

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL

MARCELO AUGUSTO MONTE DUARTE E SILVA

**PROPOSTA DE MELHORIA NA EFICIÊNCIA DOS DECANTADORES
DE ALTA TAXA EM CONCRETO ARMADO, DA ETA BOM JARDIM,
EM UBERLÂNDIA-MG.**

UBERLÂNDIA

2025

MARCELO AUGUSTO MONTE DUARTE E SILVA

**PROPOSTA DE MELHORIA NA EFICIÊNCIA DOS DECANTADORES
DE ALTA TAXA EM CONCRETO ARMADO, DA ETA BOM JARDIM,
EM UBERLÂNDIA-MG.**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso
de Engenharia Civil da Universidade Federal de
Uberlândia como requisito à obtenção do título de
Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. Iridalques Fernandes de Paula

UBERLÂNDIA

2025

TERMO DE APROVAÇÃO

MARCELO AUGUSTO MONTE DUARTE E SILVA

PROPOSTA DE MELHORIA NA EFICIÊNCIA DOS DECANTADORES DE ALTA TAXA EM CONCRETO ARMADO, DA ETA BOM JARDIM, EM UBERLÂNDIA-MG.

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia como requisito à obtenção do título de Engenheiro Civil, pela seguinte banca examinadora:

Prof. Iridalques Fernandes de Paula
Orientador

Profª. Alice Rosa da Silva

Prof. Carlos Eugenio Pereira

Uberlândia, 07 de maio de 2025

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus que me sustentou até aqui, dando-me força e determinação para cumprir com meu propósito com tranquilidade e excelência. Não só isso, mas também quero agradecer a minha família, minha esposa e meu filho que sempre estiveram ao meu lado me dando suporte e me auxiliando em tudo que sempre puderam, me incentivando e me fortalecendo. Por fim, quero agradecer ao Prof. Iridalques que me atendeu sempre que precisei, me dando suporte e novas ideias, fazendo com que esse trabalho se tornasse algo tranquilo e leve, obrigado pela disponibilidade.

RESUMO

A Estação de Tratamento de Água Bom Jardim, localizada em Uberlândia-MG, conta com dois decantadores de alta taxa em concreto armado, que apresentam problemas de concepção na sua estrutura interna atual. A distribuição da água floculada é irregular, os módulos de sedimentação possuem comprimento insuficiente, e o fundo das calhas de coleta da água decantada estão posicionadas na mesma cota da parte superior das lamelas de sedimentação. Além disso, a coleta da água decantada ocorre de forma desigual devido à ausência de ajuste nos vertedores triangulares. Esses fatores resultam em um elevado arraste de flocos nos decantadores. No presente trabalho propõem-se soluções que possibilitem o funcionamento adequado desses decantadores como unidades de alta taxa, a partir de adequações internas, mantendo-se as estruturas de concreto originais. Os resultados obtidos mostram que é possível aumentar a eficiência desses decantadores na remoção de flocos sedimentáveis, diminuindo a carga de flocos afluente aos filtros, possibilitando o aumento da carreira de filtração, diminuindo o volume de água tratada descartado na lavagem dos filtros.

Palavras-chaves: Estação de tratamento de água, decantador de alta taxa.

ABSTRACT

Bom Jardim Water Treatment Plant, located in Uberlândia-MG, has two high-rate reinforced concrete decanters, which present design problems in their current internal structure. The distribution of flocculated water is irregular, the sedimentation modules are of insufficient length, and the bottom of the decanted water collection troughs are positioned at the same elevation as the top of the sedimentation lamellas. In addition, the decanted water is collected unevenly due to the lack of adjustment in the triangular weirs. These factors result in high sludge drag in the decanters. This work proposes solutions that enable the proper operation of these decanters as high-rate units, based on internal adjustments, while maintaining the original concrete structures. The results obtained show that it is possible to increase the efficiency of these decanters in removing sedimentable flocs, reducing the load of flocs influent to the filters, allowing for an increase in the filtration run, and reducing the volume of treated water discarded when washing the filters.

Keywords: Water treatment plant, high rate decanter.

LISTA DE ABREVIATURAS

DMAE	Departamento de Água e Esgoto
ETA	Estação de Tratamento de Água

Sumário

1 INTRODUÇÃO.....	9
2 OBJETIVOS GERAIS	10
2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	10
3 REFERENCIAL TEORICO	10
4 ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE AGUA BOM JARDIM.....	14
4.1 ALTURAS PARCIAIS DO DECANTADOR DE ALTA TAXA	20
5 METODOLOGIA.....	21
6 VERIFICAÇÃO DAS MUDANÇAS PROPOSTAS NO DECANTADOR.....	23
7 ALTURAS PARCIAIS DO DECANTADOR	27
8 USO DE CANAIS PARA DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA FLOCULADA.....	28
9 DISCUSSÕES.....	30
REFERENCIAS.....	33

1 INTRODUÇÃO

A água é um recurso essencial para a vida, mas, para ser consumida com segurança, deve passar por um tratamento adequado. Isso porque pode conter substâncias químicas e microrganismos nocivos à saúde. Para garantir que esteja própria para o consumo humano, a qualidade da água deve atender a critérios físico-químicos e biológicos estabelecidos pela portaria GM/MS nº 888/2021, do Ministério da Saúde.

As Estações de Tratamento de Água (ETAs) têm a função de garantir que a água distribuída à população seja segura para o consumo, eliminando ou reduzindo impurezas nos limites estabelecidos pela portaria do Ministério da Saúde citada. Para que isso ocorra de forma eficiente, cada etapa do tratamento deve funcionar corretamente. A definição da tecnologia de tratamento depende das características físicas, químicas e biológicas da água bruta captada, sendo bastante utilizada a tecnologia de ciclo completo (convencional), do grupo de tecnologias que necessitam coagulação química, bastante utilizada para tratamento de água de mananciais superficiais. A tecnologia de ciclo completo compreende as etapas de coagulação, floculação, decantação/flotação, filtração e desinfecção, incluindo a fluoretação e a correção de pH. As tecnologias de tratamento com coagulação química são indicadas para potabilização de águas naturais provenientes de bacias não protegidas, classificadas tipo C, de acordo com parâmetros estabelecidos pela ABNT NBR 12216:1992. A bibliografia especializada cita que a concepção de uma ETA deveria ser embasada em testes laboratoriais e estudos realizados com a água bruta, utilizando reatores estáticos ou instalações-piloto de escoamento contínuo, o que nem sempre ocorre.

Em Uberlândia, o sistema de abastecimento de água potável é gerenciado pelo Departamento Municipal de Água e Esgoto (DMAE), autarquia da prefeitura municipal. Para abastecimento de água de Uberlândia, são utilizados os sistemas Sucupira, Bom Jardim e Capim Branco, com captações no rio Uberabinha, na represa do ribeirão Bom Jardim e na represa Capim Branco, respectivamente. A ETA Bom Jardim, construída em 1982 e ampliada em 1995 e 2012, trata atualmente a vazão de 1,6 m³/s, sendo a vazão de outorga máxima desse sistema, de 2 m³/s. A ETA Bom Jardim opera com tecnologia de tratamento em ciclo completo.

O sistema de decantação da ETA Bom Jardim conta com 2 decantadores de alta taxa de concreto, em funcionamento desde a fase inicial de operação e 1 decantador metálico, implantado na primeira ampliação da ETA. Nos decantadores de concreto verifica-se um intenso arraste de flocos, que interferem na qualidade da água decantada produzida, provavelmente gerados por concepção inadequada de dispositivos componentes destas unidades e de eventuais alterações de projeto, durante a sua construção.

No presente trabalho pretende-se avaliar e propor soluções para melhorar a qualidade da água decantada nessas unidades de concreto, para a vazão de outorga máxima de 2 m³/s desse sistema de abastecimento, procurando preservar a localização e dimensões das estruturas de concreto desses decantadores.

2 OBJETIVOS GERAIS

Avaliar os decantadores em concreto armado da ETA Bom Jardim da cidade de Uberlândia e propor reformas para melhorar sua eficiência, podendo contribuir para aumentar a carreira de filtração, pela produção de água decantada de melhor qualidade.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Avaliar a concepção e a disposição dos dispositivos constituintes dos decantadores de concreto da ETA Bom Jardim.

Propor, dimensionar e avaliar o funcionamento de dispositivos que compõem as zonas de entrada, saída, sedimentação e acúmulo e remoção de lodo dessas unidades, para funcionamento adequado como decantadores de alta taxa, com base na vazão de outorga máxima tratada.

3 REFERENCIAL TEORICO

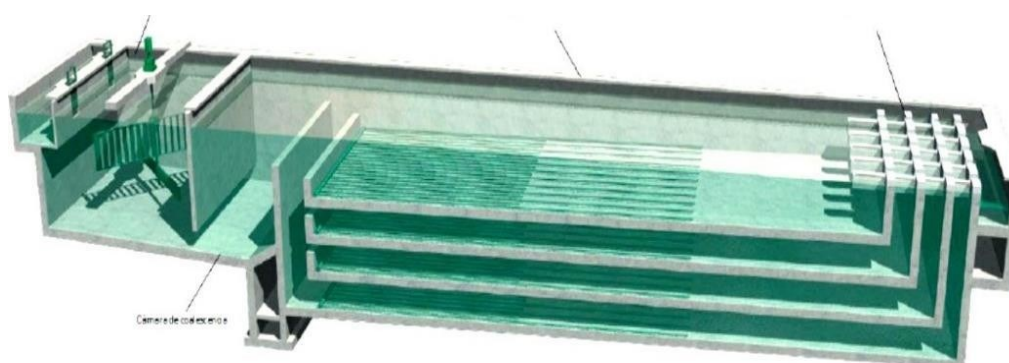
Contribuições de Hazen (1904)

A teoria clássica da sedimentação foi inicialmente formulada por Hazen (1904), que demonstrou que a eficiência de remoção de sólidos em um decantador é determinada principalmente pela área superficial do tanque e não por sua profundidade. Segundo Hazen, a capacidade de trabalho de um tanque poderia ser duplicada se fosse subdividido

horizontalmente em duas ou mais partes, conforme ilustrado na figura 1. Essa observação levou à ideia de que o aumento da área total de decantação resultaria em maior eficiência na remoção de sólidos suspensos. Da disposição apresentada na figura 1, deduz-se uma partícula, percorreria em uma altura menor para sedimentar, exigindo menor comprimento do decantador.

No entanto, a implementação prática desse conceito apresentava desafios operacionais, especialmente no que se refere à limpeza dos decantadores, já que grandes superfícies de sedimentação poderiam acumular lodo em excesso, impossibilitando sua remoção manual ou mecanizada.

Figura 1 - Esquema do decantador idealizado por Hazen



Fonte: Material didático MSc. Iridalques Fernandes de Paula (2025).

Desenvolvimento dos Decantadores Lamelares

Para contornar esse problema, avanços tecnológicos levaram à introdução, no decantador, de lamelas (módulos de sedimentação, sedimentadores), inclinadas entre 50° e 60° , constituindo-se em canais distribuídos em toda a superfície do decantador. As lamelas são localizadas entre os dispositivos de acúmulo e remoção de lodo e os dispositivos de coleta de água decantada, conforme descrito por Richter e Azevedo Netto (1991). A água floculada é distribuída na parte inferior das lamelas e percorre o seu comprimento, em fluxo ascendente, até a saída, na parte superior. O comprimento da lamela, percorrido pela água floculada, é definido em projeto e varia de 0,60 metro a 1,20 metro, conforme citado na bibliografia especializada. Essa inclinação permite que os flocos sedimentáveis deslizem naturalmente pelas superfícies inclinadas das lamelas até a região de coleta de lodo, estabelecendo um mecanismo de autolimpeza dessas unidades. A água floculada em ascensão pelas lamelas,

entra em contato com perímetro molhado suficiente para estabelecimento do regime laminar de escoamento, favorecendo a sedimentação dos flocos. Para estabelecimento do regime laminar nesses decantadores, é comum utilizar-se, entre outros, lamelas (dutos) com seção de escoamento variável (depende do fabricante) e placas planas paralelas, como ilustra as figuras 2 e 3, respectivamente.

Figura 2 – Lamelas de decantação de alta taxa de seção hexagonal



Fonte: Material didático MSc. Iridalques Fernandes de Paula (2025).

Figura 3 – Montagem de placas planas paralelas de decantação de alta taxa



Fonte: Material didático MSc. Iridalques Fernandes de Paula (2025).

Modelo de Yao para Sedimentação de Alta Taxa

O modelo de Yao trouxe um embasamento matemático mais detalhado para a sedimentação de alta taxa, considerando a interação entre a velocidade de sedimentação das partículas, a taxa de aplicação superficial e a eficiência de remoção. Yao aprimorou os conceitos anteriores ao desenvolver uma equação para prever a eficiência do sistema em diferentes condições operacionais.

A formulação teórica de Yao pode ser expressa da seguinte forma:

$$\frac{V_{cs}}{V_o} = \frac{Sc}{\text{Sen}\theta + L \times \text{Cos}\theta} \quad (\text{Equação 1})$$

Em que:

- V_{cs} = Velocidade da partícula (flocos) crítica (m/s);
- V_o = Velocidade longitudinal de escoamento nas lamelas (m/s);
- Sc = Coeficiente, adimensional, que depende da geometria da seção transversal de escoamento das lamelas;
- L = Comprimento relativo da lamela (adimensional), obtido da razão entre o comprimento real da lamela (m) e o espaçamento entre paredes opostas (m);
- θ = Ângulo de inclinação das lamelas.

Esse modelo permite avaliar a influência de diferentes parâmetros de projeto na eficiência da sedimentação, fornecendo uma base para otimizar o dimensionamento de decantadores de alta taxa.

O avanço da sedimentação de alta taxa partiu da observação de Hazen sobre a importância da área superficial no desempenho dos decantadores e evoluiu com o uso de superfícies inclinadas para permitir a autolimpeza. O modelo matemático proposto por Yao consolidou a compreensão da eficiência da remoção de sólidos, permitindo a otimização do dimensionamento dos sistemas de sedimentação modernos. A aplicação desses conceitos é essencial para o desenvolvimento de Estações de Tratamento de Água (ETAs) mais eficientes e compactas, garantindo maior eficiência operacional e qualidade da água tratada.

4 ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA BOM JARDIM

Nessa seção, serão fornecidas informações gerais sobre elementos componentes da etapa de clarificação da ETA Bom Jardim, com destaque para possíveis causas do arraste de flocos nos decantadores de concreto observadas desde o início de operação.

A ETA Bom Jardim emprega o sistema de tratamento do tipo ciclo completo (convencional), conforme descrito no Plano Municipal de Saneamento Básico (2012). Sua capacidade nominal instalada é de 1,6 m³/s, enquanto a capacidade efetiva de produção chega a 1,7 m³/s, com uma vazão média efetiva de 1,05 m³/s. Seu projeto executivo foi desenvolvido pela Tecnosan, porém algumas alterações foram observadas durante a construção, a exemplo da

substituição de lamelas cinstituídas de placas planas paralelas de 1,10 m de comprimento real (0,95 metro de altura), por lamelas de PVC de 0,5 metro de altura.

A captação da água bruta ocorre em canal derivado da represa do Ribeirão Bom Jardim, que alimenta a sucção das bombas centrífugas das 2 elevatórias de água bruta localizadas nas margens esquerda e direita do rio Uberabinha, respectivamente. A água bruta proveniente das elevatórias é recalçada até a ETA Bom Jardim, distante aproximadamente 7 km da captação.

Na ETA Bom Jardim, o processo de coagulação desenvolve-se após a dispersão da solução do coagulante na água bruta, que ocorre na calha Parshall, que funciona como dispositivo medidor de vazões e como unidade hidráulica de mistura rápida. A jusante da calha Parshall está instalado o canal de água coagulada, de alimentação dos sistemas de floculação e decantação de concreto e metálico. Desde a instalação do sistema metálico de floculação e decantação, o DMAE não realizou estudos para quantificar a parcela da vazão de água coagulada que é distribuída para os sistemas metálico e de concreto, respectivamente. Em função das características da distribuição que é feita para os 2 sistemas, no final do canal de água coagulada, admite-se que os sistemas metálico e de concreto, de floculação e decantação, sejam alimentados com a mesma vazão. No presente trabalho, os estudos serão desenvolvidos para a vazão de 1 m³/s de alimentação dos floculadores e decantadores de concreto, considerando a vazão de outorga máxima tratada de 2 m³/s.

Após a mistura rápida, a água coagulada é encaminhada para os floculadores. Os floculadores de concreto armado são compostos por seis câmaras mecanizadas em série, com formato quadrado e profundidade de 5,8 m. O fundo das câmaras é inclinado para um tubo de descarga, e a passagem entre as câmaras ocorre por aberturas alternadas (superior direita e inferior esquerda). Já os floculadores de chapas de aço possuem um configuração anular e operam em paralelo aos de concreto armado. A floculação originalmente mecanizada, ocorre de forma hidráulica, pela inativação dos motores elétricos de acionamento das turbinas. A câmara interna tem raio de 4,50 metros e altura de 5,00 metros, enquanto a câmara externa mede 4,00 m de largura com a mesma altura. A comunicação entre as câmaras é feita por um orifício circular de 80 cm de diâmetro. A figura 4 mostra a ETA Bom Jardim.

Figura 4: Estação de tratamento de água Bom Jardim



Fonte: Bruna Takako (2017)

NA etapa de decantação são apresentados problemas no seu processo de tratamento de água. A estação conta com três decantadores de alta taxa, sendo dois de concreto armado e um de chapas de aço. Os decantadores de concreto têm 5,50 metros de profundidade útil, incluindo os poços de lodo, 14,40 m de largura interna e 29,00 metros de comprimento interno. O grande problema está nesses decantadores de concreto, pois são ineficientes em sua função, devido a problemas na parte interna dos mesmos, e com isso apresentam um grande arraste de flocos para a superfície. O DMAE tentou solucionar esse problema construindo anteparos posicionados a aproximadamente 3 metros da parede de entrada do decantador, na expectativa de que ocorresse intensa sedimentação de flocos até os anteparos, aliviando a carga de flocos a jusante e que o decantador passasse a funcionar adequadamente a partir do anteparo. Essa expectativa não se concretizou, notando-se na operação do decantador intenso arraste de flocos a jusante dos anteparos. O arraste de flocos pode ser potencializado pela velocidade da água floculada, no canal formado entre os poços de lodo e as lamelas, ser superior à estabelecida na literatura especializada, responsável pela adequada distribuição de flocos sob as lamelas. A figura 5 mostra o posicionamento dos anteparos no decantador e o arraste de flocos na parte superior das lamelas, que contribui para o aumento da turbidez da água decantada e aumento da carga de flocos afluyente aos filtros. Na figura 5, as setas indicam locais de ruptura de lamelas, criando regiões

desprotegidas, que intensificam o arraste de flocos no decantador.

Figura 5 – Arraste de lodo a jusante dos anteparos dos decantadores de concreto



Fonte: Material didático MSc. Iridalques Fernandes de Paula (2025).

A figura 6 apresenta detalhes de um decantador de concreto da ETA Bom Jardim, com destaque para os anteparos colocados na parte inicial do tanque, as calhas de coleta de água decantada e as lamelas de PVC instaladas desde o início de operação da ETA.

O lodo sedimentado é coletado por 32 poços localizados no fundo do tanque, organizados em uma disposição de 4 filas longitudinais de 8 poços de lodo cada. Esses poços possuem formato de tronco de pirâmide invertido, com uma base maior de 3,45 metros, altura de 1,85 metro e inclinação de 50°. Cada linha de 8 poços é descarregada por válvula situada externamente ao decantador, próxima à parede de saída. Quando acionadas as 4 válvulas, promove-se a descarga do lodo acumulado nos poços, promovendo-se também o esvaziamento do decantador, quando necessário. O diâmetro da tubulação de descarga que drena cada linha de 8 poços é de 200 mm.

A água decantada, coletada nos dos decantadores de concreto e no decantador metálico, é encaminhada ao canal de água decantada, sendo distribuída aos filtros.

Figura 6 - Detalhes do decantador de concreto da ETA Bom Jardim



Fonte: Bruna Takako (2017)

Os decantadores de alta taxa de concreto, da ETA Bom Jardim, apresentam problemas estruturais que podem, no seu conjunto, influenciar no arraste excessivo de flocos sedimentáveis, com comprometimento da qualidade da água decantada. Esses problemas são listados a seguir.

O comprimento das lamelas de PVC instaladas, da ordem de 50 centímetros, é insuficiente para o estabelecimento de comprimento de percurso, mesmo em regime laminar, que a sedimentação adequada de flocos produzidos nos flocoadores necessita.

Com a colocação dos anteparos a jusante da parede de entrada, diminuiu-se o comprimento do decantador previsto no projeto, diminuiu-se a área horizontal prevista para disposição das lamelas, com a consequente diminuição do perímetro molhado necessário ao estabelecimento do número de Reynolds estabelecido para o escoamento nessas lamelas.

A entrada da água decantada é feita abertura alimentada por canal de comprimento equivalente à largura do decantador, porém gerando velocidades de escoamento ao longo do canal formado entre a parte inferior das lamelas e o topo dos poços de lodo, responsáveis pelo arraste de flocos acima das lamelas, podendo contribuir para a ressuspensão do lodo depositado.

Para manutenção do regime laminar na parte superior das lamelas, é necessário o

estabelecimento de distância vertical entre a parte superior das lamelas e a borda das calhas de coleta de água decantada. Essa altura mantém o fundo das calhas de coleta de água decantada acima da parte superior das lamelas, o que não é observado nos decantadores de concreto da ETA Bom Jardim.

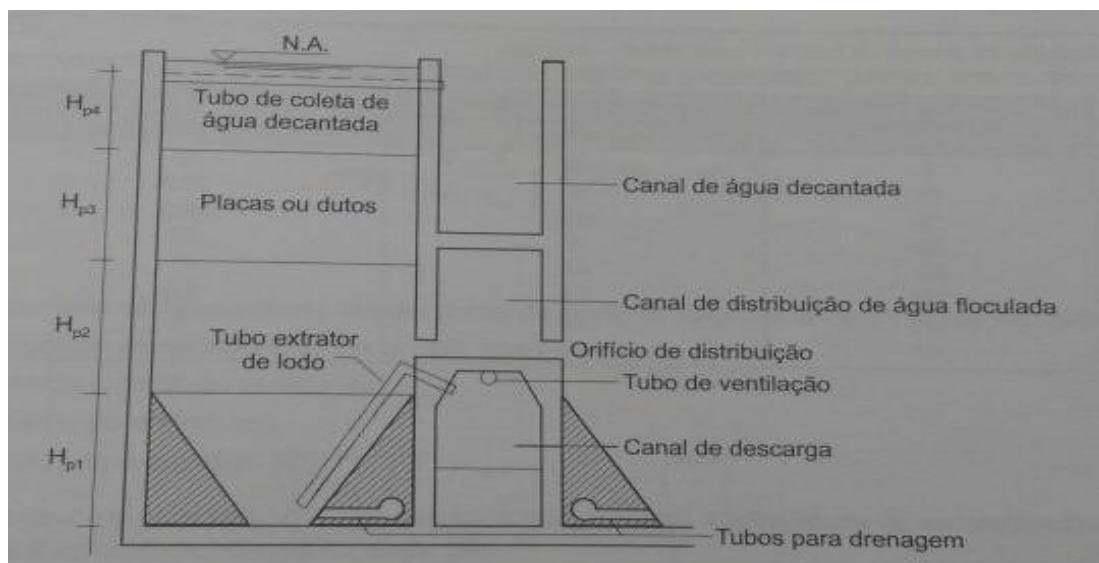
Para desenvolvimento desse trabalho, informações como as dimensões da abertura de acesso da água floculada ao decantador e sua posição relativa na altura do decantador, bem como a posição relativa das lamelas de PVC, nessa altura, não foram disponibilizadas pelo DMAE, porém não têm influência no desenvolvimento do trabalho. Nesse desenvolvimento, manteve-se as dimensões e posicionamento das estruturas de concreto do decantador, modificando-se sua estrutura interna e avaliando o seu funcionamento e eficiência na remoção de flocos, com base na vazão de outorga máxima tratada, na ABNT NBR 12216 e na bibliografia especializada.

Após passar pelos decantadores, a água segue o processo convencional de tratamento, sendo direcionada para os filtros e, em seguida, para o tanque de contato. Na ETA, são utilizados 12 filtros duplos rápidos por gravidade, de mamada filtrante dupla, de antracito e areia. Para garantir a eficiência dos decantadores de alta taxa na remoção de flocos de diferentes qualidades de água, é fundamental que a turbidez da água decantada não ultrapasse 10 uT. Caso contrário, o processo de filtração pode ser comprometido, reduzindo a vida útil dos filtros. Segundo Di Bernardo e Dantas (2005), a turbidez da água filtrada deve permanecer abaixo de 1 uT, conforme os padrões estabelecidos pela Portaria GM/MS nº 888/2021, do Ministério da Saúde. Além disso, o bom funcionamento do sistema depende de uma distribuição homogênea da água floculada dentro dos módulos de sedimentação, da extração eficiente do lodo acumulado e da coleta uniforme da água decantada.

4.1 ALTURAS PARCIAIS DO DECANTADOR DE ALTA TAXA

O decantador de alta taxa pode ser dividido em quatro alturas parciais principais, conforme ilustrado na Figura 7:

Figura 7: Alturas parciais de um decantador de alta taxa



Fonte: Di Bernardo e Dantas (2005).

- **Altura do Poço de Lodo (H_{p1}):** Essa seção corresponde ao espaço destinado ao armazenamento do lodo acumulado. O volume do poço deve ser dimensionado com base na quantidade de lodo gerado e na frequência de remoção, considerando também o tipo de coagulante e polímero utilizados no tratamento da água.
- **Zona de Separação (H_{p2}):** Representa a distância entre a parte superior do poço de lodo e a base dos módulos de sedimentação. Essa altura precisa ser suficiente para impedir que o fluxo de entrada, proveniente de canais ou tubulações perfuradas, cause turbulências que interfiram no lodo sedimentado ou comprometam a eficiência dos módulos de sedimentação.
- **Altura dos Módulos de Sedimentação (H_{p3}):** Essa seção é determinada exclusivamente pela dimensão dos módulos de sedimentação utilizados no projeto.
- **Zona de Coleta da Água Decantada (H_{p4}):** Refere-se à distância entre o topo dos módulos de sedimentação e a geratriz superior do tubo ou vertedor responsável pela coleta da água decantada. Segundo a norma ABNT NBR 12216:1992, essa altura deve ser, no mínimo, metade do espaçamento entre as calhas ou tubos perfurados (L_c).

O correto dimensionamento dessas alturas é essencial para otimizar a remoção de partículas em suspensão, minimizar o arraste de lodo e garantir um desempenho eficiente no tratamento da água.

No caso da ETA Bom Jardim, essas alturas parciais estão distribuídas de forma inadequada aos padrões de dimensionamento atuais. Dessa forma é necessário reavaliar os módulos de sedimentação e ajustar as alturas parciais dentro dos decantadores de concreto, mantendo as dimensões internas como paredes internas, poços de lodo e calhas de coleta de água decantada, afim de minimizar custos para uma eventual reforma, com o intuito de melhorar o desempenho dos decantadores e qualidade da água final.

5 METODOLOGIA

A princípio, tendo em vista que as dimensões internas dos decantadores serão mantidas, como paredes internas e poços de lodo e calhas de coleta de água decantada, parte-se da análise inicial com os seguintes dados iniciais:

O decantador foi projetado para uma vazão de 500 litros por segundo, com dimensões de 14,40 metros de largura, 5,50 metros de altura e 29,00 metros de comprimento.

Os módulos de sedimentação podem ser compostos por placas planas paralelas ou estruturas tubulares. As placas, que podem ser fabricadas com diversos materiais, incluindo lona plástica, operam com fluxo vertical ou horizontal. Já os módulos tubulares apresentam seções quadradas, retangulares, circulares ou hexagonais.

Para um funcionamento eficiente, recomenda-se que:

- A inclinação dos módulos fique entre 50° e 60°, garantindo a auto-limpeza (RICHTER e NETTO, 1991);
- A velocidade longitudinal máxima (V_o) não ultrapasse 0,35 cm/s, evitando o arraste de lodo (ABNT NBR 12216:1992);
- Caso não seja viável a realização de testes laboratoriais, a norma ABNT NBR 12216:1992 sugere os seguintes valores para a velocidade de sedimentação (V_s):
 - a) 1,74 cm/min para estações com capacidade de até 1.000 m³/dia;
 - b) 1,74 cm/min para estações entre 1.000 e 10.000 m³/dia, quando o controle

- operacional não é garantido;
 c) 2,43 cm/min para estações entre 1.000 e 10.000 m³/dia, quando há um bom controle operacional;
 d) 2,80 cm/min para estações com capacidade acima de 10.000 m³/dia.

Além disso, o comprimento dos módulos, a velocidade longitudinal e a velocidade crítica de sedimentação devem seguir o modelo de Yao.

Apos isso, será feita uma análise para determinar se as calhas de água decantada e os poços de lodo são adequados para essa reforma nos decantadores.

A ABNT NBR 12216:1992 estabelece diretrizes para os dispositivos de coleta de água decantada, recomendando que a captação seja realizada por tubulação submersa perfurada na parte superior ou por vertedores não-afogados, garantindo uma coleta uniforme. O nível da água dentro do dispositivo de coleta deve estar pelo menos 10 cm abaixo da borda vertente, sendo determinado pela Equação 28:

$$Q_{cl} = 1,38 \cdot bc \cdot H_{cm}^{\frac{3}{2}} \quad (\text{Equação 2})$$

onde Q_{cl} representa a vazão máxima em um canal com descarga livre (m³/s), bc é a largura da calha (m) e H_{cm} corresponde à altura máxima da água dentro da calha (m).

Nos decantadores de alta taxa, a vazão nos dispositivos de coleta não deve exceder 2,5 l/s por metro. Além disso, a distância entre a extremidade superior dos módulos sedimentadores e a geratriz superior da calha de coleta (H_{p4}) deve estar entre a metade da distância entre calhas coletoras de água decantada e a metade da distância entre calhas coletoras de água decantada subtraindo a altura das calhas (h_c), conforme indicado na equação a seguir:

$$\frac{L_c}{2} \geq H_{p4} \geq \frac{L_c}{2} - h_c \quad (\text{Equação 3})$$

Di Bernardo e Dantas (2005) complementam com uma recomendação prática, sugerindo que o espaçamento entre as calhas ou tubos perfurados (L_c) seja superior a 1,5 m, permitindo

manutenção ou substituição dos módulos de sedimentação.

Para a remoção hidráulica do lodo, a ABNT NBR 12216:1992 recomenda que o fundo do decantador tenha uma inclinação superior a 50° , possua formato de tronco de pirâmide ou cone invertido e apresente uma abertura para descarga na extremidade inferior. Além disso, a norma estabelece que canalizações de descarga de lodo com até 10 metros de comprimento devem ter diâmetro mínimo de 150 mm. Caso a tubulação esteja sob estruturas, em locais de difícil acesso ou tenha comprimento superior a 10 metros, o diâmetro mínimo deve ser de 200 mm.

6 VERIFICAÇÃO DAS MUDANÇAS PROPOSTAS NO DECANTADOR

Os sedimentadores escolhidos serão placas planas paralelas, de 1,10 metros de comprimento ($H_{p3} = 1,10/\sin\theta = 0,95\text{m}$); 2,20 metros de largura; e 0,5 centímetros de espessura, sendo espaçadas de 5 centímetros e inclinadas em 60 graus. As placas serão distribuídas por todo o comprimento de 29 metros do decantador, sendo seu comprimento útil de 27,73 metros.

Dessa forma, é necessário calcular o número de canais formados por essas placas, sendo calculado como:

$$N_c = \frac{C, \text{util}}{(e, \text{placa} + esp, \text{placa})/\sin\theta} \times 6$$

Onde

- C, util é o comprimento útil do decantador.
- e, placa é o espaçamento entre placas.
- esp, placa é a espessura das placas.
- θ é o ângulo de inclinação da placa.

Com isso, tem-se

$$Nc = \frac{27,73}{(0,5 + 0,005)/\text{sen}60^\circ} \times 6 = 2620 \text{ canais}$$

É necessário agora verificar qual a velocidade crítica de sedimentação para os módulos selecionados, utilizando-se da Equação de Yao.

$$\frac{V_{cs}}{V_o} = \frac{Sc}{\text{Sen}\theta + L \times \text{Cos}\theta}$$

- L é o comprimento relativo da placa, sendo igual ao seu comprimento dividido pelo espaçamento entre placas.
- Sc é o fator de forma dos sedimentadores, no caso de placas planas paralelas o fator é igual a 1
- Vo é a velocidade de escoamento, sendo delimitada pela equação da continuidade.

$$Q = V \cdot A$$

(Equação 5)

Onde

- Q é a vazão (m³/s)
- V é a velocidade (m/s)
- A é area da seção de escoamento (m)

$$Q = V \cdot A$$

$$0,5 = V_o \cdot (2,20 \cdot 0,05 \cdot 2620)$$

$$V_o = 0,00174 \text{ m/s}$$

Sendo assim,

$$\frac{V_{cs}}{0,00174} = \frac{1}{\text{Sen}60 + \frac{1,10}{0,05} \times \text{Cos}60}$$

$$V_{cs} = 0,000146 \text{ m/s} = 0,877 \text{ cm/min}$$

Essa velocidade crítica de sedimentação está bem abaixo dos limites imposto pela norma ($V_{cs} < 1 \text{ cm/min}$) o que indica que esses sedimentadores terão uma alta eficiência.

Deve-se agora verificar se as calhas pre-existentes no decantador serão suficientes para atender às reformas propostas. Nos decantadores existem 6 calhas com 56 centímetros de altura (hc) e 50 centímetros de largura (bc), com 29,00 metros de comprimento.

Com isso, deve-se verificar a vazão por unidade de comprimento das calhas, não podendo exceder o valor limite de 2,5L/s por metro imposto por norma.

Ao todo, tem-se 6 calhas de coleta de água decantada já construída no decantador, onde duas estão posicionadas nas laterais do tanque, com 25 centímetros de largura, sendo metade da largura das calhas centrais de 50 centímetros. Sendo assim, são 348 metros lineares de borda de calha livre para coleta de água.

Para o cálculo da vazão por metro linear de calha, é preciso dividir a vazão pelo comprimento de calha disponível, sendo assim:

$$\frac{500 \text{ L/s}}{348 \text{ metros}} = 1,44 \text{ L/s} \cdot \text{m}$$

Com isso, nota-se que não foi ultrapassado o limite de norma de 2,5L/s por metro de calha.

É necessário ainda calcular a altura da lamina de água dentro das calhas, afim de verificar se a altura de calha já existente é suficiente para a vazão calculada, dado pela fórmula

$$Q_{cl} = 1,38 \cdot bc \cdot H \text{ cm}^{\frac{3}{2}} \quad (\text{Equação 2})$$

Em que:

- Q_{cl} é a vazão máxima em um canal com descarga livre (m^3/s)
- bc é a largura da calha (m)
- H_{cm} é a altura máxima de água no interior da calha (m)

Em que:

$$Q_{cl} = \frac{\text{Vazão}}{\text{numero de calhas}}$$

$$Q_{cl} = \frac{500}{6}$$

$$Q_{cl} = 83,33L/s$$

Sendo assim

$$\left(\frac{Q_{cl}}{1,38 \cdot bc}\right)^2 = H_{cm}$$

$$H_{cm} = \left(\frac{0,0833}{1,38 \cdot 0,5}\right)^2$$

$$H_{cm} = 24 \text{ centimetros}$$

A partir disso, é verificado que as calhas pre-existentes podem ser aproveitadas para as mudanças do decantador.

Por fim, é necessário verificar os poços de lodo, dimensionando suas tubulações de descarga. Nos decantadores existem 32 poços de lodo distribuídos em 4 fileiras de 8 poços no sentido do comprimento do tanque. Os poços possuem formato em tronco de pirâmide invertidos, com base maior de 3,45 metros, 1,85 metro de altura (H_{p1}) e inclinação de 50°

É necessário verificar a tubulação de descarga do decantador, dado pela equação a seguir:

$$S = \frac{A \cdot \sqrt{H}}{4850 \cdot t}$$

(Equação 6)

Onde:

- S é a seção da tubulação de descarga (m²)
- A é a area horizontal de contribuição (m²)
- t é o tempo de esvaziamento (h)
- H é a altura de agua sobre a tubulação de descarga (m)

$$S = \frac{A \cdot \sqrt{H}}{4850 \cdot t} = \frac{\pi \cdot D^2}{4}$$

$$\frac{\frac{14,4 \cdot 29}{4} \cdot \sqrt{5,50}}{4850 \cdot 2} = \frac{\pi \cdot D^2}{4}$$

$$D = 0,18m$$

Dessa forma, a tubulação pré-existente de 200 milímetros atende ao tempo de esvaziamento proposto, como mostra a Figura 8:

Figura 8 – Tubulação dos poços de lodo



Fonte: Material didático MSc. Iridalques Fernandes de Paula (2025).

7 ALTURAS PARCIAIS DO DECANTADOR

As alturas parciais do decantador já foram quase integralmente definidas, sendo altura do Poço de Lodo (*Hp1*) já construída de 1,85 metros. Zona de Separação (*Hp2*) definida para determinar a

ausência de tubulações de distribuição de água floculada, com dimensão ainda a ser determinada. Altura dos Módulos de Sedimentação (H_{p3}) delimitada na escolha dos módulos de sedimentação, de altura 1,10 metros, e projeção vertical de 0,95 metro. Zona de Coleta da Água Decantada (H_{p4}) é a distância entre o topo dos módulos de sedimentação e a geratriz superior do tubo ou vertedor responsável pela coleta da água decantada. Essa altura ainda precisa ser definida e deve estar entre a metade da distância entre calhas coletoras de água decantada (L_c) e a metade da distância entre calhas coletoras de água decantada subtraindo a altura das calhas (h_c).

$$\frac{L_c}{2} \geq H_{p4} \geq \frac{L_c}{2} - h_c \quad (\text{Equação 3})$$

$$\frac{2,40}{2} \geq H_{p4} \geq \frac{2,40}{2} - 0,56$$

$$1,20 \geq H_{p4} \geq 0,64$$

Dessa forma, foi adotado o menor valor do intervalo para H_{p4} . Com isso, podemos calcular H_{p2} , sendo dada por:

$$H = H_{p1} + H_{p2} + H_{p3} + H_{p4}$$

$$5,50 = 1,85 + H_{p2} + 0,95 + 0,64$$

$$H_{p4} = 2,06 \text{ metros}$$

Portanto, todas as alturas parciais do decantador foram delimitadas.

8 USO DE CANAIS PARA DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA FLOCULADA

A distribuição da água floculada para um decantador convencional muitas vezes é feita por meio de canais, que têm a função de garantir uma entrada uniforme do fluxo e evitar turbulências que possam comprometer o processo de sedimentação. No entanto, de acordo com Sidney Seckler, essa distribuição não é necessária quando a velocidade da água no interior do decantador for próximo a 1 metro por minuto.

Isso ocorre porque, a velocidades menores, o próprio escoamento dentro do decantador já se mantém suficientemente uniforme, minimizando perturbações que possam comprometer a sedimentação dos flocos. Além disso, a baixa velocidade reduz a formação de correntes preferenciais e zonas mortas dentro do tanque, garantindo que a sedimentação ocorra de maneira eficiente sem a necessidade de uma estrutura adicional de distribuição.

Dessa forma, desde que o critério de velocidade seja atendido, a eliminação dos canais simplifica o projeto, reduz custos e facilita a manutenção, sem comprometer a eficiência do processo de decantação.

Para determinar essa velocidade foi usando a equação da continuidade dentro do decantador, no canal formado entre os poços de lodo e o início dos módulos de sedimentação, arbitrando uma altura de 2,06 metros de modo a garantir a velocidade menor que 1 metro pro minuto, como mostra a figura 9:

Figura 9 – Canal formado entre os poços de lodo e sedimentadores



Fonte: Material didático MSc. Iridalques Fernandes de Paula (2025).

$$Q = V \cdot A \quad (\text{Equação 5})$$

$$0,5 = V \cdot 14,4 \cdot 2,06$$

$$V = 0,0169m/s = 1,01m/min$$

Dessa forma, não é necessário prever um canal para distribuição de água floculada no decantador. Ainda, foi feita uma análise acerca da situação atual da ETA, de modo a assegurar que o decantador funcionará de maneira adequada por um grande intervalo de tempo. Os sistema de tratamento Bom Jardim funciona de maneira conjunta e integrada com mais dois sistemas, sendo eles o Sucupira e Capim branco. As vazões tratadas pela ETA Bom Jardim variam de 1400 litros por segundo a 1600 litros por segundo, sendo direcionados para os decantadores de concreto de 350 litros por segundo a 400 litros por segundo. Com isso fez-se a análise das velocidades longitudinais dentro dos decantadores de concreto para essas vazões, mostradas a seguir:

$$Q = V \cdot A \quad (\text{Equação 5})$$

$$0,35 = V \cdot 14,4 \cdot 2,06$$

$$V = 0,0118m/s = 0,71m/min$$

E

$$Q = V \cdot A \quad (\text{Equação 5})$$

$$0,40 = V \cdot 14,4 \cdot 2,06$$

$$V = 0,0135m/s = 0,81m/min$$

Ou seja, a ETA possui uma grande margem de trabalho, garantindo qualidade e eficiência na sua operação.

9 DISCUSSÕES

A proposta de reforma do decantador de alta taxa teve como objetivo corrigir falhas graves que comprometiam o desempenho da unidade, com destaque para o arraste excessivo de lodo para os filtros da estação. Tal situação resultava em reduções significativas na carreira de filtração, aumentando o consumo de água nas lavagens, o desgaste dos filtros e a instabilidade do sistema como um todo. A solução proposta se concentrou em manter as dimensões internas do decantador, preservando a estrutura existente, como calhas de coleta, poços de lodo e compartimentos hidráulicos, e atuar diretamente na substituição dos módulos lamelares, que antes possuíam apenas 50 centímetros de comprimento, por novos módulos com 1,10 metro de comprimento inclinados a 60 graus, resultando em uma projeção vertical de 0,95 metro.

As alturas parciais do decantador foram cuidadosamente consideradas para garantir o funcionamento eficiente do sistema reformado. A altura do poço de lodo (Hp1), responsável pelo acúmulo e armazenamento do lodo sedimentado, foi mantida em 1,85 metro, uma vez que já se encontra construída e apresenta dimensões compatíveis com a frequência de remoção e a quantidade de lodo gerado com base no tipo de coagulante utilizado. Acima do poço de lodo, a zona de separação (Hp2) foi definida como 2,06 metros, valor que se mostrou adequado para evitar a necessidade da instalação de um duto distribuidor para a água floculada. Segundo recomendações técnicas como as de Sidney Seckler, valores de velocidade próximos a 1,00 m/min favorecem a boa distribuição hidráulica sem gerar turbulência excessiva, o que evita a remobilização do lodo sedimentado.

Logo acima, a altura correspondente à projeção vertical dos novos módulos de sedimentação (Hp3) foi definida em 0,95 metro, valor resultante da inclinação de 60 graus dos módulos de 1,10 metro

de comprimento. Essa modificação contribuiu de maneira direta para a melhoria do desempenho da sedimentação, ampliando significativamente a área útil para a deposição das partículas em suspensão. Acima dos módulos, a zona de coleta da água decantada (Hp4) foi estabelecida em 0,64 metro, respeitando os limites recomendados pela norma ABNT NBR 12216, que define que essa altura deve estar compreendida entre

$L_c/2 - h_b$ e $L_c/2$, sendo L_c o espaçamento entre calhas e h_b a altura da calha de água decantada. Considerando que a altura da calha de coleta é de 56 centímetros, a altura adotada garante a operação hidráulica segura e eficaz.

Com base no novo arranjo dos módulos, foi calculada a velocidade crítica de sedimentação utilizando a fórmula de Yao, resultando em um valor de 0,877 cm/min. Esse dado é tecnicamente muito significativo, pois representa a menor velocidade necessária para que uma partícula consiga sedimentar dentro do módulo. Como a NBR 12216/2017 estabelece o valor de 1,0 cm/min como referência para a eficiência mínima em unidades deste tipo, o valor obtido está abaixo do limite normativo, evidenciando que todas as partículas com velocidade superior a 0,877 cm/min serão retidas. Isso representa um avanço em relação à configuração anterior, onde a baixa extensão dos módulos dificultava o processo de deposição, favorecendo o arraste para os filtros. Com os novos módulos, a tendência é que partículas mais densas e volumosas sejam eficientemente retidas, reduzindo consideravelmente a sobrecarga da etapa de filtração.

A verificação do sistema de coleta de água decantada demonstrou também a viabilidade de se manter as calhas existentes, sem necessidade de modificações. A vazão por metro linear de calha foi calculada em 1,44 L/s por metro, valor bastante inferior ao limite máximo de 2,5 L/s por metro estipulado pela NBR 12216/2017. Isso assegura que a água coletada após a sedimentação será distribuída de forma homogênea e com margens hidráulicas adequadas para evitar extravasamentos, turbulências ou sobrecargas. Adicionalmente, foi avaliada a altura da lâmina d'água no interior dessas calhas, a qual atingiu 24 centímetros. Considerando que a altura total disponível das calhas é de 50 centímetros, a operação se mantém em condições hidráulicas adequadas, o que indica que o sistema de coleta poderá operar com folga mesmo em condições de pico de vazão.

A verificação do sistema de descarga de lodo foi realizada com base na estrutura já existente da unidade, considerando a necessidade de remoção eficiente do material sedimentado. Analisando-se o tempo estimado de esvaziamento de 2 horas — valor compatível com o porte da estação e com os padrões operacionais geralmente adotados — concluiu-se que a tubulação instalada, com diâmetro de 200 milímetros, é adequada para essa finalidade. O tempo de escoamento encontra-se dentro da faixa considerada ideal para; garantir a retirada contínua do lodo sem a ocorrência de entupimentos, refluxos ou necessidade de intervenções frequentes. Assim, a verificação confirmou que não há necessidade de alterações no sistema de descarte, assegurando a funcionalidade da estrutura existente após a reforma proposta.

De forma geral, os resultados obtidos mostram que a reforma proposta terá impacto direto e positivo na operação da estação de tratamento. Ao melhorar a eficiência da sedimentação, a quantidade de lodo que chega aos filtros será significativamente reduzida, o que permitirá uma ampliação da carreira de filtração — ou seja, o intervalo de tempo entre duas lavagens sucessivas dos filtros. Como consequência, espera-se uma diminuição no consumo de água utilizada nas lavagens, redução no desgaste dos meios filtrantes e maior estabilidade operacional da estação. Além disso, o aumento da carreira de filtração contribui para a otimização energética e química do sistema, já que haverá menos interrupções no processo e menor uso de produtos para reposição da eficiência dos filtros. A reforma, portanto, apresenta não apenas viabilidade técnica, mas também econômica e operacional, sem a necessidade de intervenções civis significativas, aproveitando ao máximo a estrutura existente do decantador. Trata-se de uma solução de baixo custo relativo e alto impacto, capaz de resolver problemas operacionais crônicos e melhorar o desempenho geral da estação de tratamento.

REFERENCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12216**: Projeto de estação de tratamento de água para abastecimento público - Procedimento. Rio de Janeiro, 1992.

BRASIL. Portaria nº 2914, de 12 de dezembro de 2011. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. **Ministério da Saúde**. Brasília, DF, 12 dez. 2011.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B. **Métodos e Técnicas de Tratamento de Água**. São Paulo: Rima, v. Volume 1, 2005.

TECNOSAN. **Memorial descritivo e de cálculo da ETA Bom Jardim do DMAE em Uberlândia**. Uberlândia. 1982.

YAO, K. M. **Theoretical study of high-rate sedimentation**. *Journal of the Water Pollution Control Federation*, 42, fev. 1970. p. 218-228.

SECKLER, S. **Tratamento de Água - Concepção, Projeto e Operação de Estações de Tratamento**, LTC, 2017. v. Volume 1

HAZEN, A. On Sedimentation. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, Nova York, 53, dez. 1904. p. 45-71.

RICHTER, C. A.; NETTO, J. M. D. A. **Tratamento de água tecnologia atualizada**. 5ª. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1991.

TAKAKO, B. **PROPOSTA DE CONCEPÇÃO E DIMENSIONAMENTO DAS PARTES CONSTITUINTES DOS DECANTADORES DE ALTA TAXA EM CONCRETO ARMADO, DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA BOM JARDIM, EM UBERLÂNDIAMG, VISANDO SUA REFORMA E AUMENTO DE EFICIÊNCIA PARA TRATAMENTO DA VAZÃO DE OUTORGA MÁXIMA DE 2 M³/S AFLUENTE À ETA**. Trabalho De Conclusão De Curso — Universidade Federal de Uberlândia, 2017

PAULA, Iridalques Fernandes de. **Material didático – Dimensionamento do decantador de alta taxa**. Uberlândia – MG, 2025.