água de estudo (efluente de composição) apresentou turbidez de aproximadamente 7000 UNT, cor verdadeira de aproximadamente 40 uH e pH de 6,7. Já os drenados do *LD1*, *LD2* e *LD3* apresentaram, para estes parâmetros, os valores apresentados na Tabela 2.

**Tabela 2** – Caracterização dos drenados do *LD1*, *LD2* e *LD3*

Parâmetro	Unidade	<i>LD1</i>	<i>LD2</i>	<i>LD3</i>
pH	-	7,8	7,9	7,8
Turbidez	UNT	72	125	132
Cor verdadeira	uH	42	29	49
Cor aparente	uH	250	281	307

Observa-se grande eficiência dos *LD* na remoção de turbidez de 98%, independentemente da manta geotêxtil de composição dos *LD*. Essa eficiência na redução de turbidez é semelhante às obtidas em outros trabalhos conduzidos na mesma linha como Santos (2012), Barroso (2007), Fontana (2004), entre outros. As variações nos valores de cor verdadeira podem ser creditadas a erros inerentes à sua determinação, e também podem ser explicadas pelo fato de não ter havido precipitação química na passagem da água de mistura pelos *LD*, uma vez que esse processo ocorreu anteriormente, na origem do lodo. Essa explicação pode ser válida, visto que a cor verdadeira expressa a presença de substâncias dissolvidas, com a amostra praticamente isenta de partículas em suspensão.

#### 3.2 Ensaio com as unidades de *FAD* e filtração (*FAD-F*) com diferentes dosagens de coagulante na *FAD*

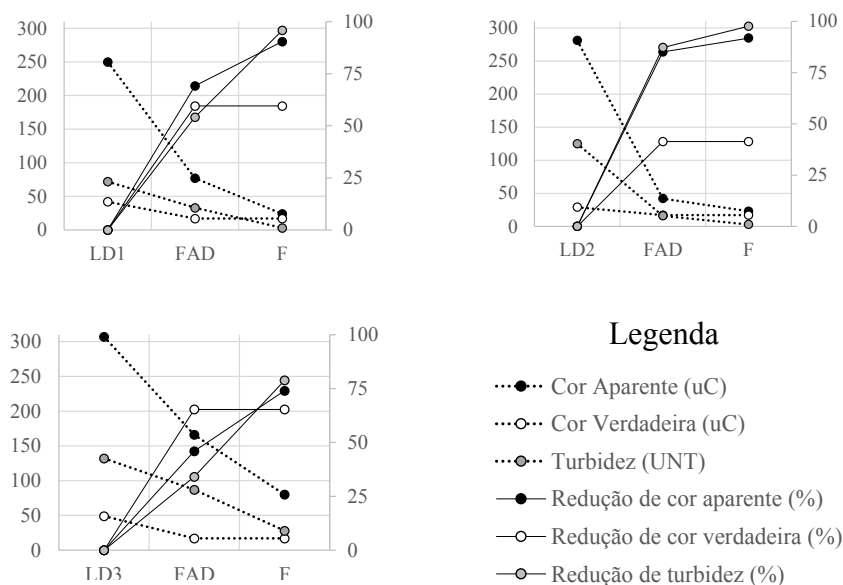
Os resultados obtidos no tratamento do efluente dos *LDs* nas diferentes configurações de ensaio foram apresentados em separado para melhor entendimento da evolução do trabalho e, posteriormente, foi feita uma análise conjunta.

##### 3.2.1 Ensaio sem utilização de coagulante na *FAD*

Inicialmente foram conduzidos experimentos sem a utilização de coagulantes químicos no processo de coagulação/floculação que antecede a introdução de água saturada com ar na *FAD*.

A Figura 3 mostra os resultados obtidos para o sistema FAD→F sem a adição de coagulante no tratamento dos drenados do LD1, LD2 e LD3.

**Figura 3** – Resultados de remoção de cor verdadeira, cor aparente e turbidez sem adição de coagulante no tratamento dos drenados do LD1, LD2 e LD3



A hipótese básica desse procedimento era que, mesmo sem agentes coagulantes externos adicionais, haveria redução de turbidez na FAD-F. Vale lembrar que no drenado, pela sua origem, havia presença de sais metálicos. Considerando-se o efluente do LD1 verifica-se uma redução global significativa dos valores de cor aparente e turbidez, 90% e 96%, respectivamente, o que demonstra a grande eficiência do sistema. É possível observar, mesmo em escala reduzida, o bom desempenho do filtro na retenção de impurezas. Apesar de não ser possível a reprodução do que acontece em sistemas reais, é possível inferir a importância dessa etapa na sequência de tratamento. Os valores de cor verdadeira na saída do F mantiveram-se constantes em relação à FAD, ou seja, as substâncias dissolvidas que conferem cor

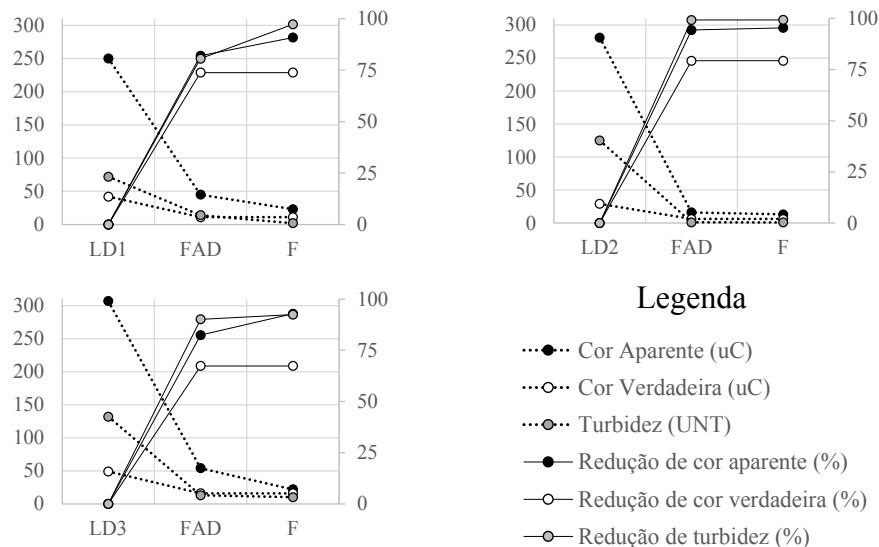
não foram retidas. De fato, essas substâncias seriam removidas se adsorvidas pelo meio filtrante ou se precipitadas e retidas, situações, portanto, não observadas. Avaliando-se o sistema com efluente do LD2 verifica-se a remoção de 85% de cor aparente e de 87% de turbidez, havendo alteração significativa nos valores de cor verdadeira apenas na FAD, pelas razões já descritas. O mesmo comportamento é observado quando avaliado o sistema com efluente do LD3. A partir dos resultados obtidos foi possível verificar a robustez da FAD que, mesmo sem adição de qualquer agente coagulante externo, foi suficiente para produzir efluente de muito boa qualidade se comparado à qualidade do drenado. Observa-se que a inclusão dos filtros proporcionou um polimento final no efluente, e que, para usos menos restritivos, o efluente produzido pode ser utilizado.

### 3.2.2 Ensaios com adição de 5 mg/L de sulfato de alumínio na FAD

Utilizando-se no processo de floculação da FAD 5 mg/L de sulfato de alumínio como coagulante, foram obtidos os resultados mostrados na Figura 4. Como os efluentes dos LD1, LD2 e LD3 foram os mesmos para todos os experimentos, suas características em termos de turbidez e cor também se mantiveram. Avaliando-se a eficiência de tratamento do efluente do LD1, observa-se uma redução global de 91%, 74% e 97% de cor aparente, cor verdadeira e turbidez, respectivamente, com residuais de 23, 11 uC e 2 UNT. Nota-se a boa qualidade do efluente final produzido. A Figura 4 mostra a variação dos parâmetros analisados dos drenados dos LDs após passagem pe-

las unidades de FAD e F, além da eficiência de remoção em cada unidade. Não houve remoção de cor verdadeira no filtro; de fato, como já avaliado para o sistema sem adição de coagulante, esse parâmetro é melhor removido a partir da coagulação química, fenômeno intrínseco do processo de tratamento anterior (FAD), pouco representativo no processo de filtração. Considerando-se o efluente do LD2, o sistema FAD-F alcançou eficiência de 95%, 7% e 99% na remoção de cor aparente, cor verdadeira e turbidez, respectivamente. Observa-se que a dosagem de 5 mgL<sup>-1</sup> de sulfato de alumínio proporcionou efluente com turbidez inferior a 1 uT, ratificando a grande eficiência do sistema. Tratando o efluente do LD3, o sistema obteve eficiência ligeiramente inferior, entretanto, acima de 90% para turbidez.

**Figura 4** - Resultados de remoção de cor verdadeira, cor aparente e turbidez com adição de 5 mgL<sup>-1</sup> de sulfato de alumínio no tratamento dos drenados do LD1, LD2 e LD3

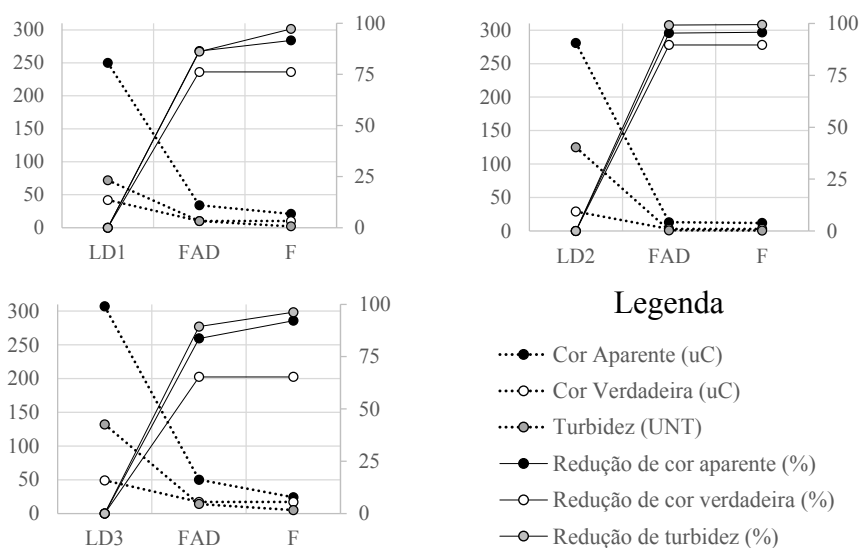


### 3.2.3 Ensaios com adição de 10 mg/L de sulfato de alumínio na FAD

Conforme ilustra a Figura 5, verifica-se na FAD remoção de 86% de cor aparente, 86% de turbidez e 76% de cor verdadeira para efluente do LD1;

considerando-se o sistema FAD-F foram observadas eficiências de remoção de 92%, 97% e 76%. Assim como nos outros experimentos, não houve remoção de cor verdadeira, esta relacionada a compostos dissolvidos.

**Figura 5** - Resultados de remoção de cor verdadeira, cor aparente e turbidez com adição de 10 mgL<sup>-1</sup>de sulfato de alumínio no tratamento dos drenados do LD1, LD2 e LD3

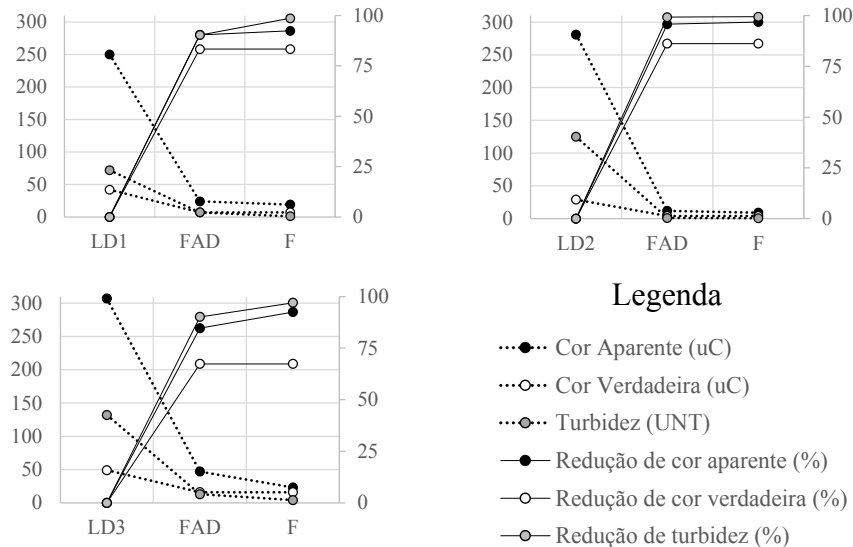


Para o LD2 verifica-se, após a FAD, remoção de 95% de cor aparente, 99% de turbidez e 90% de cor verdadeira. Esses resultados expressam a boa eficiência de remoção já na unidade FAD, com residual de turbidez próximo de 1 uT. Quando avaliado o sistema FAD-F, a eficiência é ainda maior, a não ser para cor verdadeira, a qual não apresenta alteração. As eficiências de remoção relativas ao tratamento do efluente do LD3 são compatíveis com as aqui observadas.

### 3.2.4 Ensaios com adição de 15 mgL<sup>-1</sup>de sulfato de alumínio na FAD

A Figura 6 mostra os resultados obtidos para o sistema FAD-F com adição de 15 mgL<sup>-1</sup>de sulfato de alumínio no processo de coagulação/floculação na FAD, na qual podem ser observados os resultados para os parâmetros cor verdadeira, cor aparente e turbidez para as unidades do sistema LD-FAD-F.

**Figura 6** – Resultados de remoção de cor verdadeira, cor aparente e turbidez com adição de 15 mgL<sup>-1</sup> de Sulfato de Alumínio no tratamento dos drenados do LD1, LD2 e LD3



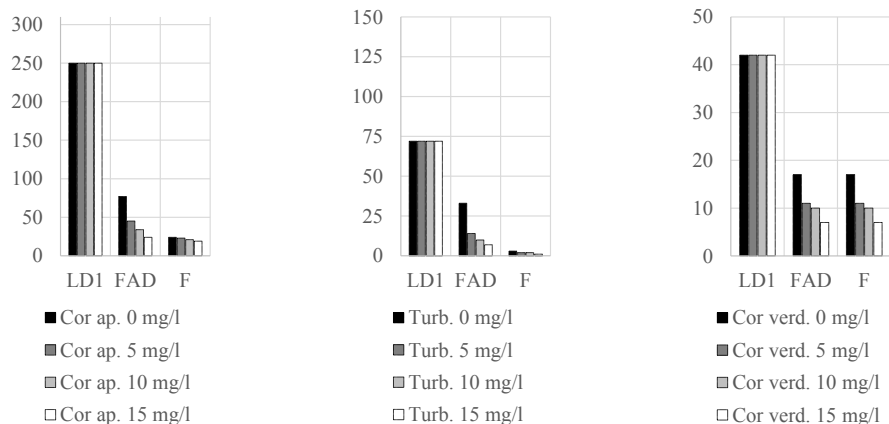
São observadas, já na FAD, eficiências de remoção acima de 90% para cor aparente e turbidez, considerando-se o tratamento do drenado de qualquer um dos LDs. Nota-se melhora significativa na eficiência de remoção quando aumentada a dosagem de sulfato. Comparando-se a qualidade da água na saída do sistema com a qualidade na entrada da unidade de FAD, são verificadas eficiências globais de remoção de cor aparente, turbidez e cor verdadeira de aproximadamente 94%, 99% e 80% e com residuais de 15 uC, 1 UNT e 5 uC, respectivamente.

### 3.2.5 Análise da remoção de cor aparente, turbidez e cor verdadeira em função da dosagem de coagulante para cada um dos LDs

As Figuras 7, 8 e 9 mostram, para o LD1, LD2 e LD3, as eficiências de redução de cor verdadeira,

cor aparente e turbidez, sem adição de coagulante, com adição de 5, 10 e 15 mgL<sup>-1</sup> de Sulfato de Alumínio. Conforme Figura 7, que ilustra os resultados obtidos para o tratamento do drenado do LD1, percebe-se uma ligeira melhora na eficiência de remoção, traduzida nesta figura pela diminuição dos residuais observados. Para cor verdadeira não é observada nenhuma alteração, considerando-se a remoção nos filtros, independentemente da concentração de sulfato de alumínio. Como já mencionado, a filtração não é hábil na remoção de compostos dissolvidos, e sim na remoção de partículas suspensas na massa líquida, conforme comprovado pela redução de cor aparente e turbidez.

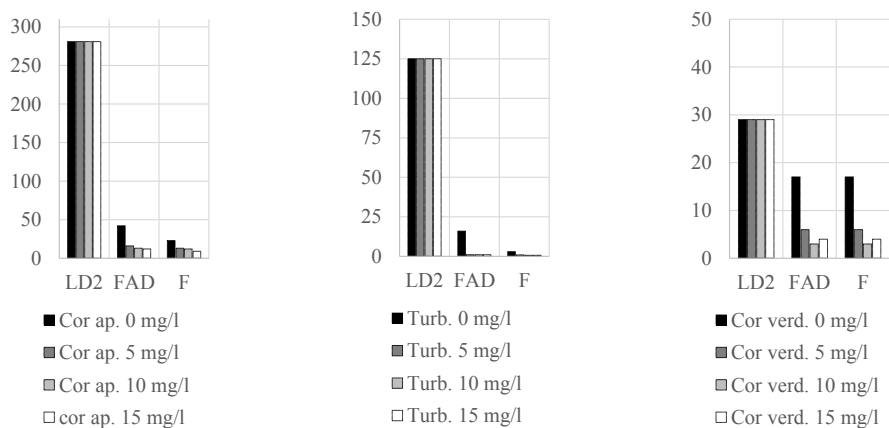
**Figura 7** - Resultados de remoção de cor verdadeira, cor aparente e turbidez no tratamento do drenado do LD1 para as dosagens de sulfato testadas



A Figura 8 sintetiza os resultados obtidos no tratamento do drenado do LD2. Como nos demais casos, não houve remoção de cor verdadeira no filtro; entretanto, como esperado, o aumento da

dosagem de sulfato resultou em ganho de eficiência do sistema. No caso específico da turbidez foram encontrados, independentemente da dosagem de coagulante, valores próximos de zero.

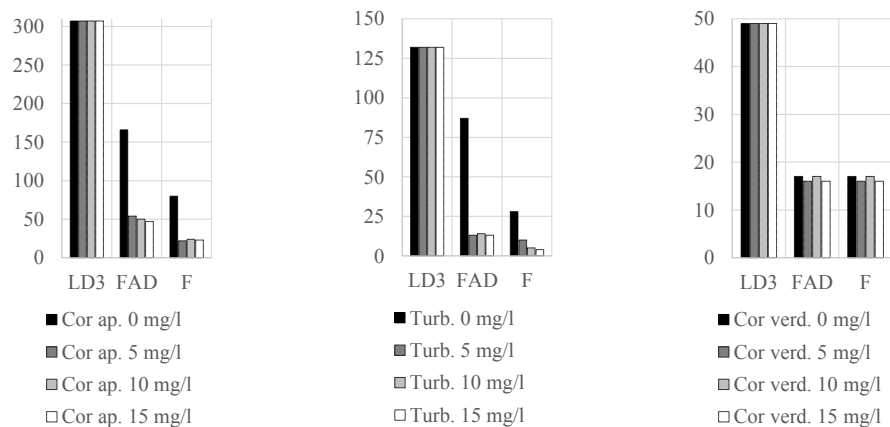
**Figura 8** – Resultados de remoção de cor verdadeira, cor aparente e turbidez no tratamento do drenado do LD2 para as dosagens de sulfato estudadas



Conforme Figura 9, que ilustra os resultados obtidos para o tratamento do drenado do LD3, a eficiência do sistema não é modificada consideravelmente

quando utilizadas as dosagens de sulfato de alumínio de 5, 10 e 15 mgL<sup>-1</sup>, ou seja, é possível que a dosagem ótima esteja próxima da menor utilizada.

**Figura 9** – Resultados de remoção de cor verdadeira, cor aparente e turbidez no tratamento do drenado do LD3 para diversas dosagens de coagulante



Ressalta-se que o sistema promoveu efluente de boa qualidade e que estudos mais aprofundados podem gerar resultados mais conclusivos e talvez viabilizar seu uso para produção de água potável a partir desse tipo de resíduos de ETA.

#### 4 CONCLUSÕES

O objetivo principal deste trabalho foi avaliar a potencialidade da aplicação do sistema LD-FA-D-F no tratamento de lodo de ETA e, portanto, ele foi alcançado. A premissa básica era a de que os íons metálicos existentes no efluente dos LDs pudessem contribuir para utilização de processos físico-químicos de separação de fases. Para tanto, foram conduzidos, inicialmente, experimentos sem adição de coagulante na FAD e, posteriormente, foram conduzidos experimentos com dosagem de 5, 10 e 15 mgL<sup>-1</sup> de Sulfato de Alumínio. Apesar de haver remoção de turbidez e cor sem adição de coagulante, foi observada uma melhora nos resultados com sua utilização, produzindo água de elevada qualidade, conside-

rando-se apenas os parâmetros monitorados. Ressalta-se que essa configuração mostrou-se promissora e é possível que seja uma boa alternativa à recirculação de água no próprio sistema, e certamente ao lançamento em curso de água; entretanto, estudos mais aprofundados devem ser conduzidos, principalmente no que diz respeito à segurança sanitária da água produzida se o objetivo for o uso potável. Sugere-se a utilização de outros coagulantes, variação mais ampla dos parâmetros envolvidos nos processos e, principalmente, ampliação de escala.

#### 5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA

- ADIN, A. Particle Characteristics: a Key Factor in Effluent Treatment and Reuse. **Water Science and Technology**, v 40, n 4-5, pp 67-74, 1999.
- ACHON, C. L.; CORDEIRO, J. S. Gerenciamento de lodo de ETAs - Remoção de água livre através de Leitões de secagem e Lagoas. **Anais...** Joinville: 22º.Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2003.
- BARROSO, M. M. **Influência das micro e macropriedades dos lodos de Estações de Tratamento de Águas no desaguamento**

por LD. 2007. 249f. Tese (Doutorado). 2007. Universidade Federal de São Carlos (UFSCAR), São Carlos.

CORDEIRO J. S., SALES A., POSSATO J. F., COSTA C. R., SOUZA F. R., ACHON C. L., BUTLER A. M., FREITAS A. A. Remoção de água de lodo de ETAs através de leitos de secagem modificados e incorporação da fase sólida em matrizes de cimento inclusive com o reaproveitamento do entulho de construção. 282p. In: ANDREOLI C. V. **Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final**. PROSAB 2 – TEMA IV. Rio de Janeiro, 2001.

DI BERNARDO, L. **Algas e suas influências na qualidade das águas e nas tecnologias de tratamento**. ABES, Rio de Janeiro, 2001.

EDZWALD, J. K. Principles and Applications of Dissolved Air Flotation. **Water Science and Technology**, v 31, n 3-4, pp 1-23, 1995.

KOERNER G. R., KOERNER R. M. Leachate Flow Rate Behavior through Geotêxtil and Soil Filters and Possible Remediation Methods. **Geotextiles and Geomembranes**, n.11, p. 401-430, 1992.

LUNDH, M.; JONSSON, L.; DAHLQUIST, J. The Influence of Contact Zone Configuration on the Flow Structure in a Dissolved Air Flotation Pilot Plant. **Water Research**, v. 36, p. 1585-1595, 2002.

MALLEY JR., J. P.; EDZWALD, J. K. Laboratory comparison of DAF with conventional treatment, **Journal AWWA**, Sept. 1991, 56-61.

MARTEL C. J. Dewaterability of freeze-thaw conditioned sludges. **Journal WPCF**, v. 61, n. 2, p. 237-241, 1989.

MENDONÇA M. B., CAMMAROTA M. C., FREIRE D. D. C. EHRlich, M. A new procedure for treatment of oily slurry using geotextile filters. **Journal of Hazardous Materials**, n. 110, p. 113-118, 2004.

MORTARA F. C. **Utilização de LD no desaguamento de lodos anaeróbios**. 2011. 242f. Dissertação (Mestrado). 2011. Universidade Federal de São Carlos (UFSCAR).

OLIVEIRA, A. L. **Floto-Filtração como pós-tratamento do efluente de reator anaeróbio tratando esgoto sanitário**. 233 f. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento). 2007. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2007.

RICHTER, C. A. **Tratamento de lodos de estações de tratamento de água**. Editora Edgard Blucher Ltda, São Paulo, 2001.

SANTOS, B. **Avaliação da aplicação do sistema de Leito de Drenagem como tratamento de lodo da estação de tratamento de água Bom Jardim em Uberlândia-MG**. Dissertação de Mestrado, 2012.

THÉRIAULT, S. M. **The use of Geotextile Membranes for the dewatering of Aerobically Digested Sludge**. 11f. Dissertação (Mestrado). 1991. The University of New Brunswick, Canadá, 1991.