



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO TECNOLÓGICO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

JOÃO CHAGAS MONTEIRO

WILLIAM LEMOS DA SILVA

**ANTEPROJETO DE UMA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO  
SANITÁRIO DOTADA DE UM SISTEMA DE *WETLAND* FRANCÊS SEGUIDO  
DE FILTROS REATIVOS DE ESCÓRIA DE ACIARIA**

VITÓRIA

2019

JOÃO CHAGAS MONTEIRO

WILLIAM LEMOS DA SILVA

**ANTEPROJETO DE UMA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO  
SANITÁRIO DOTADA DE UM SISTEMA DE *WETLAND* FRANCÊS SEGUIDO  
DE FILTROS REATIVOS DE ESCÓRIA DE ACIARIA**

Projeto de Graduação II  
apresentado ao Departamento de  
Engenharia Ambiental da Universidade  
Federal do Espírito Santo como requisito  
para obtenção de grau de bacharel em  
Engenharia Ambiental.

Orientador: Professor Dr. Ing.  
Ricardo Franci Gonçalves

VITÓRIA

2019

## **AGRADECIMENTOS**

Agradecemos primeiramente a Deus, que nos proporcionou a vida e que sempre nos acolheu nos momentos mais difíceis.

Aos nossos pais, Anneliese e Luiz Paulo e Valtércio e Cristina, pelo carinho e dedicação de uma vida toda e nos dando condições para seguir em frente;

À Carolina Néspoli, por todo carinho e apoio durante toda a trajetória;

Ao nosso professor orientador, Dr. Ing. Ricardo Franci Gonçalves, por toda orientação ao longo do desenvolvimento do trabalho;

Aos caros, Rodrigo Nunes Oss e Mário Rodrigues Peres, por aceitarem o convite para participar desta banca examinadora;

À toda equipe do Núcleo Água, pela empatia e por terem nos ajudado e compartilhado conosco conhecimento, todas as vezes que precisamos;

Aos queridos amigos da UFES, pelo companheirismo durante toda a trajetória do curso.

A todos, nosso muito obrigado.

## RESUMO

O setor de saneamento é fundamental para o desenvolvimento e o bem-estar da população. No Brasil, a falta de planejamento e priorização afetam diretamente a qualidade de vida da população de diversos municípios. Apenas 54% dos esgotos são coletados e tratados da forma correta, principalmente nas capitais e grandes cidades do país. A necessidade do desenvolvimento de sistemas de tratamento de esgoto para populações adjacentes aos grandes centros urbanos cresceu em todo o mundo nas últimas décadas. O sistema de *wetlands* construídos se destaca por ser um sistema eficiente na remoção de, principalmente, de matéria orgânica e sólidos suspensos, necessitar de pouca área superficial se comparado aos tratamentos convencionais, além de ser de baixo custo de implantação, operação e manutenção. Este sistema se mostra ainda melhor quando utilizado para tratar esgotos de regiões de climas quentes, como o Brasil. Estudos mostram que sua área superficial pode ser reduzida, mantendo a eficiência do tratamento. O sistema de *wetlands* construídos apresentam baixa eficiência na remoção de fósforo e nitrogênio total, principais causadores do processo de eutrofização. Estudos mostram que a utilização de coprodutos industriais para desenvolver sistemas de tratamento é uma alternativa sustentável. A escória de aciaria, por exemplo, se mostrou extremamente eficiente na remoção de poluentes, principalmente o fósforo. A bibliografia mostra que a eficiência da remoção deste nutriente pode chegar a 99%. O presente trabalho propôs o desenvolvimento de um sistema de tratamento de esgoto sanitário, para populações de 1000 a 5000 habitantes, dotado de um *wetland* construído do tipo francês seguido de um filtro reativo de escória de aciaria, baseado nas concentrações de entrada e saída do sistema para o cálculo das áreas superficiais do sistema. Os resultados projetados foram satisfatórios, com geração de efluente de boa qualidade. A área superficial de todo o sistema foi de 1,20 m<sup>2</sup>/hab., sendo este um número inferior aos sistemas de tratamento convencionais.

**Palavras-chave:** tratamento de efluentes, *wetland* francês, filtro de escória de aciaria.

## ABSTRACT

The sanitation sector is fundamental to the development and well-being of the population. In Brazil, the lack of planning and prioritization directly affects the quality of life of the population of several municipalities. Only 54% of sewage is collected and treated correctly, especially in the capitals and large cities of the country. The need to develop sewage treatment systems for populations adjacent to large urban centers has grown worldwide in recent decades. The built wetland system stands out because it is an efficient system in the removal of mainly organic matter and suspended solids, requiring little surface area compared to conventional treatments, besides being low cost of implementation, operation and maintenance. This system is even better when used to treat sewage from warm climate regions such as Brazil. Studies show that its surface area can be reduced while maintaining treatment efficiency. The system of built wetlands have low efficiency in the removal of phosphorus and total nitrogen, main causes of eutrophication process. Studies show that the use of industrial co-products to develop treatment systems is a sustainable alternative. Steel slag, for example, proved to be extremely efficient in removing pollutants, especially phosphorus. The bibliography shows that the efficiency of removal of this nutrient can reach 99%. The present work proposed the development of a sanitary sewage treatment system for populations from 1000 to 5000 inhabitants, with a French-built wetland followed by a reactive steel slag filter based on the system inlet and outlet concentrations for the calculation of the surface areas of the system. The projected results were satisfactory, with good quality effluent generation. The surface area of the entire system was 1.20 m<sup>2</sup>/inhabitant, which is a smaller number than conventional treatment systems.

**Keywords:** effluent treatment, french *wetland*, steel slag filter.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma do tratamento preliminar .....	15
Figura 2 – Esquema de um tanque de sedimentação circular .....	16
Figura 3 – Esquema de um tanque séptico .....	17
Figura 4 – Diagrama simplificado do metabolismo bacteriano .....	18
Figura 5 – Esquemática de uma lagoa de estabilização.....	18
Figura 6 – Esquemática dos principais tipos de wetlands .....	19
Figura 7 – Balanço hídrico nos wetlands construídos.....	24
Figura 8 – Balanço hídrico em um wetland sujeito apenas à evapotranspiração e precipitação .....	26
Figura 9 – Balanço energético em um wetland.....	27
Figura 10 – Esquema representativo do perfil longitudinal do wetland construído de escoamento subsuperficial.....	28
Figura 11 – Esquema representativo do perfil longitudinal do wetland construído de escoamento vertical .....	29
Figura 12 – Esquema representativo do perfil longitudinal do wetland construído de escoamento vertical do tipo francês.....	30
Figura 13 - Fluxograma das atividades.....	34
Figura 14 – Esquemática do leito filtrante do 1º estágio do wetland francês .....	46

## LISTAS DE TABELAS

Tabela 1 - Mecanismos de remoção dos poluentes e parâmetros no tratamento com os wetlands .....	21
Tabela 2 – Exemplos de meios de retenção de fósforo .....	23
Tabela 3 – Composição química de referência da escória de aciaria.....	31
Tabela 4 – Estudos de remoção de fósforo em filtros de escória de aciaria	32
Tabela 5 – Valores limites de concentração de fósforo em zonas sensíveis a eutrofização .....	33
Tabela 6 – Características físico-químicas do esgoto bruto em países em desenvolvimento.....	35
Tabela 7 – Populações de projeto .....	37
Tabela 8 – Consumo de água por habitante de acordo com a renda .....	38
Tabela 9 – Características físico-químicas do esgoto bruto em países em desenvolvimento.....	42
Tabela 10 – Valores adotados de carga per capita para cada parâmetro ..	42
Tabela 11 - Resultados obtidos de carga afluente.....	43
Tabela 12 - Resultados obtidos da concentração afluente .....	43
Tabela 13 – Valores máximos de taxa de aplicação orgânica e hidráulica superficial .....	44
Tabela 14 - Resultados das áreas superficiais .....	45
Tabela 15 - Dimensões características do leito filtrante do wetland francês .....	46
Tabela 16 - Fator de remoção de cada poluente .....	49
Tabela 17 - Resultados de carga e concentração efluente após 1º estágio do wetland francês.....	50
Tabela 18 - Resultados do dimensionamento do filtro de escória de aciaria .....	52
Tabela 19 - Resultados finais do dimensionamento do sistema.....	56
Tabela 20 - Parâmetros de projeto para 1000 habitantes.....	62
Tabela 21 - Carga e concentração do afluente do projeto de 1000 habitantes .....	62
Tabela 22 - Dimensionamento de wetland francês para 1000 habitantes ..	62
Tabela 23 – Dimensionamento do filtro de escória para 1000 habitantes ..	62

Tabela 24 - Qualidade do efluente final do sistema para 1000 habitantes .	62
Tabela 25 - Parâmetros de projeto para 2000 habitantes.....	63
Tabela 26 - Carga e concentração do afluente do projeto para 2000 habitantes.....	63
Tabela 27 - Dimensionamento de wetland francês para 2000 habitantes ..	63
Tabela 28 - Dimensionamento do filtro de escória para 2000 habitantes ...	63
Tabela 29 - Qualidade do efluente final do sistema para 2000 habitantes .	63
Tabela 30 - Parâmetros de projeto para 3000 habitantes.....	64
Tabela 31 - Carga e concentração do afluente do projeto para 3000 habitantes.....	64
Tabela 32 - Dimensionamento de wetland francês para 3000 habitantes ..	64
Tabela 33 - Dimensionamento do filtro de escória para 3000 habitantes ...	64
Tabela 34 - Qualidade do efluente final do sistema para 3000 habitantes .	64
Tabela 35 - Parâmetros de projeto para 4000 habitantes.....	65
Tabela 36 - Carga e concentração do afluente do projeto para 4000 habitantes.....	65
Tabela 37 - Dimensionamento de wetland francês para 4000 habitantes ..	65
Tabela 38 – Dimensionamento do filtro de escória para 4000 habitantes ..	65
Tabela 39 - Qualidade do efluente final do sistema para 4000 habitantes .	65



## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	11
2.	OBJETIVOS	13
2.1.	OBJETIVO GERAL	13
2.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
3.1.	PROCESSOS DE TRATAMENTO DE ESGOTO	14
3.1.1.	Tratamento preliminar	14
3.1.2.	Tratamento primário	15
3.1.3.	Tratamento secundário	17
3.1.4.	Tratamento terciário	18
3.2.	SISTEMAS DE <i>WETLANDS</i> CONSTRUÍDO	19
3.2.1.	Processos de remoção de poluentes e patógenos	20
3.2.2.	Balanço hídrico e energético	23
3.2.2.1.	Balanço hídrico	24
3.2.2.2.	Balanço energético	27
3.2.3.	<i>Wetland</i> construído de escoamento horizontal subsuperficial	27
3.2.4.	<i>Wetland</i> construído de escoamento vertical	28
3.2.5.	<i>Wetland</i> construído de escoamento vertical do tipo francês	29
3.3.	ESCÓRIA DE ACIARIA	30
3.3.1.	Potencial de remoção de fósforo	31
3.3.2.	Filtros reativos de escória de aciaria	32
3.4.	LEGISLAÇÕES AMBIENTAIS	32
4.	METODOLOGIA	34
4.1.	COLETA DE DADOS	34
4.2.	DESENVOLVIMENTO DO PROJETO	35
5.	RESULTADOS	37

5.1.	DEFINIÇÃO DA POPULAÇÃO DO PROJETO	37
5.2.	CÁLCULO DA VAZÃO TOTAL DO PROJETO	37
5.2.1.	Cálculo da vazão média doméstica	37
5.2.2.	Cálculo da vazão de infiltração	38
5.3.	DIMENSIONAMENTO DO GRADEAMENTO	39
5.4.	DIÂMETRO DAS TUBULAÇÕES	41
5.5.	DIMENSIONAMENTO DO <i>WETLAND</i> FRANCÊS	42
5.5.1.	Carga média per capita	42
5.5.1.1.	Carga e concentração do afluente	43
5.5.2.	Cálculo das áreas superficiais	44
5.5.3.	Características das camadas do leito filtrante do <i>wetland</i> francês	46
5.5.4.	Determinação das características de cada batelada	47
5.5.5.	Tanque de armazenamento	48
5.5.6.	Efluente final após primeiro estágio	49
5.6.	DIMENSIONAMENTO DO FILTRO DE ESCÓRIA DE ACIARIA	50
5.6.1.	Cálculo do volume do filtro reativo de escória de aciaria	50
5.6.2.	Características do leito filtrante do filtro de escória de aciaria	52
5.7.	OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO DO SISTEMA	54
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	56
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57
8.	APÊNDICES	60

## 1. INTRODUÇÃO

A importância do setor de saneamento para a garantia do bem-estar dos indivíduos e da qualidade ambiental é amplamente reconhecida, porém o Brasil ainda enfrenta problemas de priorização de investimentos que maximizem os benefícios para a população.

No Brasil, a Resolução CONAMA nº 357/05 estabeleceu as condições e padrões de lançamento de efluentes em corpos d'água receptores, revogando a Resolução CONAMA nº 20/1986, a primeira que tratou sobre os padrões de lançamento de efluentes. Em 2011, foi aprovada a Resolução CONAMA nº 430/11, que complementa e altera parcialmente a Resolução nº 357/05 (BRASIL, 2011).

Mesmo com a exigência de a legislação para os municípios cumprirem e executarem um Plano Municipal de Saneamento Básico – PMSB a respeito de coleta e tratamento de efluentes, o Brasil ainda apresenta números muito ruins neste quesito. Segundo o Sistema Nacional de Informação sobre Saneamento - SNIS, no ano de 2017, 54% dos esgotos do país ainda não são tratados da forma correta, e ainda, nesse mesmo ano, de acordo com o Instituto Tratar Brasil, o volume de esgoto não tratado lançado de forma incorreta foi de, aproximadamente, 14.055.000 m<sup>3</sup>.

O acesso universal aos serviços de saneamento básico é princípio fundamental da Lei de Diretrizes Nacionais do Saneamento Básico (LNSB), conceituada como a ampliação progressiva do acesso ao saneamento básico para todos os domicílios ocupado. Dessa forma, todos os domicílios, urbanos ou rurais, devem ter disponíveis, de forma progressiva, os serviços de água, esgoto, resíduos e drenagem, este último exigível apenas nas áreas urbanas (BRASIL, 2014). Portanto é preciso a conscientização de que os investimentos nessa área são necessários e de mais alta relevância social.

Existem diversos tipos de tratamento para o esgoto sanitário, os quais são selecionados em função da população atendida, das características do afluente, entre outros fatores. Em paralelo, cresceu nas últimas décadas a utilização dos sistemas descentralizados que possibilitam o atendimento a uma

população menor, com custo de implantação inferior e uma alta eficiência no tratamento (DOTRO *et al.*, 2017).

Uma alternativa que abrange todos estes aspectos são os *wetlands* construídos. Estes são sistemas de fluxo horizontal ou vertical, compostos de uma camada de vegetação e um leito filtrante, que são considerados alternativas sustentáveis para o tratamento de diferentes tipos de esgoto (STEIN *et al.*, 2017).

A eficiência de remoção do fósforo pelo sistema de *wetland* construído é menor se comparada a outros poluentes, como matéria orgânica e sólidos em suspensão (VON SPERLING *et al.*, 2017). Segundo Barca *et al.* (2014), o esgoto sanitário é uma fonte de fósforo que, ao ser descartado em elevadas concentrações nos corpos hídricos, pode causar o processo de eutrofização. Uma solução sustentável e complementar ao tratamento com os *wetlands* construídos é a utilização filtros de coprodutos industriais, como por exemplo, filtros de escória de aciaria, proveniente de indústrias de produção de aço. Os estudos de Barca *et al.* (2014) mostram que a escória de aciaria pode remover mais de 95% do fósforo do efluente.

A busca por soluções sustentáveis trouxe à tona o conceito de economia circular, que surgiu há algumas décadas, porém emergiu fortemente em 2012. Ele consiste na substituição da economia linear e a implantação de um modelo no qual todos os materiais são processados para circular de forma eficiente e serem reutilizados durante a produção, sem perda de qualidade (AZEVEDO, 2015). Além de favorecer a redução dos resíduos destinados aos aterros sanitários, através da coleta, tratamento e reutilização de forma sustentável este conceito promove a reinserção sustentável do esgoto tratado na natureza. Com tudo isso em vista, neste trabalho será apresentado o anteprojeto de um sistema de tratamento de esgoto sanitário, composto por um *wetland* construído francês seguido de um filtro de escória de aciaria, projetado para atender às legislações ambientais com o objetivo de remover, principalmente, matéria orgânica, sólidos em suspensão, fósforo e nitrogênio.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. OBJETIVO GERAL**

Realizar o anteprojeto de uma estação de tratamento de esgoto sanitário dotada de um sistema francês de *wetland* construído seguido de um sistema de filtros de escória de aciaria para pequenas populações.

### **2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Definir critérios e parâmetros de projeto e realizar o dimensionamento dos processos que compõem a ETE;
- Realizar as peças gráficas componentes do anteprojeto.

### **3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **3.1. PROCESSOS DE TRATAMENTO DE ESGOTO**

De acordo com Nuvolari (2003), o nível de tratamento do esgoto depende da análise das condições locais, pois cada cidade possui suas características próprias de clima, topografia, preço dos terrenos, características do corpo receptor, etc., porém do ponto de vista técnico são inúmeras as opções de tratamento conhecidas, cada uma delas com suas vantagens e desvantagens.

No geral, o tratamento de esgoto deve focar na melhoria da qualidade das águas residuárias para causar menores os impactos ao meio ambiente e saúde humana. Os padrões a serem atingido pelo efluente também são determinados pela legislação, que define a qualidade do efluente e do corpo receptor. A remoção dos poluentes durante o tratamento está associada ao conceito de nível e eficiência do tratamento (CHERNICHARO, 2005).

Os constituintes presentes no esgoto podem ser removidos de forma física, química ou biológica (METCALF & EDDY, 2014). Os processos físicos são caracterizados pela predominância de forças físicas. Os processos químicos são caracterizados pela adição de substâncias químicas ou outras reações químicas ocorridas durante o tratamento. Nos processos biológicos a remoção dos poluentes ocorre através de atividades biológicas (METCALF & EDDY, 2014).

Para remover esses constituintes, os processos são agrupados em unidades de tratamento e são classificados como preliminar, primário, secundário, terciário (CHERNICHARO, 2005).

##### **3.1.1. Tratamento preliminar**

Segundo Von Sperling (2014), o tratamento preliminar consiste em mecanismos básicos de remoção como grade metálica, podendo ser uma grade grossa seguida de uma grade fina, ou peneiras rotativas, estáticas ou trituradores instalados logo na recepção do esgoto da rede coletora, com o objetivo de remover sólidos grosseiros.

Figura 1 – Fluxograma do tratamento preliminar



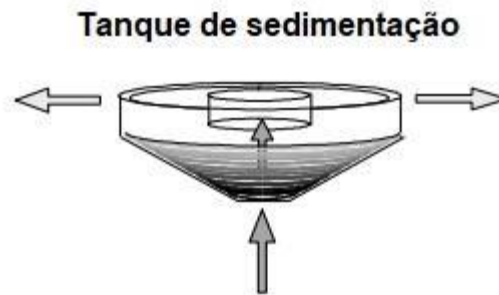
Fonte: Von Sperling (2005)

A remoção dos sólidos retidos pode ser manual ou mecanizada (VON SPERLING, 2014). Nuvolari (2003) descreve que apesar de não ser o local mais apropriado, a população lança no esgoto materiais grosseiros como: pedaços de papel, de plástico, de algodão, fraldas descartáveis, pequenos animais domésticos mortos, etc. As principais finalidades da remoção dos sólidos grosseiros são a proteção dos dispositivos de transporte dos esgotos (bombas e tubulações), a proteção das unidades de tratamento subsequentes e a proteção dos corpos receptores (VON SPERLING, 2014). A remoção dos materiais citados é feita através das grades, seguido do desarenador que consiste em tanques normalmente retangulares ou quadrados com fundo semicônico que removem a areia simplesmente por sedimentação, em seguida é instalada uma calha parshall com o objetivo de medir a vazão de entrada de esgoto através de sensores do nível da água. Após passar pelas unidades de pré-tratamento, o esgoto sem as partículas grosseiras suspensas segue para a próxima etapa de tratamento, o tratamento primário.

### 3.1.2. Tratamento primário

Metcalf e Eddy (2014) afirmam que o tratamento primário tem o objetivo de remover os sólidos suspensos, pois o esgoto após passar pelo tratamento preliminar ainda contém os sólidos em suspensão não grosseiros que serão parcialmente removidos em unidades de sedimentação. Além disso, o tratamento primário remove uma parte considerável dos sólidos em suspensão que é composta por matéria orgânica, o que implica numa remoção da Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e da Demanda Química de Oxigênio (DQO) no tratamento secundário (CHERNICHARO, 2005). A figura 2 mostra um tipo de tratamento primário.

Figura 2 – Esquema de um tanque de sedimentação circular



Fonte: Von Sperling (2005)

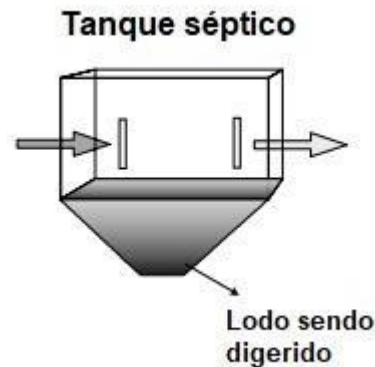
Os tanques de sedimentação podem ser circulares ou retangulares. A remoção dos sólidos em suspensão ocorre pelo simples processo de sedimentação, sendo essa massa de sólidos denominada lodo primário bruto retirado do fundo do tanque através de raspadores mecânicos ou bombas, reduzindo a carga de matéria orgânica dirigida ao tratamento secundário. O processo de sedimentação ocorre através do controle da velocidade de escoamento do fluido.

A eficiência do tratamento primário na remoção de sólidos suspensos pode ser aumentada com a adição de coagulantes, isso é chamado de tratamento primário avançado (CHERNICHARO, 2005).

Tanques sépticos também são uma forma de tratamento primário, conforme mostrado na figura 3. Segundo Chernicharo (2005), os tanques sépticos e suas variantes são basicamente tanques de sedimentação onde os sólidos sedimentados são removidos pelo fundo do tanque. Esse lodo permanece no fundo do tanque por vários meses, o que é suficiente para a sua digestão anaeróbia.



Figura 3 – Esquema de um tanque séptico



Fonte: Von Sperling (2005)

### 3.1.3. Tratamento secundário

Segundo Von Sperling (2005), o tratamento secundário tem por objetivo remover a matéria orgânica que se apresenta na forma de matéria orgânica biodegradável dissolvida que não é removida por processos meramente físicos como a sedimentação, e também remover a matéria orgânica em suspensão, cujos sólidos de sedimentação mais lenta continuam no líquido mesmo após grande parte ser removida no tratamento primário. A desinfecção é um exemplo típico de tratamento secundário (METCALF & EDDY, 2014).

A principal forma de atuação do tratamento secundário é a inclusão do processo biológico que ocorre através de reações bioquímicas realizadas por microrganismos. O material orgânico contido nos esgotos serve de alimento a esses microrganismos que convertem esse alimento em gás carbônico, água e material celular, e em condições anaeróbias tem-se também a produção de metano (CHERNICHARO, 2005).

A figura 4 mostra um processo biológico simplificado do que acontece no tratamento secundário.

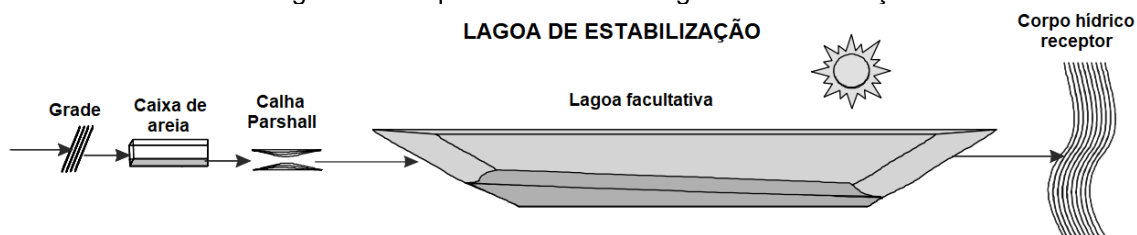
Figura 4 – Diagrama simplificado do metabolismo bacteriano



Fonte: Von Sperling (2005)

De acordo com Von Sperling (2005), um sistema que contém tratamento secundário, nem sempre inclui tratamento primário, mas normalmente possui tratamento preliminar. Há uma grande variedade de sistemas de tratamento em nível secundário, porém os mais utilizados são as lagoas de estabilização e suas variantes, os sistemas de disposição no solo, reatores anaeróbios, os sistemas de lodos ativados e os reatores aeróbios com biofilmes.

Figura 5 – Esquemática de uma lagoa de estabilização



Fonte: Von Sperling (2005)

### 3.1.4. Tratamento terciário

Enquanto no tratamento secundário o foco é a remoção de matéria orgânica e possíveis nutrientes predominantemente por processos biológicos, o objetivo do tratamento terciário é a remoção de poluentes específicos. Esses poluentes podem ser tóxicos ou não biodegradáveis, como por exemplo, metais, sólidos dissolvidos inorgânicos, organismos patogênicos, entre outros (CHERNICHARO, 2005).

Segundo Chernicharo (2005), o tratamento terciário é um complemento ao tratamento secundário, onde seriam removidos poluentes que não foram suficientemente removidos no segundo nível de tratamento. Apesar desse nível de tratamento terciário ser raramente utilizado em países em desenvolvimento, o Brasil possui algumas ETEs com este nível de tratamento.

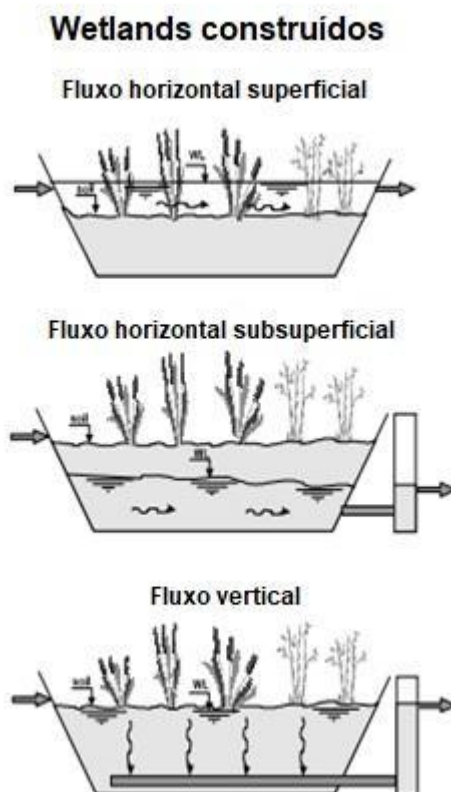
### 3.2. SISTEMAS DE *WETLANDS* CONSTRUÍDO

Os *wetlands* construídos são comprovadamente um sistema eficiente e sustentável para o tratamento de esgoto de pequenas populações. A simplicidade e o baixo custo da operação e manutenção são adequados para este sistema ser uma alternativa de tratamento para pequenas comunidades (MORVANNOU *et al.*, 2015).

Os *wetlands* construídos são diferentes dos sistemas inundados tradicionais, pois apresentam interferência humana para alterar a drenagem, variar o fluxo e propriedades físicas e não causam um elevado impacto ambiental como é causado nos sistemas tradicionais. Os processos biológicos, químicos e físicos são os mecanismos em ação nestes sistemas.

Existem dois tipos básicos de *wetlands* construídos: o fluxo de água pela superfície e o fluxo de água submerso. Quanto a direção, os *wetlands* construídos podem ser classificados como de fluxo vertical ou fluxo horizontal.

Figura 6 – Esquemática dos principais tipos de *wetlands*



Fonte: Von Sperling (2005)

As plantas cumprem importante papel pela função de movimento do caule, proporcionando a existência de espaços livres na camada de sedimento acumulado no topo, por onde o líquido afluyente pode penetrar e dirigir-se ao leito (VON SPERLING & SEZERINO, 2018). Por isso, devem ter um manejo adequado, de forma a maximizar sua eficiência na remoção de poluentes.

A operação e manutenção dos *wetlands* construídos é bem simples. A manutenção dos *wetlands* está associado ao controle de plantas aquáticas invasoras e insetos, que normalmente, só ocorrem quando são utilizados *wetlands* construídos com escoamento superficial (VON SPERLING, 2005). Cortes mais frequentes, realizados durante a fase de crescimento da planta, potencializam uma maior capacidade de extração de nutrientes e outros compostos. A remoção das plantas, após o corte, evita a liberação dos compostos absorvidos.

Em sistemas de grande porte, a biomassa oriunda da poda das macrófitas poderá ser encaminhada para compostagem (VON SPERLING & SEZERINO, 2018).

### **3.2.1. Processos de remoção de poluentes e patógenos**

De acordo com Dotro *et al.* (2017), os *wetlands* construídos são sistemas de tratamento de águas residuais que possuem uma diversidade de tipos de remoção de poluentes e patógenos. Ao contrário de outros sistemas de tratamento nos quais os processos de remoção são otimizados por uma série de operações unitárias projetadas para uma finalidade específica, as plantas dos *wetlands* apresentam vários papéis importantes no tratamento. Primeiramente, seus rizomas e raízes são capazes de fornecer locais de fixação para biofilmes microbianos, aumentando a atividade biológica por área da unidade em comparação com sistemas abertos, como as lagoas. Essas raízes difundem o fluxo e liberam pequenas quantidades de oxigênio e compostos orgânicos, alimentando tanto processos aeróbicos quanto processos anóxicos.

Uma característica única dos tratamentos por *wetland* construído é a sua capacidade de incluir uma variedade de microrganismos contribuindo para o desempenho robusto do sistema (MOLLE *et al.*, 2017).

Existem vários mecanismos de remoção dos poluentes e parâmetros no tratamento com os *wetlands* construídos.

Tabela 1 - Mecanismos de remoção dos poluentes e parâmetros no tratamento com os *wetlands*

<b>Parâmetro</b>	<b>Mecanismo de remoção</b>
Sólidos suspensos	Sedimentação, filtração
Matéria orgânica	Sedimentação e filtração para remoção de matéria orgânica suspensa e degradação biológica para remoção de matéria orgânica dissolvida
Nitrogênio	Amonificação e subsequente nitrificação e desnitrificação, colheita da biomassa através das plantas
Fósforo	Reações de adsorção e colheita da biomassa das plantas
Patógenos	Sedimentação, filtração, decapagem natural

Fonte: Dotro *et al.* (2017)

A matéria orgânica pode ser classificada e medida de várias maneiras (VON SPERLING, 2005). Ela pode ser matéria orgânica em suspensão e matéria orgânica dissolvida e são consideradas como entrada, logo os mecanismos de remoção são diferentes para estes dois casos. Segundo Molle *et al.* (2017), a DQO é usada como principal método analítico para medição da matéria orgânica, porém a DBO também pode ser usado.

Segundo Von Sperling *et al.* (2017), o nitrogênio existe em muitas formas e vários processos o convertem de uma forma para outra em um sistema complexo chamado ciclo do nitrogênio. O nitrogênio entra na maioria das etapas do tratamento primário e secundário como N orgânico e íon ( $\text{NH}_4^+$ ), com os sistemas terciários recebendo uma mistura de espécies de nitrogênio, incluindo nitrato. Na maioria dos *wetlands*, é esperado algum nível de transformação de nitrogênio antes do descarte final em um corpo receptor. Em muitos casos, espera-se a conversão em nitrato, uma forma menos tóxica de nitrogênio, apesar de algumas legislações já exigirem a remoção do nitrogênio total da água residual (VON SPERLING *et al.*, 2017).

Praticamente todas as vias do ciclo do nitrogênio são ativas nos *wetlands*, incluindo amonificação, volatilização da amônia, nitrificação, desnitrificação, absorção vegetal e microbiana, fixação de nitrogênio, redução de nitrato,

oxidação anaeróbica de amônia, adsorção e lixiviação (VYMAZAL,2007 apud NIVALA *et al.*, 2017). No entanto, acredita-se que apenas algumas dessas vias contribuam significativamente para as transformações de nitrogênio e assim, para remoção deste constituinte. A contribuição na remoção de cada via é afetada diretamente pelo tipo de *wetland*, taxa de carga aplicada, tempo de detenção hidráulico, temperatura, tipo de vegetação. (KUSCHK *et al.*, 2003; AKRATOS E TSIHRINTZIS, 2007 apud DOTRO *et al.*, 2017).

O fósforo entra na maioria dos *wetlands* na forma de fósforo orgânico e fosfato, mas a maior parte do fósforo orgânico é convertida em fosfato como parte da degradação da matéria orgânica (LANGERGRABER *et al.*, 2017). Os mecanismos usados na remoção de fósforo são a precipitação química, sedimentação, entre outros. Infelizmente, segundo Langergraber *et al.* (2017), a maioria desses processos é lenta ou inativa, a menos que meios especiais sejam usados para aprimorar esses processos.

Assim como o nitrogênio, as plantas incorporam fósforo em sua biomassa, mas este pode ser um mecanismo de remoção apenas se as plantas forem recolhidas e, portanto, está sujeito às mesmas limitações que a absorção de nitrogênio pelas plantas.

A eficiência do tratamento usando *wetlands* para remoção de fósforo é determinada pela taxa de carga aplicada. Segundo Von Sperling *et al.* (2017), no tratamento de águas residuais usando sistemas verticais e horizontais a remoção é geralmente bastante modesta quando a capacidade de absorção do meio é saturada. Algumas pesquisas foram realizadas para encontrar meios com alta capacidade de absorção de fósforo. Esses meios são chamados de meios reativos. Segue alguns exemplos na tabela 2.

Tabela 2 – Exemplos de meios de retenção de fósforo

Meio	Retenção de Fósforo [g P/kg]
<b>Natural</b>	
Areia	0,1
Apatita	120
<b>Coprodutos industriais</b>	
Escória de alto forno	1-2
Cinzas de óleo de xisto	25-60
<b>Produtos manufaturados</b>	
Filtralite P®	0,5 - 5
Ferrosorp®	Acima de 14

Fonte: adaptado Von Sperling *et al.* (2017)

A remoção de patógenos nos *wetlands* é extremamente complexa devido à variedade de processos que podem levar à remoção ou inativação de bactérias, vírus, protozoários ou parasitas. Segundo Stein *et al.* (2017), a tecnologia oferece uma combinação adequada de mecanismos físicos, químicos e biológicos necessários para remover organismos patogênicos. Os mecanismos físicos incluem filtração e sedimentação, os mecanismos químicos incluem oxidação e adsorção à matéria orgânica e os mecanismos biológicos incluem liberação de oxigênio e atividade bacteriana na raiz, bem como agregação e retenção em biofilmes, morte natural, entre outros.

A maioria dos dados disponíveis sobre a capacidade dos *wetlands* construídos para remover patógenos concentra-se em organismos indicadores fecais. A remoção de organismos indicadores em sistemas de *wetlands* depende do tipo de sistema, das condições operacionais e das características das águas residuais de entrada. Os projetos convencionais de *wetlands* podem remover até 3 unidades  $\log_{10}$  de bactérias fecais, mas a importância relativa de mecanismos de remoção específicos ainda é desconhecida (STEIN *et al.*, 2017).

### 3.2.2. Balanço hídrico e energético

Segundo Molle *et al.* (2017), a superfície da maioria dos sistemas de *wetlands* requer uma análise nos fluxos de água, que vão além da entrada e saída do sistema. A vegetação altera o comportamento hidrodinâmico no *wetland*.

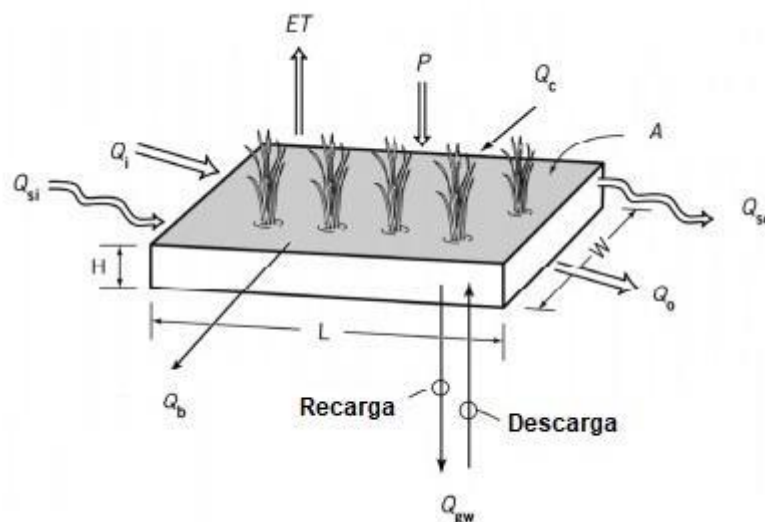
O fluxo de energia entre o *wetland* e o ambiente é importante para alguns fluxos hidrológicos e para evitar o congelamento durante a operação de inverno em regiões frias.

### 3.2.2.1. Balanço hídrico

Os sistemas de *wetlands* são frequentemente usadas para tratar águas pluviais ou o excesso de águas residuais domésticas durante eventos de chuva combinados com o esgoto. A importância de um equilíbrio hidrológico para o projeto é importante nesses casos, pois a maioria da água no sistema alagado está associada à chuva que cai neste sistema. Mas o balanço deve ser considerado mesmo nos casos de sistemas projetados para tratar exclusivamente águas residuais domésticas.

Segundo Langergraber *et al.* (2017), existem vários fluxos de água que devem ser considerados além da entrada e saída do efluente. A figura 7 demonstra isso.

Figura 7 – Balanço hídrico nos *wetlands* construídos



Fonte: Langergraber *et al.* (2017)

O balanço hídrico é representado na equação 1 (KADLEC e WALLACE, 2009 apud DOTRO *et al.*, 2017).

$$Q_i - Q_o + Q_c - Q_b - Q_{gw} + Q_{sm} + (Px A) - (ETx A) = \frac{dV}{dt} \quad (1)$$



Onde:

$Q_i$  é a vazão de entrada do efluente, em  $m^3/d$ ;

$Q_o$  é a vazão de saída do efluente, em  $m^3/d$ ;

$Q_c$  é a taxa de captação superficial, em  $m^3/d$ ;

$Q_b$  é taxa de perda, em  $m^3/d$ ;

$Q_{gw}$  é a taxa de infiltração para lençóis freáticos, em  $m^3/d$ ;

$Q_{sm}$  é a taxa de degelo, em  $m^3/d$ ;

$P$  é a precipitação média,  $m/d$ ;

$A$  é a área superficial do *wetland*, em  $m^2$ ;

$ET$  é a taxa de evapotranspiração, em  $m/d$ ;

$t$  é o tempo, em dias;

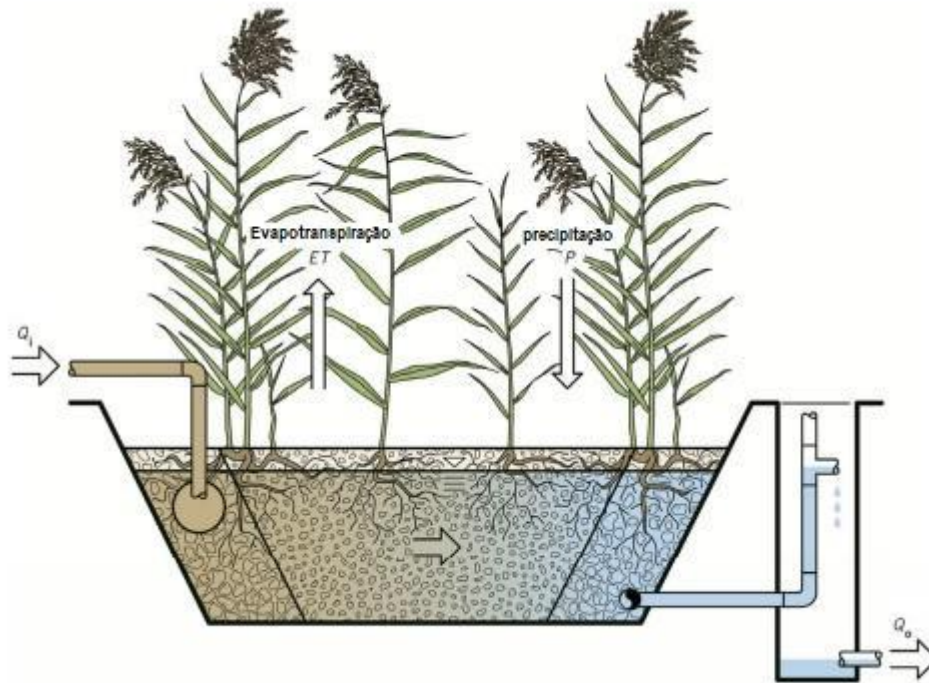
$V$  é o volume de água no *wetland*, em  $m^3$ .

Para o tratamento de *wetland* para esgoto doméstico, essa equação pode ser simplificada, desconsiderando a captação superficial, o degelo, a água que vai para o lençol freático, a acumulação de água e as perdas. A equação simplificada é apresentada abaixo.

$$Q_o = Q_i + (P \times A) - (ET \times A) \quad (2)$$

A figura 8 mostra o esquema simplificado do balanço hídrico em um sistema *wetland*.

Figura 8 – Balanço hídrico em um *wetland* sujeito apenas à evapotranspiração e precipitação



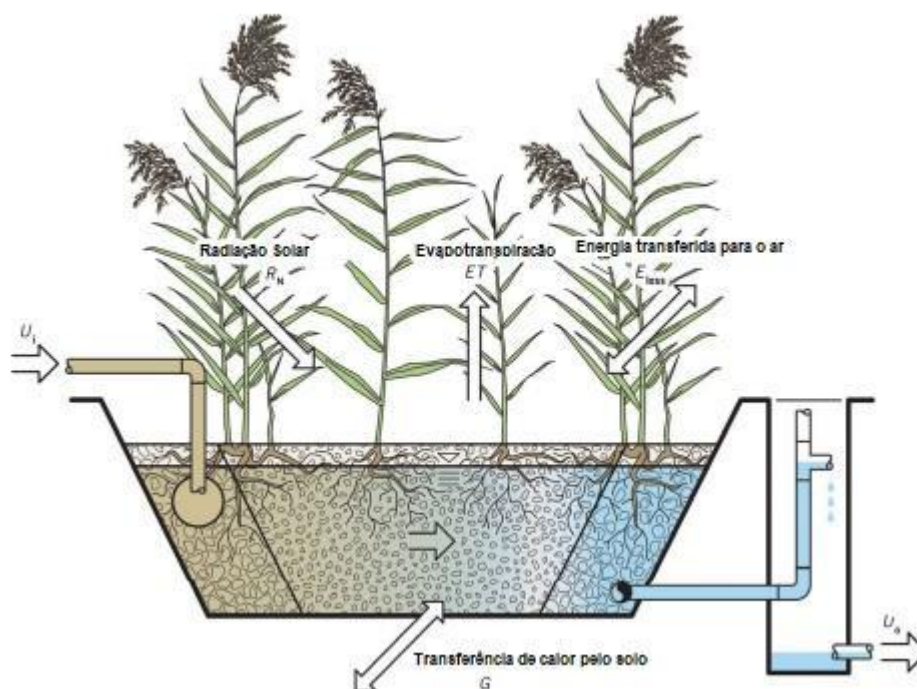
Fonte: Molle *et al.* (2017)

### 3.2.2.2. Balanço energético

Segundo Puigagut *et al.* (2017), um balanço de energia é importante para avaliar as taxas de evapotranspiração quando isso determina um fluxo importante no balanço dos *wetlands*. Outro motivo para aplicar um balanço de energia é evitar ou gerenciar o congelamento de *wetland* no inverno em climas frios. O congelamento de um *wetland* impedirá que a água flua através do meio poroso, sendo necessário aguardar o descongelamento. Os sistemas alagados podem ser operados o ano todo em climas temperados, desde que o nível da água seja aumentado no outono para manter uma camada livre de gelo por baixo.

A figura 9 abaixo mostra o esquema de balanço de energia em um sistema de *wetland*.

Figura 9 – Balanço energético em um *wetland*



Fonte: Puigagut *et al.* (2017)

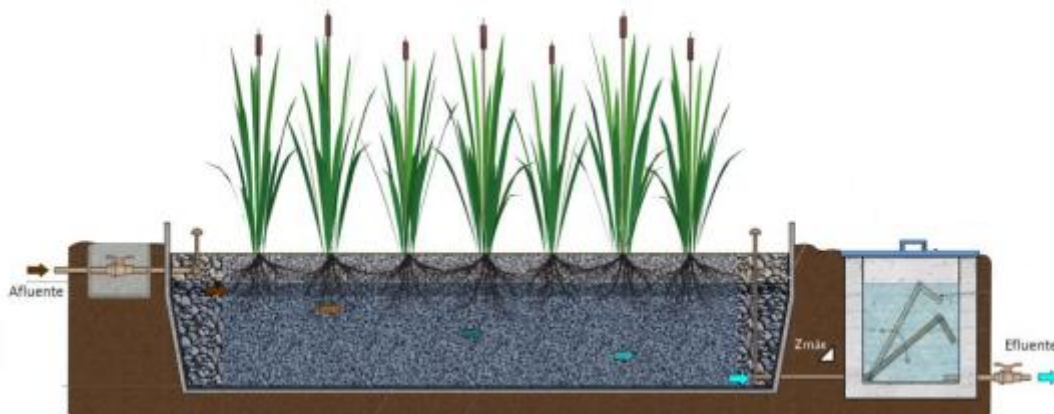
### 3.2.3. *Wetland* construído de escoamento horizontal subsuperficial

Segundo Von Sperling e Sezerino (2018), no *wetland* construído de escoamento horizontal subsuperficial, o líquido a ser tratado é disposto na porção inicial do leito, denominada “zona de entrada” (geralmente composta

por brita de maior porte ou material similar), atingindo a zona principal do leito, por onde irá escoar vagarosamente através do material filtrante (também denominado meio suporte ou substrato; geralmente brita ou cascalho), até atingir a porção final, na extremidade oposta (também composta por brita de maior porte), denominada de “zona de saída”. O escoamento predominante do líquido ocorre de forma horizontal, ao longo da seção longitudinal, e o nível do líquido fica abaixo do nível superior do material filtrante. O escoamento ocorre, portanto, em um meio saturado hidraulicamente, em que os espaços vazios entre os grãos do meio suporte estão preenchidos pelo líquido em tratamento.

O esquema de um *wetland* construído de escoamento horizontal subsuperficial é mostrado na figura abaixo.

Figura 10 – Esquema representativo do perfil longitudinal do *wetland* construído de escoamento subsuperficial



Fonte: Von Sperling & Sezerino (2018)

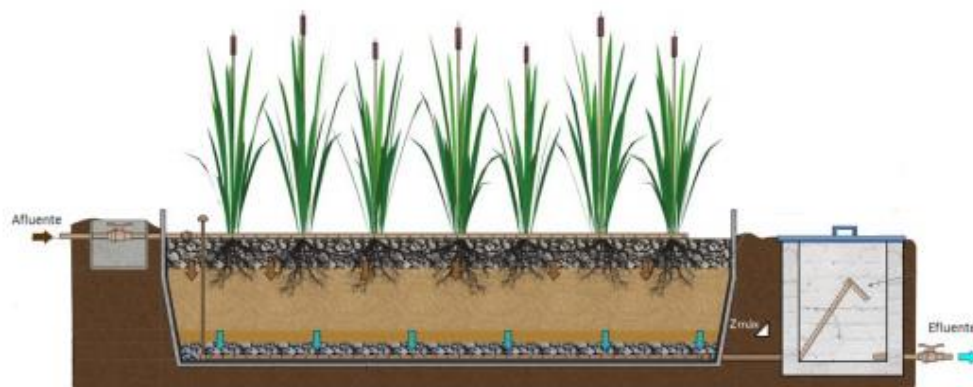
#### 3.2.4. *Wetland* construído de escoamento vertical

De acordo com Von Sperling e Sezerino (2018), no *wetland* construído de escoamento vertical, o líquido a ser tratado é disposto uniformemente sobre toda a área superficial do módulo de tratamento, de forma intermitente, percolando em trajetória descendente por entre o sistema radicular das macrófitas e dos poros do material filtrante, o qual é usualmente composto por areia, até ser coletado no fundo por um sistema de drenagem. O meio permanece não saturado, isto é, os espaços vazios entre os grãos do meio suporte não estão preenchidos com líquido, mas com ar. Entre duas cargas, o ar entra novamente nos poros e areja o filtro para que ocorram principalmente

processos de degradação aeróbica (DOTRO *et al.*, 2017). Em decorrência, predominam condições aeróbias no leito filtrante.

O esquema de um *wetland* de escoamento vertical é mostrado na figura abaixo.

Figura 11 – Esquema representativo do perfil longitudinal do *wetland* construído de escoamento vertical



Fonte: Von Sperling & Sezerino (2018)

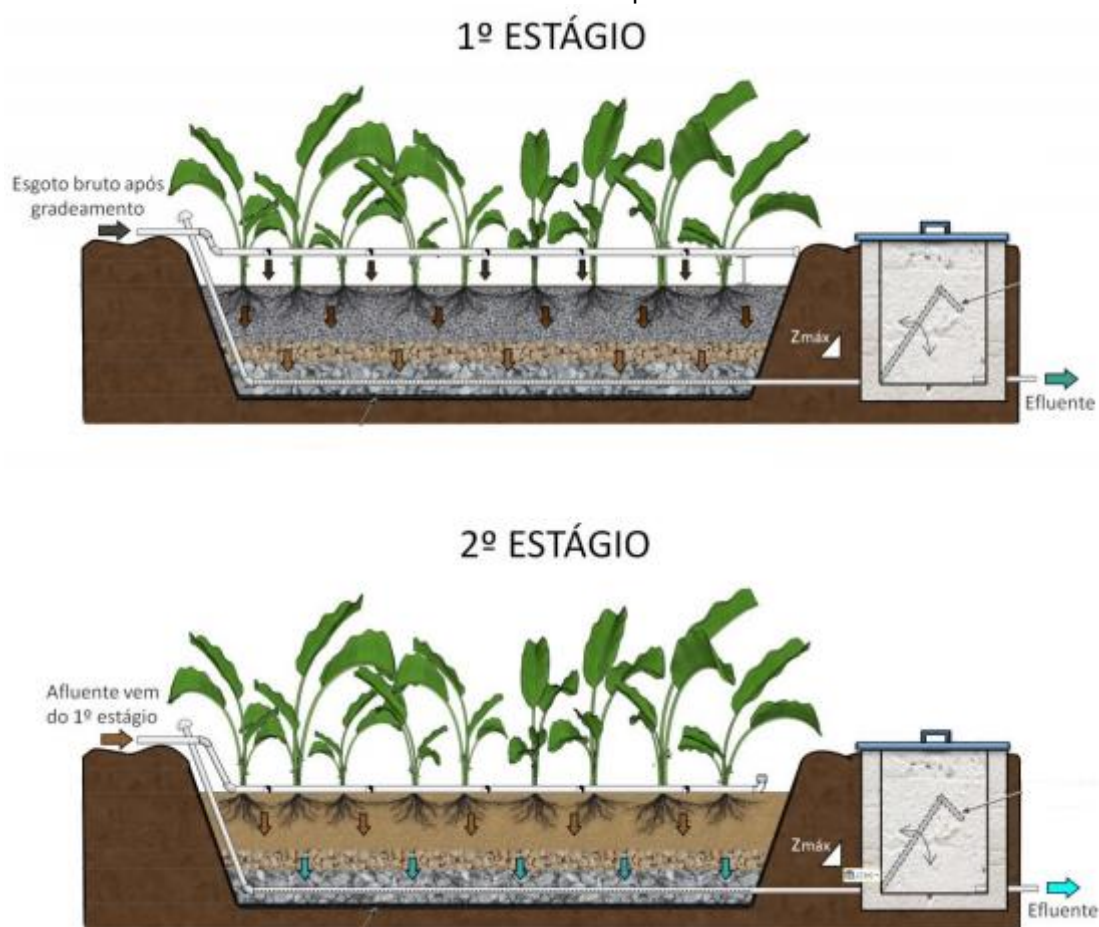
### 3.2.5. *Wetland* construído de escoamento vertical do tipo francês

Os *wetlands* verticais do tipo francês são compostos por uma sequência de dois estágios, porém a configuração deles elimina a necessidade de tratamento primário ou secundário, como os outros sistemas horizontais e verticais. Em regiões onde a descarga de efluentes não é tão rigorosa, o uso apenas do primeiro é satisfatório para o enquadramento (TREIN *et al.*, 2019). Os esgotos são aplicados na superfície do leito e o escoamento é vertical descendente.

Segundo Von Sperling e Sezerino (2018), na concepção clássica do sistema francês, o primeiro estágio é composto por três unidades em paralelo (uma unidade em operação e duas unidades em descanso), ao passo que o segundo estágio é composto por duas unidades em paralelo (uma unidade em operação e uma unidade em descanso). As unidades em operação de ambos os estágios são alimentadas de forma intermitente (várias bateladas ou pulsos por dia), e todas as unidades possuem ciclos operacionais que incluem dias em operação (alimentação) e dias em descanso, com estratégias diferentes para o 1º e o 2º estágios. As bateladas na unidade em operação ocorrem entre

6 e 24 vezes por dia, ou seja, em média, a cada 1 a 4 horas. No primeiro estágio, que recebe esgoto bruto, em locais de clima frio pode haver um intervalo entre bateladas ainda maior, mas em locais de clima quente deve-se levar em consideração que o esgoto bruto sofrerá decomposição no tanque de acumulação, e deve-se evitar a geração de maus odores. Da mesma forma que para os *wetlands* construídos de escoamento vertical, esses também permanecem preenchidos com efluente ou ar, em intervalos de tempo intercalados. Em decorrência, predominam condições aeróbias no leito filtrante.

Figura 12 – Esquema representativo do perfil longitudinal do *wetland* construído de escoamento vertical do tipo francês



Fonte: Von Sperling & Sezerino (2018)

### 3.3. ESCÓRIA DE ACIARIA

A escória de aciaria é gerada na etapa de fabricação do aço em que ocorre a transformação do ferro gusa líquida em aço. Portanto, é um resíduo característico de usinas integradas. É também comumente referenciada como

escória LD, esta sigla deve-se ao fato de o aço ser produzido no convertedor de oxigênio tipo Linz-Donawitz (LD) (ARCELORMITTAL TUBARÃO, 2016).

A composição química da escória de aciaria pode variar de acordo com alterações no processo, e também com variações na composição da sucata, dos aditivos e do gusa. Desta forma, a escória LD apresenta uma composição química de referência apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 – Composição química de referência da escória de aciaria

Elemento	Composição (%)
Óxido de Cálcio	23 - 46
Óxido de Magnésio	5 - 13
Dióxido de Silício	11 - 15
Óxido de Alumínio	0,8 - 4
Ferro total	14 - 22

Fonte: ArcelorMittal Tubarão (2016)

### 3.3.1. Potencial de remoção de fósforo

O fósforo (P) é um nutriente essencial para o crescimento da biomassa. No entanto, um aporte excessivo de P em corpos d'água, como rios, lagos ou lagoas, causa um crescimento anormal de algas e plantas aquáticas, resultando na degradação da qualidade da água (BARCA *et al.*, 2012).

Os sistemas de *wetlands* construídos têm baixa eficiência na remoção de fósforo (DOTRO *et al.*, 2017), podendo não enquadrar o efluente nos padrões da legislação ambiental. Em contrapartida, muitos estudos destacam a remoção de fósforo pela escória LD devido à precipitação do nutriente facilitada pelas condições físico-químicas criadas pela dissolução do  $\text{Ca}^{2+}$  da escória em meio aquoso, o que faz precipitar fosfato de cálcio, que fica retido no meio filtrante (TERRA & SOUZA, 2017). O que indica que a associação dos sistemas de *wetlands* construídos e filtros de escória de aciaria seria uma solução. Segundo Barca *et al.* (2012), a escória de aciaria produzida na Europa é um material eficiente para ser aplicado como meio suporte em filtros designados para remoção de fósforo de efluentes de pequenas plantas de tratamento. Blanco *et al.* (2015) realizaram testes de bancada para avaliar o potencial de remoção de fósforo pela escória de aciaria. Os testes de bancada mostraram eficiências de remoção de fósforo de soluções sintéticas entre 84 e 99%.

### 3.3.2. Filtros reativos de escória de aciaria

Pesquisas para desenvolver tecnologias de baixo custo se tornaram prioridades para cientistas nas últimas duas décadas. Os estudos mostram que a filtração por leito contendo materiais com afinidade com fósforo é uma técnica viável para aumentar a remoção de P (BARCA *et al.*, 2012).

Segundo Avelar (2008), leitos filtrantes com presença de escória apresentam maior capacidade de remoção de nutrientes do que leitos que não contam com a presença da mesma.

Além disso, a escória de aciaria empregada em tratamento de efluentes apresenta melhor eficiência do que agregados naturais, como brita, na remoção de matéria orgânica biodegradável, devido à possível formação de compostos secundários a partir do óxido de cálcio presente neste material (AVELAR, 2008).

Alguns estudos realizados mostram alta remoção de fósforo após passagem do efluente pelo leito filtrante de escória. A tabela 4 apresentada por Barca *et al.* (2014), apresenta resultados obtidos por alguns pesquisadores nos seus respectivos estudos utilizando filtros de escória de aciaria.

Tabela 4 – Estudos de remoção de fósforo em filtros de escória de aciaria

<b>Autores</b>	<b>Resultados Remoção P</b>
Drizo et al. (2006)	>99%
Claveau-Mallet et al. (2012)	>99%
Chazarenc et al. (2007)	80%
Cha et al. (2006)	>99%
Kim et al. (2006)	87%
Barca <i>et al.</i> (2012)	98%

Fonte: adaptado Barca *et al.* (2012)

### 3.4. LEGISLAÇÕES AMBIENTAIS

A legislação que dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes e dá outras providências no Brasil é a Resolução CONAMA n° 357/2005. Essa legislação foi complementada em



2011 pela Resolução CONAMA n° 430/2011, que modificou o padrão de qualidade de água do corpo receptor para alguns parâmetros (BRASIL, 2011). Porém, a legislação brasileira não apresenta os padrões de lançamento para o fósforo.

A legislação da comunidade europeia apresenta padrões para os sistemas de tratamento e o valor determinado para a remoção de fósforo. O parágrafo 3 do artigo 4º do Conselho Diretivo 91/271/CEE da comunidade europeia dispõe das descargas das estações de tratamento de águas residuais urbanas descritas nos números 1 e 2 devem satisfazer os requisitos constantes do anexo I, ponto B. Tais requisitos podem ser alterados nos termos do procedimento previsto no artigo 18 (EUROPEU, 1991).

A tabela 5 apresenta os valores de remoção de fósforo em zonas sensíveis a eutrofização.

Tabela 5 – Valores limites de concentração de fósforo em zonas sensíveis a eutrofização

<b>Parâmetro</b>	<b>População</b>	<b>Concentração</b>	<b>Porcentagem mínima de redução</b>
Fósforo total	10.000 – 100.000	2 mg P/litro	80%
	Acima de 100.000	1 mg P/litro	

Fonte: adaptado Conselho Diretivo 91/271/CEE (1991)

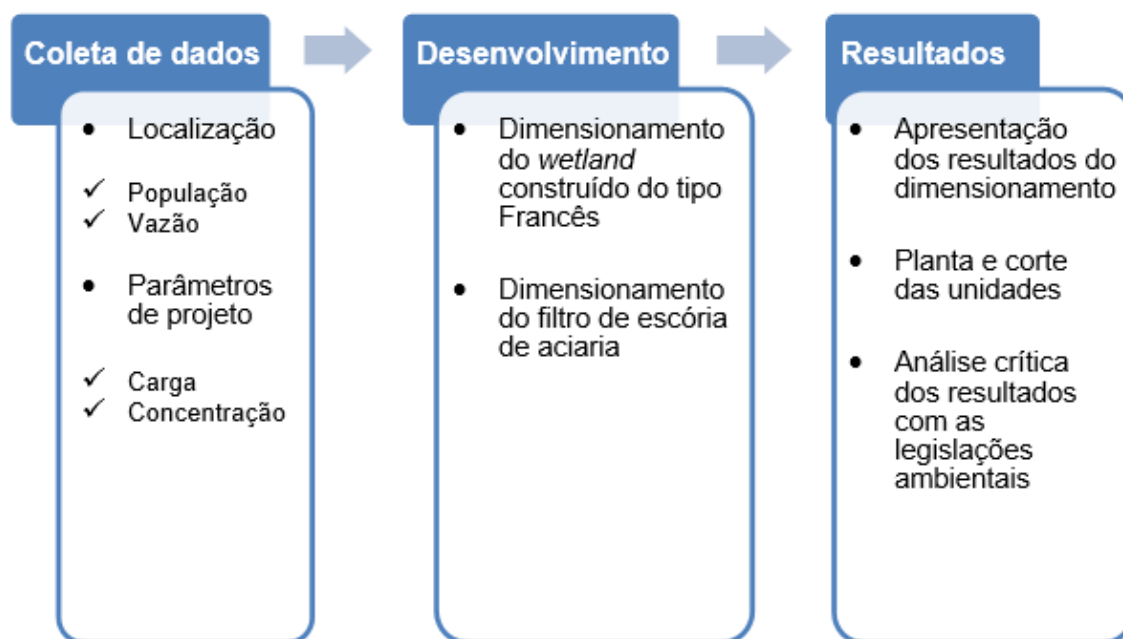
## 4. METODOLOGIA

Inicialmente foi realizada uma pesquisa exploratória, dos principais sistemas de tratamento de esgoto utilizados no Brasil, além do componente do sistema que se encaixava no objetivo do trabalho: a escória de aciaria. Também, fez-se um levantamento da legislação ambiental em relação ao lançamento do efluente, apresentado na revisão bibliográfica.

A metodologia aplicada para o dimensionamento do projeto foi baseado na literatura exposta por Gabriela Dotro, Günter Langergraber, Jaime Nivala, Jaume Puigagut, Otto Stein, Pascal Molle, Marcos von Sperling, Pablo Sezerino e Cristian Barca.

Para aplicação da metodologia foi elaborado um fluxograma para melhor organização das atividades.

Figura 13 - Fluxograma das atividades



Fonte: autoria própria.

### 4.1. COLETA DE DADOS

A população escolhida foi baseada em estudos anteriores que mostram que os sistemas alagados são bastante eficientes para populações pequenas. Dotro *et*

al. (2017) observaram alta eficiência de remoção de poluentes para os *wetlands* construídos em regiões de clima tropical. Sendo assim, a alternativa de *wetland* do tipo francês torna-se adequada para os diversos municípios que não possuem ou possuem sistema de tratamento de esgoto precário.

A carga e a concentração dos parâmetros foram baseadas nos estudos de Von Sperling (2005) realizados em países em desenvolvimento de clima tropical. Os parâmetros apresentados serão: DBO, DQO, nitrogênio total, fósforo total e sólidos suspensos.

Tabela 6 – Características físico-químicas do esgoto bruto em países em desenvolvimento

Parâmetro	Carga per capita [g/hab.dia]	
	Intervalo	Média
SST	35 - 70	60
DBO	40 - 60	50
DQO	80 - 120	100
NTK	6,0 – 10,0	8,0
Fósforo total	0,7 – 2,5	1,0

Fonte: adaptado Von Sperling (2005)

## 4.2. DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

A partir do volume 7 da série *Biological Wastewater in Warm Climate Regions* foi realizado o dimensionamento do *wetland* construído sistema francês. Os estudos mostram que em regiões de clima quente, a utilização de apenas o primeiro estágio do sistema do *wetland* construído francês clássico é satisfatório para a remoção necessária dos poluentes. Segundo Trein *et al.* (2019), o número de células do primeiro estágio pode ser reduzido de três para duas mantendo a eficiência do sistema.

Baseado nestes estudos, este projeto apresenta o dimensionamento do sistema francês de *wetlands* construídos contendo duas células, em paralelo, do primeiro estágio.

Porém, os sistemas de tratamento de *wetlands* construídos têm baixa eficiência na remoção de fósforo (MOLLE *et al.*, 2017), podendo não enquadrar o efluente nos padrões da legislação ambiental. Com isso, os estudos de Barca *et al.* (2012) apresentaram uma metodologia para o cálculo do volume do filtro de escória de aciaria baseado nas concentrações de fósforo do efluente na entrada e saída do filtro.

A equação para o cálculo do volume do filtro proposta por Barca deriva do modelo k-C\* de Kadlec & Knight (1996) que propõe uma equação de balanço de massa que descreve a remoção de vários poluentes e parâmetros em *wetlands* baseado nos modelos de área. O modelo de Kadlec & Knight utiliza as concentrações de entrada e saída aplicadas ao parâmetro requerido e às taxas superficiais de área, para obter as dimensões do *wetland*.

Assim, Barca *et al.* (2014) adequou o modelo k-C\* para os filtros reativos de escória de aciaria, gerando uma equação que fornecesse o volume de um filtro de escória de aciaria.

## 5. RESULTADOS

### 5.1. DEFINIÇÃO DA POPULAÇÃO DO PROJETO

O *wetland* construído dimensionado neste trabalho foi projetado para diferentes números de habitantes, afim de abranger diferentes populações. A tabela 7 abaixo mostra os valores adotados para população de projeto.

Tabela 7 – Populações de projeto

População de projeto
1000 habitantes
2000 habitantes
3000 habitantes
4000 habitantes
5000 habitantes

Fonte: autoria própria

Os cálculos demonstrados do anteprojeto neste tópico foram realizados para a população de 5000 habitantes. Os resultados obtidos para as outras populações do projeto estão dispostos no apêndice.

### 5.2. CÁLCULO DA VAZÃO TOTAL DO PROJETO

A vazão total do projeto é dada pela soma da vazão média doméstica e vazão de infiltração.

$$Q = Q_{med} + Q_{inf} \quad (2)$$

Onde:

Q = vazão total do projeto, em m<sup>3</sup>/dia;

Q<sub>med</sub> = vazão média doméstica, em m<sup>3</sup>/dia;

Q<sub>inf</sub> = vazão de infiltração, em m<sup>3</sup>/dia.

#### 5.2.1. Cálculo da vazão média doméstica

A vazão de esgoto média doméstica é dada pela equação 3 abaixo:

$$Q_{med} = \frac{Pop. \times L_{pc} \times R}{1000} \left[ \frac{m^3}{d} \right] \quad (3)$$

Onde:

$Q_{med}$  = vazão média doméstica, m<sup>3</sup>/dia;

Pop. = População de projeto, em habitantes [hab.];

$L_{pc}$  = Consumo de água per capita, em litros/hab.dia;

R = Coeficiente de retorno.

O consumo de água per capita é uma variável dependente da renda da população, como mostra a tabela abaixo:

Tabela 8 – Consumo de água por habitante de acordo com a renda

Renda	Consumo de água per capita [litros/hab.dia]	
	Pouca chuva	Muita chuva
Baixa	120-165	130-190
Alta	140-180	150-200

Fonte: adaptado Von Sperling (2005)

O valor adotado para o consumo per capita, afim de abranger as regiões de baixa renda, foi de 150 litros/hab.dia.

O coeficiente de retorno é a representação da proporção entre o esgoto coletado por toda a água coletada pela rede. Os valores variam entre 60% e 100% (Von Sperling, 2005), o valor adotado foi de 80%, isto é, R = 0,8.

$$Q_{med} = \frac{5000 \times 150 \times 0,8}{1000}$$

$$Q_{med} = 600 \frac{m^3}{dia}$$

### 5.2.2. Cálculo da vazão de infiltração

A vazão de infiltração é dada pela equação 4 abaixo:

$$Q_{inf} = T_{inf} \times L_{pr} \times Pop. \left[ \frac{m^3}{dia} \right] \quad (4)$$

Onde:

Pop. = população de projeto, em habitantes;

$Q_{inf}$  = vazão de infiltração, em m<sup>3</sup>/dia;

$T_{inf}$  = Taxa de infiltração da rede coletora, em m<sup>3</sup>/dia.km;

$L_{pr}$  = Extensão da rede coletora per capita, em m/hab.

Segundo ABNT NBR 9649, os valores da taxa de infiltração variam de 0,05 a 1,0 litros/s.km. Para o projeto, o valor adotado de  $T_{inf} = 0,2$  litros/s.km que corresponde ao valor de  $T_{inf} = 0,017$  m<sup>3</sup>/dia.m.

Em locais onde a densidade populacional é pequena, estudos preliminares mostram que a rede coletora varia de 2,0 a 3,0 m para cada habitante (VON SPERLING, 2005). Para o presente projeto, o valor adotado foi de 2,0 m de rede para cada habitante. Assim, o valor da vazão de infiltração foi de:

$$Q_{inf} = 0,017 \times 2,0 \times 5000$$

$$Q_{inf} = 170 \frac{m^3}{dia}$$

Com o exposto, tem-se a vazão total de entrada do projeto descrita na equação 2 foi:

$$Q = Q_{med} + Q_{inf}$$

$$Q = 770 \frac{m^3}{dia}$$

### 5.3. DIMENSIONAMENTO DO GRADEAMENTO

No sistema de *wetland* francês seguido dos filtros de escória é necessário a instalação de um tratamento preliminar para garantir a eficiência de todo o sistema. O sistema não preconiza a inclusão de um desarenador. O sistema de gradeamento foi dimensionado seguindo a NBR 12.208/92 que dispõe de normas para a remoção de sólidos grosseiros.

Segundo a NBR 12.208/92, as grades podem ser de limpeza manual ou mecanizada. A limpeza mecanizada deve ser utilizada quando a vazão do sistema for igual ou superior a 250 litros/s. Para este anteprojeto, foi verificado que o uso de um sistema de limpeza manual satisfaz esta norma.

De acordo com a NBR 12.208/92, a vazão de dimensionamento das grades deve ser a vazão máxima afluyente à unidade, sendo esta de 770 m<sup>3</sup>/dia.

A velocidade de passagem entre barras não deve ser muito elevada, a fim de não arrastar o material previamente retido; por outro lado, não deverá ser muito baixa, a fim de não permitir o acúmulo do material de sedimentação. De acordo com a NBR 12.208/92 a velocidade máxima deverá ser de 1,20 m/s. Foi adotada a velocidade de 0,6 m/s.

Quanto a inclinação das grades, a NBR 12.208/92 recomenda uma inclinação de 45° a 60° para a limpeza manual, para o anteprojeto fez-se o uso de 45°.

O espaçamento entre barras é adequadamente projetado para reter o material que se pretende remover, com baixa perda de carga. De acordo com a NBR 12.208/92, o espaçamento entre barras de grades finas deverá ser de 10 a 20 mm. No sistema da ETE foi utilizado 15 mm.

Foram adotados os valores de espessura das barras iguais a 8 mm, sendo este valor típico para barras finas (JORDÃO E PESSÔA, 2011).

De acordo com a NBR 12.208/92, a perda de carga mínima a ser considerada no cálculo para que ocorra o fluxo normal dos esgotos para grades de limpeza manual é de 0,15 m.

O cálculo da eficiência das grades finas foi calculado na equação abaixo.

$$E_{gf} = \frac{a}{(a + t)} \quad (5)$$

Onde:

$E_{gf}$  = eficiência do gradeamento, em %;

$a$  = espaçamento entre as barras, em mm;

$t$  = espessura das barras, em mm.

A eficiência do gradeamento foi  $E_{gf} = 65\%$ .

A área útil das grades foi calculada a partir da vazão do projeto e a velocidade de passagem entre as barras proposta pela NBR 12.208/92.



$$A_u = \frac{Q}{V_{bf}} \quad (6)$$

Onde:

$A_u$  = área útil por onde o esgoto passa, em m<sup>2</sup>;

$Q$  = vazão total do projeto, em m<sup>3</sup>/s;

$V_{bf}$  = velocidade de passagem nas barras finas, em m/s.

A área útil do gradeamento foi de  $A_u = 0,015$  m<sup>2</sup>.

Com isso, calculou-se a área de passagem transversal do efluente no canal, baseado na eficiência do gradeamento e na área útil do sistema preliminar.

$$S_{tc} = A_u \times E_{gf} \quad (7)$$

Onde:

$S_{tc}$  = seção transversal do canal, em m<sup>2</sup>;

$A_u$  = área útil por onde o esgoto passa, em m<sup>2</sup>;

$E_{gf}$  = eficiência do gradeamento, em %.

A área da seção transversal foi de  $S_{tc} = 0,01$  m<sup>2</sup>.

#### 5.4. DIÂMETRO DAS TUBULAÇÕES

O diâmetro das tubulações de descarga do esgoto sanitário foi dimensionado de acordo com a velocidade de escoamento e considerando a seção transversal do tubo completamente cheio. A velocidade de escoamento é proporcional a tensão trativa de 1 Pascal. Essa velocidade de escoamento é de 0,5 m/s. Para o anteprojeto, fez-se o uso de 0,6 m/s Foi calculado o diâmetro da tubulação principal:

$$D = \sqrt{\frac{4Q}{\pi V_e}} \quad [m] \quad (8)$$

Onde:

$D$  = diâmetro da tubulação principal, em m;

$Q$  = vazão total do anteprojeto, em  $m^3/s$ ;

$V_e$  = velocidade de escoamento, em m/s.

Assim, o valor do diâmetro da tubulação principal foi de:

$$D = 138mm$$

Assim, o valor do diâmetro da tubulação principal nominal escolhida foi de 200mm. O diâmetro das tubulações de distribuição do esgoto será menor e para ao anteprojeto fez-se o uso dos tubos de 100mm de diâmetro nominal.

## 5.5. DIMENSIONAMENTO DO WETLAND FRANCÊS

### 5.5.1. Carga média per capita

O valor de carga média per capita representa a quantidade, em gramas, por habitante por dia para cada parâmetro. A tabela 9 mostra as características físico-químicas de esgoto bruto.

Tabela 9 – Características físico-químicas do esgoto bruto em países em desenvolvimento

Parâmetro	Carga per capita [g/hab.dia]	
	Mínimo-Máximo	Usual
<b>SST</b>	35-70	60
<b>DBO</b>	40-60	50
<b>DQO</b>	80-120	100
<b>NTK</b>	6,0-10,0	8,0
<b>Fósforo total</b>	0,7-2,5	1,0

Fonte: adaptado Von Sperling (2005)

A partir disso, adota-se valores que foram utilizados no anteprojeto, conforme tabela abaixo.

Tabela 10 – Valores adotados de carga per capita para cada parâmetro

Parâmetro	Carga per capita [g/hab.dia]
<b>SST</b>	70
<b>DBO</b>	60
<b>DQO</b>	120
<b>NTK</b>	8,0
<b>Fósforo total</b>	1,0

Fonte: autoria própria

### 5.5.1.1. Carga e concentração do afluente

O cálculo da carga afluente ( $C_a$ ) é baseado na população escolhida e na carga per capita de cada parâmetro, conforme mostrado na equação 6.

$$C_a = \text{População} \times \text{carga média per capita} \left[ \frac{g}{\text{dia}} \right] \quad (9)$$

Onde:

$C_a$  = carga do afluente, em g/dia.

Segue na tabela abaixo os resultados obtidos de carga afluente para os parâmetros.

Tabela 11 - Resultados obtidos de carga afluente

Parâmetro	Carga afluente [kg/dia]
SST	350
DBO	300
DQO	600
NTK	40
Fósforo total	5

Fonte: autoria própria

Após o cálculo da carga afluente, calcula-se a concentração, que é dada pela equação:

$$\text{Concentração} = \frac{C_a}{Q} \left[ \frac{mg}{L} \right] \quad (10)$$

Onde:

$C_a$  = carga afluente, em g/dia;

$Q$  = vazão afluente total, m<sup>3</sup>/dia.

Na tabela 12 são apresentados os resultados obtidos de concentração afluente para os parâmetros.

Tabela 12 - Resultados obtidos da concentração afluente

Parâmetro	Concentração afluente [mg/L]
SST	454,5
DBO	389,6
DQO	779,2
NTK	51,9
Fósforo total	6,5

Fonte: autoria própria

### 5.5.2. Cálculo das áreas superficiais

O cálculo da área superficial do *wetland* construído do tipo francês foi baseado na taxa de aplicação orgânica superficial máxima e na taxa de aplicação hidráulica superficial máxima (VON SPERLING & SEZERINO, 2018). A tabela 13 mostra os valores utilizados para o cálculo da área superficial.

Tabela 13 – Valores máximos de taxa de aplicação orgânica e hidráulica superficial

	<b>HLR</b> [m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .dia]	<b>DBO</b> [g/m <sup>2</sup> .dia]	<b>DQO</b> [g/m <sup>2</sup> .dia]	<b>SST</b> [g/m <sup>2</sup> .dia]	<b>NTK</b> [g/m <sup>2</sup> .dia]
<b>Taxas de carga</b>	0,40	150	350	150	30

Fonte: adaptado de Von Sperling & Sezerino (2018); Dotro *et al.* (2017)

1) Área requerida baseada na taxa de carga hidráulica

$$AS_{HLR} = \frac{Q}{HLR} [m^2] \quad (11)$$

Onde:

$AS_{HLR}$  = área superficial requerida, em m<sup>2</sup>;

$Q$  = vazão afluente total, em m<sup>3</sup>/dia;

$HLR$  = taxa de aplicação hidráulica, em m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.dia.

2) Área requerida baseada nas taxas de carga de massa dos parâmetros:

$$AS_{ao} = \frac{C_a}{T_{ao}} [m^2] \quad (12)$$

Onde:

$AS_{ao}$  = área superficial requerida, em m<sup>2</sup>;

$C_a$  = carga afluente, em g/dia;

$T_{ao}$  = taxa de aplicação orgânica, em g/m<sup>2</sup>.dia.

Na tabela são apresentados os resultados das áreas requeridas baseadas nas taxas de carga hidráulica e de massa de matéria orgânica.

Tabela 14 - Resultados das áreas superficiais

Parâmetro	Área superficial [m <sup>2</sup> ]
HLR	1925,0
DBO	2000,0

Fonte: autoria própria

A área superficial do projeto adotada ( $AS_{ad}$ ) foi a maior área obtida a partir dos resultados acima (2000 m<sup>2</sup>), afim de se obter a área necessária para remover todos os parâmetros e não prejudicar a hidráulica do sistema.

Para o cálculo das dimensões da célula, adotou-se que as mesmas são quadradas, uma vez que o fluxo é vertical, e a relação comprimento/largura não altera o funcionamento do sistema.

$$AS_{ad} = l \times w = l^2 [m^2] \quad (13)$$

Onde:

$AS_{ad}$  = área superficial requerida, em m<sup>2</sup>;

l = comprimento, em metros;

w = largura, em metros.

A fim de se obter uma área com segurança para o projeto, adotou-se um valor maior para as dimensões.

$$l_0 = 45 \text{ m (adotado)}$$

Portanto, a área superficial de uma célula do sistema,  $AS_c = 2025 \text{ m}^2$ . Considerando que o primeiro estágio do sistema de wetland do tipo francês clássico pode operar, em regiões de climas tropicais, com duas células em paralelo, calculou-se a área superficial total ( $AS_t$ ) da unidade:

$$AS_t = n \times AS_c [m^2] \quad (14)$$

Onde:

$AS_t$  = área superficial total, em m<sup>2</sup>;

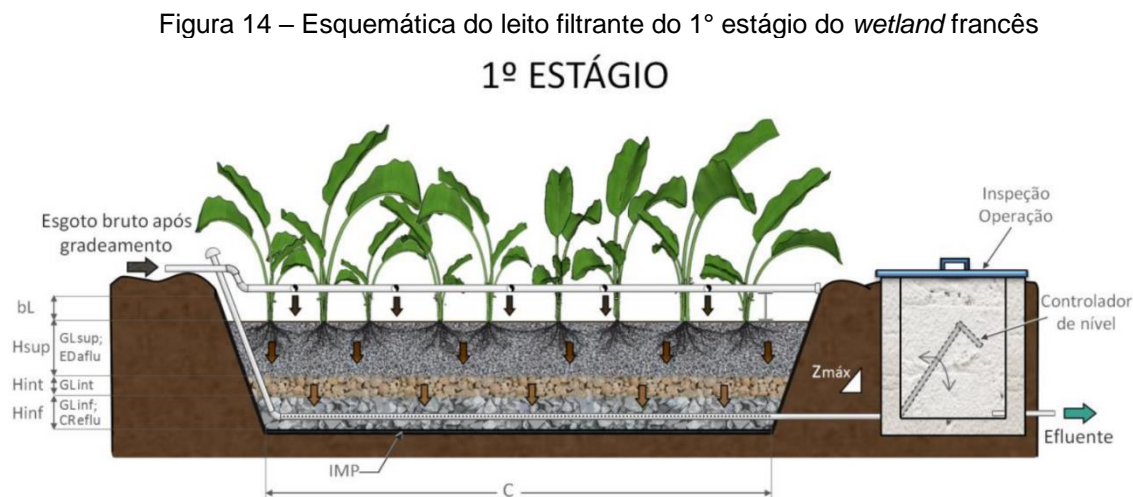
n = número de células do sistema;

$AS_c$  = área superficial da célula, em m<sup>2</sup>.

$$AS_t = 4050 \text{ m}^2$$

### 5.5.3. Características das camadas do leito filtrante do *wetland* francês

A figura 13 abaixo esquematiza as camadas do leito filtrante do 1º estágio de um *wetland* do tipo francês.



Fonte: Von Sperling & Sezerino, 2018.

As camadas do leito filtrante seguiram a característica do *wetland* construído do tipo francês com os valores médios de altura, conforme mostrado na tabela 15.

Tabela 15 - Dimensões características do leito filtrante do *wetland* francês

Parâmetro	Sigla	Faixa	Adotado
<b>Borda livre (m)</b>	bL	>0,3	0,5
<b>Camada superior (m)</b>	H <sub>sup</sub>	0,3 - 0,8	0,4
<b>Camada intermediária (m)</b>	H <sub>int</sub>	0,1 - 0,2	0,15
<b>Camada inferior (m)</b>	H <sub>inf</sub>	0,2 - 0,3	0,25
<b>Nº de células</b>	n	2 - 3	2
<b>Inclinação</b>	Z	0:1 - 2:1	1:4
<b>Granulometria H<sub>sup</sub> (mm)</b>	GL <sub>sup</sub>	4,8 - 9,5	-
<b>Granulometria H<sub>int</sub> (mm)</b>	GL <sub>int</sub>	19 - 25	-
<b>Granulometria H<sub>inf</sub> (mm)</b>	GL <sub>inf</sub>	25 - 50	-

Fonte: autoria própria

A vegetação utilizada foi o Capim Tifton 85, uma planta com registro de operação adequada por mais de 10 anos nas estações de tratamento de esgoto no Brasil.

Segundo Von Sperling & Sezerino (2018), cortes mais frequentes, realizados durante a fase de crescimento da planta, potencializam uma maior capacidade

de extração de nutrientes e outros compostos. Portanto, recomenda-se que uma constante manutenção e poda seja realizada.

Uma camada impermeabilizante foi disposta para proteção do solo da região onde os *wetlands* construídos se encontram.

#### 5.5.4. Determinação das características de cada batelada

O nível de água que cobre os filtros corresponde ao volume de cada batelada dividido pela área superficial do filtro em operação. Para os *wetlands* construídos francês recomenda-se uma camada líquida de valores entre dois e cinco centímetros por batelada (DOTRO *et al.*, 2017).

Para o projeto foi considerado uma camada de três centímetros por batelada. O volume de cada batelada ( $V_b$ ) foi calculado a partir da equação abaixo:

$$V_b = AS_c \times 0,02 \left[ \frac{m^3}{batelada} \right] \quad (15)$$

Onde:

$V_b$  = volume de cada batelada, em  $m^3$ /batelada;

$AS_c$  = área superficial da célula, em  $m^2$ .

$$V_b = 40,5 \frac{m^3}{batelada}$$

Assim, foi possível calcular o número de bateladas necessárias por dia:

$$\text{Número de bateladas por dia} = \frac{Q}{V_b} \left[ \frac{bateladas}{dia} \right] \quad (16)$$

Onde:

$Q$  = vazão total do sistema, em  $m^3$ /dia;

$V_b$  = volume de cada batelada, em  $m^3$ /batelada.

$$\text{Número de bateladas por dia} = 19,01 \frac{\text{bateladas}}{\text{dia}}$$

O valor de 20 bateladas por dia foi adotado para o projeto.

Para calcular o fluxo de esgoto por batelada, o  $HLR_{bat}$  mínimo instantânea recomendado é de  $0,6 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$  (VON SPERLING & SEZERINO, 2018). Então, o fluxo da batelada foi dado por:

$$Fluxo_{bat} = AS_{ad} \times HLR_{bat} \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right] \quad (17)$$

Onde:

$Fluxo_{bat}$  = fluxo de batelada, em  $\text{m}^3/\text{h}$ ;

$AS_c$  = área superficial da célula, em  $\text{m}^2$ ;

$HLR_{bat}$  = taxa de aplicação hidráulica instantânea durante o pulso da batelada, em  $\text{m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ .

$$Fluxo_{batelada} = 1215 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

O fluxo de batelada de  $1215 \text{ m}^3/\text{h}$  corresponde a  $20,3 \text{ m}^3/\text{min}$ . Como o minuto de cada batelada é  $40,5 \text{ m}^3/\text{batelada}$ , a duração de cada batelada foi de 2 minutos.

### 5.5.5. Tanque de armazenamento

O tanque de armazenamento será um tanque responsável por receber o esgoto sanitário para poder garantir o pleno funcionamento do sistema da ETE. A garantia de segurança é dada por um valor um pouco maior que o volume calculado. Como o sistema funciona de forma intermitente, não há volume de esgoto sanitário parado no sistema.

A vazão de projeto  $Q = 770 \text{ m}^3/\text{dia}$  corresponde a  $0,535 \text{ m}^3/\text{min}$ . Com o número de 20 bateladas por dia, foi verificado que ocorre uma batelada a cada 1,2 hora o que corresponde a 72 minutos. Assim foi possível determinada que



durante este intervalo o volume total de esgoto acumulado foi de 38,52 m<sup>3</sup>. Por segurança, o volume total de esgoto acumulado adotado foi de 40 m<sup>3</sup>.

Para melhor funcionamento do sistema, foi determinada a utilização de dois tanques fluxíveis, pois estes garantem o não entupimento das tubulações do anteprojeto. O volume de cada tanque fluxível foi de 20 m<sup>3</sup>, que funcionam de forma simultânea, com raio de 2,55 metros e 1 metro de altura cada um.

### 5.5.6. Efluente final após primeiro estágio

A qualidade do efluente final do primeiro estágio é usada como afluente dos filtros de escória. A qualidade do efluente é calculada usando os valores da tabela 16. As próximas equações apresentadas mostram a remoção do parâmetro DBO.

Tabela 16 - Fator de remoção de cada poluente

	<b>DBO</b>	<b>DQO</b>	<b>SST</b>	<b>NTK</b>	<b>P</b>
<b>Remoção</b>	0,9 x MLR	0,8 x MLR	0.9 x MLR	1,1128 x MLR <sup>0,8126</sup>	0,2 x MLR

Fonte: Dotro *et al.* (2017)

$$DBO_{removido} = 0,9 \times MLR_{DBO} \left[ \frac{g_{DBO}}{m^2 \cdot dia} \right]$$

Onde:

$DBO_{removido}$  = carga de DBO removida por unidade de área, em g/m<sup>2</sup>.dia;

$MLR_{DBO}$  = taxa de carga de DBO, em g/m<sup>2</sup>.dia.

$$DBO_{removido} = 135 \frac{g_{DBO}}{m^2 \cdot dia}$$

Portanto, a DBO do efluente é 15 g/m<sup>2</sup>.dia. Com isso, calculou-se a carga e concentração do efluente final após o primeiro estágio.

$$C_{DBO} = DBO_{efluente} \times AS \left[ \frac{g_{DBO}}{dia} \right]$$

Onde:

$C_{DBO}$  = carga efluente de DBO, g/dia;

$DBO_{efluente}$  = taxa de massa residual de DBO, em g/m<sup>2</sup>.dia;

AS = área superficial requerida, em m<sup>2</sup>.

$$C_{DBO} = 30.000 \frac{g_{DBO}}{dia}$$

$$CE_{DBO} = \frac{C_{DBO}}{Q} \left[ \frac{mg}{L} \right]$$

Onde:

CE<sub>DBO</sub> = concentração efluente de DBO, em mg/L;

C<sub>DBO</sub> = carga efluente de DBO, em g/dia

Q = vazão afluente do sistema, m<sup>3</sup>/dia.

$$\text{Concentração efluente}_{DBO} = 39 \frac{mg}{L}$$

Os cálculos de remoção e concentração foram repetidos para os outros parâmetros e os resultados da qualidade do efluente final do *wetland* francês estão dispostos na tabela abaixo.

Tabela 17 - Resultados de carga e concentração efluente após 1<sup>o</sup> estágio do *wetland* francês

Parâmetro	MLR [g/m <sup>2</sup> .dia]	Taxa de massa removida [g/m <sup>2</sup> .dia]	Taxa de massa residual [g/m <sup>2</sup> .dia]	Carga efluente [kg/dia]	Concentração efluente [mg/L]	Eficiência de remoção (%)
SST	175	157,5	12,7	35	45	90%
DBO	150	135	15	30	39	90%
DQO	300	240	60	120	156	80%
NTK	20	12,7	7,3	14,6	19	63%
P <sub>total</sub> <sup>1</sup>	2,5	0,5	1,5	4	5	23%

Fonte: autoria própria

<sup>1</sup>para a remoção de fósforo, a porcentagem foi baseada em Dotro *et al.* (2017)

## 5.6. DIMENSIONAMENTO DO FILTRO DE ESCÓRIA DE ACIARIA

### 5.6.1. Cálculo do volume do filtro reativo de escória de aciaria

Como já citado, o sistema de *wetland* construído do tipo Francês clássico apresenta baixa eficiência na remoção de fósforo e para enquadramento nas legislações ambientais, este projeto inclui um sistema de escória de aciaria para conseguir uma eficiência de remoção de fósforo acima de 90%. Os estudos de Barca *et al.* (2012) objetivavam incrementar a remoção de fósforo nos *wetlands* construídos. Neste estudo, recomendou-se a utilização de uma equação que

determinasse o volume per capita do filtro como uma função da concentração do efluente na saída do filtro. A equação recomendada de Barca *et al.* (2012) é descrita a seguir.

$$V_f = \frac{Q_{pc}}{\rho \times \kappa_v} \ln \left( \frac{C_0 - C^*}{C_e - C^*} \right) \left[ \frac{m^3}{hab} \right] \quad (18)$$

Onde:

$V_f$  = volume per capita do filtro, em  $m^3/hab$ ;

$Q_{pc}$  = vazão per capita, em  $m^3/hab.dia$ ;

$\rho$  = porosidade dos filtros;

$\kappa_v$  = taxa volumétrica de remoção de fósforo, em  $dia^{-1}$ ;

$C_0$  = concentração de fósforo na entrada do filtro de escória, em mg P/litro;

$C_e$  = concentração de fósforo na saída do filtro de escória, em mg P/litro;

$C^*$  = concentração de fósforo *background* residual, em mg P/litro.

Foram usados os valores experimentais obtidos por Barca *et al.* (2012) para porosidade dos filtros ( $\rho$ ) = 0,5 e taxa volumétrica de remoção de fósforo ( $\kappa_v$ ) = 0,78  $dia^{-1}$ .

A concentração de fósforo na entrada do filtro de escória de aciaria foi igual a concentração de fósforo na saída do primeiro estágio do *wetland* francês, com valor igual a 5 mg/L. Quanto a concentração de fósforo da saída do filtro de escória de aciaria objetivou-se atingir o valor da concentração imposta pela legislação da comunidade europeia, a diretiva 91/271/CEE, igual a 2 mg/L. Foi utilizada a legislação europeia por ser bem restritiva e a legislação brasileira não apresentação padrão de lançamento para o fósforo.

Portanto, calculou-se o volume do filtro a partir da equação proposta por Barca *et al.* (2012). Assim, o volume per capita do filtro é:

$$V_f = 0,3741 \frac{m^3}{hab}$$

A população adotada para o projeto foi de 5000 habitantes, portanto, o volume do filtro de escória de aciaria é:

$$V = 1870 \text{ m}^3$$

A altura adotada para o filtro de escória foi de 1 metro, pois o comportamento hidráulico de um filtro de escória se assemelha a um *wetland* de escoamento horizontal.

Segundo Barca *et al.* (2012), os filtros podem ser dimensionados numa razão largura por comprimento (W/L) menor que 0,5. Este anteprojeto fez uso de uma razão W/L de 0,4.

Para atingir o volume de 1870 m<sup>3</sup>, seguindo a razão W/L adotada, a largura foi de 27,35 m e o comprimento foi de 68,38 m.

Afim de garantir uma segurança para o anteprojeto, as dimensões adotadas foram:

$$\text{Largura} = 28 \text{ metros}$$

$$\text{Comprimento} = 70 \text{ metros}$$

$$\text{Volume do fitro} = 1960 \text{ m}^3$$

As especificações técnicas do filtro de escória estão dispostas na tabela abaixo.

Tabela 18 - Resultados do dimensionamento do filtro de escória de aciaria

<b>Especificações técnicas</b>	<b>Valor</b>
Borda livre (m)	0,10
Altura (m)	1,0
Comprimento (m)	70,0
Largura (m)	28,0
Volume (m <sup>3</sup> )	1960

Fonte: autoria própria

### 5.6.2. Características do leito filtrante do filtro de escória de aciaria

A granulometria da escória de aciaria utilizada foi de 5 – 16 mm, pois Barca *et al.* (2012) comprovou que nesta granulometria as eficiências de remoção de fósforo ultrapassam os 95%, enquanto que, em granulometrias maiores a eficiência de retenção de fósforo é menor.

O leito filtrante preenchido com escória de aciaria deve ser trocado após um período para garantir a eficiência de remoção de fósforo do sistema. O tempo de saturação de fósforo no filtro de escória de aciaria foi calculado a partir da retenção de quantidade de fósforo por quilograma de escória, a densidade da escória e a vazão total do sistema.

Segundo os estudos de Silva *et al.* (2016), a densidade da escória de aciaria é de 3,455 g/cm<sup>3</sup>. Adotando este valor para a densidade, obteve-se a quantidade total de escória utilizada no filtro.

$$M_{esc} = \gamma_{esc} \times V_{ff} \quad [kg] \quad (19)$$

Onde:

$M_{esc}$  = quantidade total de escória utilizada, em kg;

$\gamma_{esc}$  = densidade da escória, em kg/m<sup>3</sup>;

$V_{ff}$  = volume final do filtro de escória, em m<sup>3</sup>.

Assim, a quantidade de escória utilizada no filtro foi de:

$$M_{esc} = 6.771.800 \text{ kg}$$

Segundo Barca *et al.* (2012), a escória de aciaria é capaz de reter 1,98 grama de fósforo por quilograma de escória. Assumindo este valor para o presente sistema, a quantidade de fósforo retida no filtro foi de:

$$R_t = R_p \times M_{esc} \quad [g] \quad (20)$$

Onde:

$R_t$  = quantidade de fósforo retida, em gramas;

$R_p$  = quantidade de fósforo retida por quilograma de escória, em g P/kg;

$M_{esc}$  = quantidade total de escória utilizada, em kg.

Assim, a quantidade de fósforo retida após a passagem no filtro foi de:

$$R_t = 13.408.164 \text{ g}$$

Conforme resultado apresentado na tabela 17, a carga diária de fósforo na entrada do filtro de escória é de 4000 g/dia. Então, calculou-se o tempo de saturação desta quantidade de escória.

$$T = \frac{R_t}{C_{pw}} \text{ [dias]} \quad (21)$$

Onde:

T = tempo de saturação, em dias;

R<sub>t</sub> = quantidade de fósforo retida, em gramas;

C<sub>pw</sub> = carga diária de fósforo na saída do filtro de escória, em g/dia.

Assim, o tempo de saturação foi de:

$$T = 3353 \text{ dias}$$

Assim, para o sistema foi calculado um tempo de saturação de, aproximadamente, 10 anos. Estudos de Drizo *et al.* (2002) comprovam que se a escória repousar por um período de quatro semanas, ocorre uma potencialização da retenção de fósforo em 74%. Então, pretende-se colocar a escória em repouso para melhor a eficiência de remoção.

Após esses 10 anos de utilização da escória de aciaria, a mesma deve ser disposta em um aterro sanitário em conformidade com as legislações ambientais locais. O sistema deve ser preenchido com uma nova escória.

## 5.7. OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO DO SISTEMA

O sistema de um *wetland* francês seguido de filtro de escória apresenta manutenção preventiva quanto ao manejo das plantas, remoção da camada de lodo e a disposição final da escória de aciaria após a utilização.

As plantas serão manejadas para potencializar ao máximo a remoção dos parâmetros e a biomassa das podas das macrófitas serão enviadas para a compostagem.

A altura da camada de lodo está relacionada às características climáticas do local de implementação do sistema (VON SPERLING & SEZERINO, 2018). A experiência brasileira indica valores de 1,0 cm/ano para a altura da camada de lodo nas unidades de 1º estágio do *wetland* francês.

A remoção desta camada de lodo está programada para ser realizada num intervalo de 10 a 20 anos após o início de operação do sistema. O lodo se acumula ao longo dos anos, e só necessita ser removido quando atinge uma espessura em torno de 0,20 m. Eventuais casos de remoção com períodos menores são assumidos, em virtude da altura desigual da camada de lodo e risco de transbordamento em períodos de sobrecarga hidráulica e orgânica. A expectativa é de que o lodo saia mineralizado e com baixo teor de umidade, e com possibilidades de utilização como condicionador de solo (MOLLE *et al.*, 2005).

Os filtros de escória receberão escória nova a cada 10 anos para manter a eficiência da remoção do sistema e as escórias utilizadas serão descartadas em aterro sanitário em conformidade com a legislação ambiental do local.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

São apresentados a seguir os resultados do dimensionamento da estação de tratamento de esgoto dotado de um *wetland* francês seguido de um filtro reativo de escória de aciaria.

Tabela 19 - Resultados finais do dimensionamento do sistema

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
População (habitantes)	5000
Vazão de projeto (m <sup>3</sup> /dia)	770
Comprimento do <i>wetland</i> francês (m)	45
Largura do <i>wetland</i> francês (m)	45
Área superficial do <i>wetland</i> francês (m <sup>2</sup> )	4050
Comprimento do filtro de escória de aciaria (m)	28
Largura do filtro de escória de aciaria (m)	70
Área superficial do filtro de escória de aciaria (m <sup>2</sup> )	1960
Área total da ETE (m <sup>2</sup> )	6110
Área total por habitante do sistema (m <sup>2</sup> /hab)	1,20

Fonte: autoria própria

O sistema proposto neste anteprojeto ainda não é utilizado no Brasil e ainda há muito a ser testado porém os dados da literatura mostram que o efluente produzido é de boa qualidade e atender os padrões de lançamento da legislação.



## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT, A. B. NBR 12.208-Projeto de estações elevatórias de esgoto sanitário. **Rio de Janeiro, RJ.**

AVELAR, Janine Cabral. Avaliação da escória de aciaria (LD) como leito cultivado e leito filtrante no pós-tratamento de efluente de reator UASB compartimentado. 2008. 153 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2008.

AZEVEDO, Juliana Laboissière. A Economia Circular Aplicada no Brasil: uma análise a partir dos instrumentos legais existentes para a logística reversa. In: **Anais... Congresso Nacional de Excelência em Gestão.** 2015.

BARCA, Cristian et al. Steel slag filters to upgrade phosphorus removal in constructed wetlands: two years of field experiments. **Environmental science & technology**, v. 47, n. 1, p. 549-556, 2012.

BARCA, Cristian et al. Steel slag filters to upgrade phosphorus removal in small wastewater treatment plants: removal mechanisms and performance. **Ecological engineering**, v. 68, p. 214-222, 2014.

BRASIL. Ministério das Cidades, **Plano Nacional de Saneamento Básico**, 2014.

BRASIL. Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005. **Conselho Nacional do Meio Ambiente: CONAMA**, Brasília, DF, 17 mar. 2005.

BRASIL. Resolução CONAMA nº 430, de 13 de maio de 2011. **Conselho Nacional do Meio Ambiente: CONAMA**, Brasília, DF, maio de 2011.

CHERNICHARO, Carlos Augustos; VON SPERLING, Marcos. **Biological Wastewater Treatment in Warm Climate Regions Volume II.** IWA Publishing, 2005.

DOTRO, Gabriela; LANGERGRABER, Günter; MOLLE, Pascal; NIVALA, Jaime; PUIGAGUT, Jaume; STEIN, Otto, VON SPERLING, Marcos. **Biological Wastewater Treatment Series, Volume 7: Treatment Wetlands.** 2017.

DRIZO, Aleksandra et al. Phosphorus saturation potential: a parameter for estimating the longevity of constructed wetland systems. **Environmental science & technology**, v. 36, n. 21, p. 4642-4648, 2002.

EUROPEU, Parlamento. Directiva 91/271/CEE. **Jornal Oficial Das Comunidades Europeias**, p. 40-52, 1991.

JORDÃO, EDUARDO P.; PESSÔA, CONSTANTINO A. Tratamento de esgotos domésticos. 1050 p. **Rio de Janeiro, RJ**, 2011.

KADLEC, R. H.; KNIGHT, R. L. Treatment Wetlands—CRC Press, Inc. **Boca Raton, FloridaUSA**, 1996.

METCALF, Inc. **Wastewater engineering: treatment and resource recovery**. McGraw-Hill Higher Education, 2013.

MOLLE, Pascal et al. How to treat raw sewage with constructed wetlands: an overview of the French systems. **Water Science and Technology**, v. 51, n. 9, p. 11-21, 2005.

MORVANNOU, A. et al. Treatment performances of French constructed wetlands: results from a database collected over the last 30 years. **Water Science and Technology**, v. 71, n. 9, p. 1333-1339, 2015.

NUVOLARI, Ariovaldo et al. Esgoto sanitário: coleta transporte, tratamento e reuso agrícola. 2003.

SILVA, Blênio Márcio Cunha et al. CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DE ESCÓRIAS DE ACIARIA. 2016.

TERRA, Barbara Roveta; SOUZA, Luiza Azevedo. Utilização de escória de aciaria no pós-tratamento de efluente de lagoa de polimento aplicada no tratamento de lixiviado de aterro sanitário. 2017.

TREIN, Camila Maria et al. Reduction of area and influence of the deposit layer in the first stage of a full-scale French system of vertical flow constructed wetlands in a tropical area. **Water Science and Technology**, v. 80, n. 2, p. 347-356, 2019.

VON SPERLING, M. Comparison of simple, small, full-scale sewage treatment systems in Brazil: UASB–maturation ponds–coarse filter; UASB–horizontal subsurface-flow wetland; vertical-flow wetland (first stage of French system). **Water Science and Technology**, v. 71, n. 3, p. 329-337, 2014.

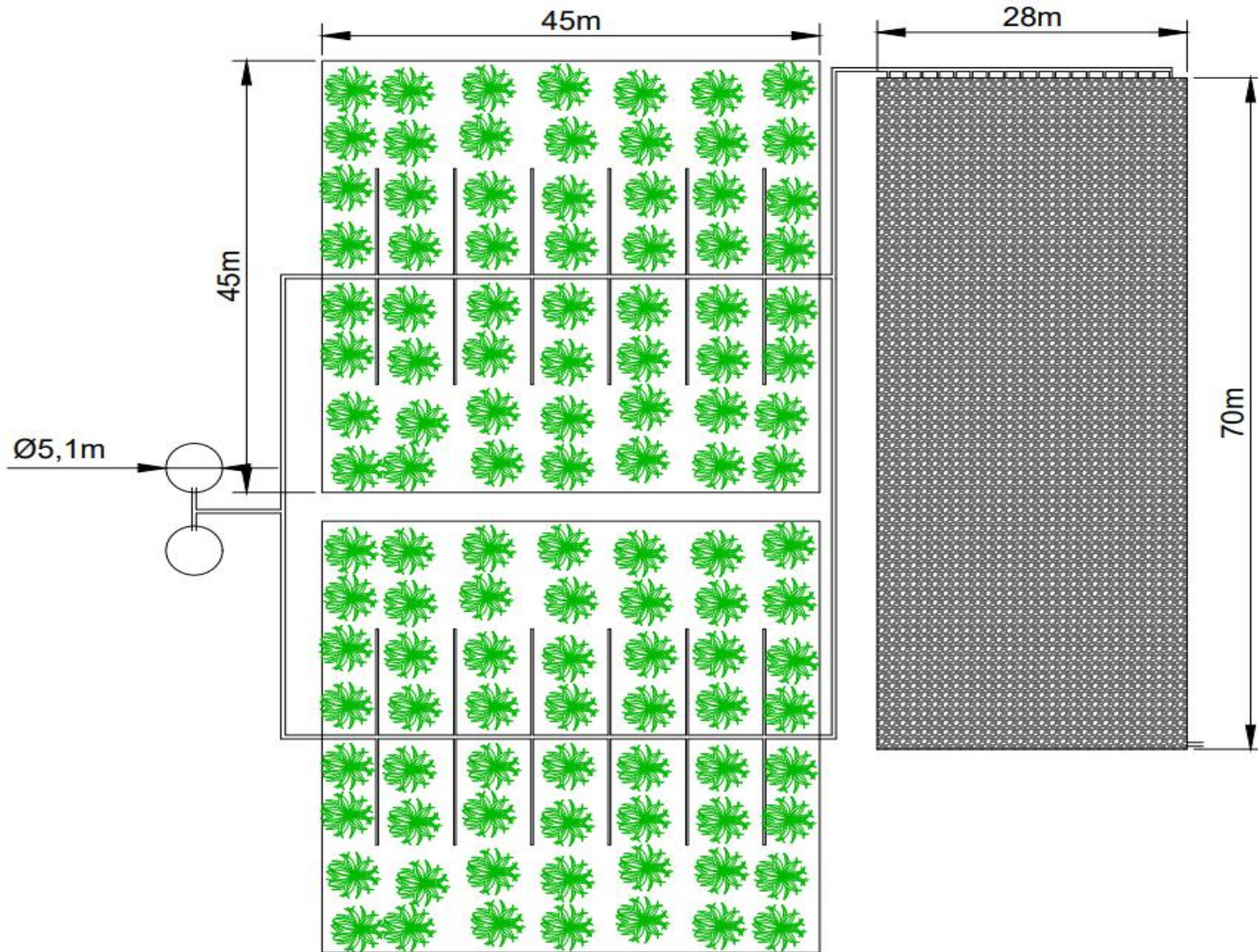
VON SPERLING, Marcos; DE LEMOS CHERNICHARO, Carlos Augustos. **Biological wastewater treatment in warm climate regions**. IWA publishing, 2005.

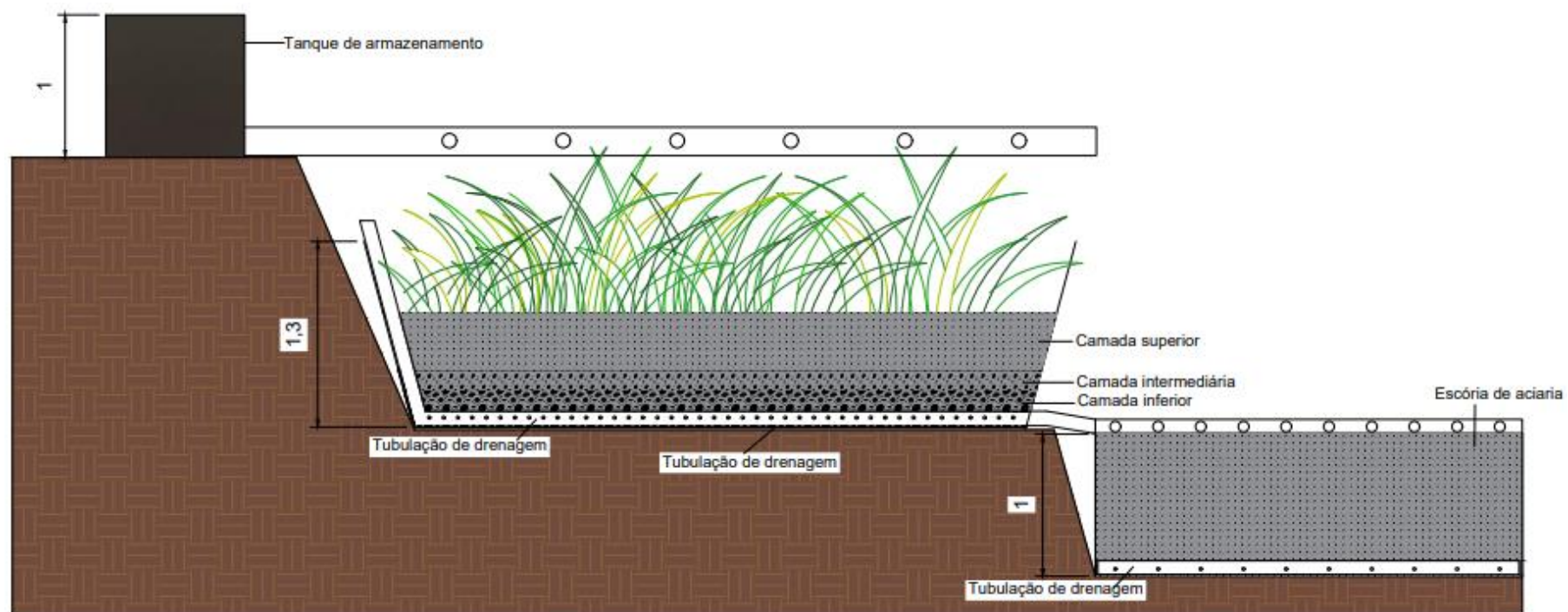
VON SPERLING, Marcos; SEZERINO, Pablo H. Grupo de Estudos em Sistemas Wetlands Construídos Aplicados ao Tratamento de Águas Residuárias. Publicação online Boletim Wetlands Brasil – Edição Especial – Dezembro/2018.

### 8. APÊNDICES

#### ANEXO A – Planta e corte do sistema

TÍTULO: PLANTA DO SISTEMA DE TRATAMENTO DE ESGOTO	
AUTORES: JOÃO CHAGAS MONTEIRO WILLIAM LEMOS DA SILVA	
ESCALA: 1/1000	DATA: 13/12/2019





Observação: As medidas horizontais não estão de acordo com a escala para a melhor visualização das camadas verticais.

TÍTULO: CORTE DO SISTEMA DE TRATAMENTO DE ESGOTO	
AUTORES: JOÃO CHAGAS MONTEIRO WILLIAM LEMOS DA SILVA	
ESCALA: 1/50	DATA: 13/12/2019

## ANEXO B

Tabela 20 - Parâmetros de projeto para 1000 habitantes

<b>População</b>	1000	habitantes
<b>Q<sub>med</sub></b>	120	m <sup>3</sup> /dia
<b>Q<sub>inf</sub></b>	34	m <sup>3</sup> /dia
<b>Q</b>	154	m <sup>3</sup> /dia

Fonte: autoria própria

Tabela 21 - Carga e concentração do afluente do projeto de 1000 habitantes

	<b>SST</b>	<b>DBO</b>	<b>DQO</b>	<b>P</b>	<b>NTK</b>
<b>Carga afluente [kg/dia]</b>	70	60	120	1	8
<b>Concentração afluente [mg/L]</b>	454,5	389,6	779,2	6,5	51,9

Fonte: autoria própria

Tabela 22 - Dimensionamento de *wetland* francês para 1000 habitantes

<b>Nº de células</b>	2	-
<b>Área adotada</b>	882	m <sup>2</sup>
<b>Comprimento</b>	21,0	m
<b>Largura</b>	21,0	m
<b>Nº de bateladas</b>	19	-

Fonte: autoria própria

Tabela 23 – Dimensionamento do filtro de escória para 1000 habitantes

<b>Volume</b>	416	m <sup>3</sup>
<b>Altura</b>	1,0	m
<b>Comprimento</b>	32,0	m
<b>Largura</b>	13,0	m

Fonte: autoria própria

Tabela 24 - Qualidade do efluente final do sistema para 1000 habitantes

	<b>SST</b>	<b>DBO</b>	<b>DQO</b>	<b>P</b>	<b>NTK</b>
<b>Carga efluente [kg/dia]</b>	7	6	24	0,8	2,9
<b>Concentração efluente [mg/L]</b>	45	39	156	2	19

Fonte: autoria própria

## ANEXO C

Tabela 25 - Parâmetros de projeto para 2000 habitantes

<b>População</b>	2000	habitantes
<b>Q<sub>med</sub></b>	240	m <sup>3</sup> /dia
<b>Q<sub>inf</sub></b>	68	m <sup>3</sup> /dia
<b>Q</b>	308	m <sup>3</sup> /dia

Fonte: autoria própria

Tabela 26 - Carga e concentração do afluente do projeto para 2000 habitantes

	<b>SST</b>	<b>DBO</b>	<b>DQO</b>	<b>P</b>	<b>NTK</b>
<b>Carga afluente [kg/dia]</b>	140	120	240	2	16
<b>Concentração afluente [mg/L]</b>	454,5	389,6	779,2	6,5	51,9

Fonte: autoria própria

Tabela 27 - Dimensionamento de *wetland* francês para 2000 habitantes

<b>Nº de células</b>	2	-
<b>Área adotada</b>	1682,0	m <sup>2</sup>
<b>Comprimento</b>	29,0	m
<b>Largura</b>	29,0	m
<b>Nº de bateladas</b>	19	-

Fonte: autoria própria

Tabela 28 - Dimensionamento do filtro de escória para 2000 habitantes

<b>Volume</b>	810	m <sup>3</sup>
<b>Altura</b>	1,0	m
<b>Comprimento</b>	45,0	m
<b>Largura</b>	18,0	m

Fonte: autoria própria

Tabela 29 - Qualidade do efluente final do sistema para 2000 habitantes

	<b>SST</b>	<b>DBO</b>	<b>DQO</b>	<b>P</b>	<b>NTK</b>
<b>Carga efluente [kg/dia]</b>	14	12	48	1,6	5,9
<b>Concentração efluente [mg/L]</b>	45	39	156	2	19

Fonte: autoria própria

## ANEXO D

Tabela 30 - Parâmetros de projeto para 3000 habitantes

<b>População</b>	3000	habitantes
<b>Q<sub>med</sub></b>	360	m <sup>3</sup> /dia
<b>Q<sub>inf</sub></b>	102	m <sup>3</sup> /dia
<b>Q</b>	462	m <sup>3</sup> /dia

Fonte: autoria própria

Tabela 31 - Carga e concentração do afluente do projeto para 3000 habitantes

	<b>SST</b>	<b>DBO</b>	<b>DQO</b>	<b>P</b>	<b>NTK</b>
<b>Carga afluente [kg/dia]</b>	210	180	360	3	24
<b>Concentração afluente [mg/L]</b>	454,5	389,6	779,2	6,5	51,9

Fonte: autoria própria

Tabela 32 - Dimensionamento de *wetland* francês para 3000 habitantes

<b>Nº de células</b>	2	-
<b>Área adotada</b>	2450	m <sup>2</sup>
<b>Comprimento</b>	35,0	m
<b>Largura</b>	35,0	m
<b>Nº de bateladas</b>	19	-

Fonte: autoria própria

Tabela 33 - Dimensionamento do filtro de escória para 3000 habitantes

<b>Volume</b>	1210	m <sup>3</sup>
<b>Altura</b>	1,0	m
<b>Comprimento</b>	55,0	m
<b>Largura</b>	22,0	m

Fonte: autoria própria

Tabela 34 - Qualidade do efluente final do sistema para 3000 habitantes

	<b>SST</b>	<b>DBO</b>	<b>DQO</b>	<b>P</b>	<b>NTK</b>
<b>Carga efluente [kg/dia]</b>	21	18	72	2,4	8,8
<b>Concentração efluente [mg/L]</b>	45	39	156	2	19

Fonte: autoria própria



## ANEXO E

Tabela 35 - Parâmetros de projeto para 4000 habitantes

<b>População</b>	4000	habitantes
<b>Q<sub>med</sub></b>	120	m <sup>3</sup> /dia
<b>Q<sub>inf</sub></b>	34	m <sup>3</sup> /dia
<b>Q</b>	154	m <sup>3</sup> /dia

Fonte: autoria própria

Tabela 36 - Carga e concentração do afluente do projeto para 4000 habitantes

	<b>SST</b>	<b>DBO</b>	<b>DQO</b>	<b>P</b>	<b>NTK</b>
<b>Carga afluente [kg/dia]</b>	280	240	480	4	32
<b>Concentração afluente [mg/L]</b>	454,5	389,6	779,2	6,5	51,9

Fonte: autoria própria

Tabela 37 - Dimensionamento de *wetland* francês para 4000 habitantes

<b>Nº de células</b>	2	-
<b>Área adotada</b>	3362	m <sup>2</sup>
<b>Comprimento</b>	41,0	m
<b>Largura</b>	41,0	m
<b>Nº de bateladas</b>	19	-

Fonte: autoria própria

Tabela 38 – Dimensionamento do filtro de escória para 4000 habitantes

<b>Volume</b>	1575	m <sup>3</sup>
<b>Altura</b>	1	m
<b>Comprimento</b>	63,0	m
<b>Largura</b>	25,0	m

Fonte: autoria própria

Tabela 39 - Qualidade do efluente final do sistema para 4000 habitantes

	<b>SST</b>	<b>DBO</b>	<b>DQO</b>	<b>P</b>	<b>NTK</b>
<b>Carga efluente [kg/dia]</b>	28	24	96	3,2	11,7
<b>Concentração efluente [mg/L]</b>	45	39	156	2	19

Fonte: autoria própria