

INSTITUTO FEDERAL
GOIANO
Câmpus Rio Verde

Engenharia Ambiental

**Uso de traçador salino para a determinação de condições
hidrodinâmicas em wetlands construídas**

Mateus Costa Batista

Rio Verde, GO

2018

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO –
CAMPUS RIO VERDE**

ENGENHARIA AMBIENTAL

**Uso de traçador salino para a determinação de condições
hidrodinâmicas em wetlands construídas**

MATEUS COSTA BATISTA

Trabalho de Curso apresentado ao
Instituto Federal Goiano – Campus
Rio Verde, como requisito parcial
para a obtenção do Grau de
Bacharel em Engenharia
Ambiental.

Orientador: Professor. Me. Édio Damásio da Silva Júnior

Rio Verde – GO

Dezembro, 2018

Sistema desenvolvido pelo ICMC/USP
Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas - Instituto Federal Goiano

BB333u Batista, Mateus
 Uso de traçador salino para a determinação de condições hidrodinâmicas em wetlands construídas / Mateus Batista; orientador Édio Damásio da Silva Júnior. -- Rio Verde, 2018.
 53 p.

 Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) -- Instituto Federal Goiano, Campus Rio Verde, 2018.

 1. Hidrodinâmica. 2. Modelagem matemática. 3. Esgoto. 4. Traçador. I. Damásio da Silva Júnior, Édio, orient. II. Título.

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610, de 19 de fevereiro de 1998, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano a disponibilizar gratuitamente o documento em formato digital no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

IDENTIFICAÇÃO DA PRODUÇÃO TÉCNICO-CIENTÍFICA

- | | |
|--|---|
| <input type="checkbox"/> Tese (doutorado) | <input type="checkbox"/> Artigo científico |
| <input type="checkbox"/> Dissertação (mestrado) | <input type="checkbox"/> Capítulo de livro |
| <input type="checkbox"/> Monografia (especialização) | <input type="checkbox"/> Livro |
| <input checked="" type="checkbox"/> TCC (graduação) | <input type="checkbox"/> Trabalho apresentado em evento |

Produto técnico e educacional - Tipo:

Nome completo do autor:

Mateus Costa Batista

Matrícula:

2015102200740334

Título do trabalho:

Uso de traçador salino para a determinação de condições hidrodinâmicas em wetlands construídas

RESTRIÇÕES DE ACESSO AO DOCUMENTO

Documento confidencial: Não Sim, justifique:

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano: / /

O documento está sujeito a registro de patente? Sim Não

O documento pode vir a ser publicado como livro? Sim Não

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O(a) referido(a) autor(a) declara:

- Que o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- Que obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autoria, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- Que cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.

Rio Verde

14 / 12 / 2018

Local

Data

Mateus Costa Batista

Assinatura do autor e/ou detentor dos direitos autorais

Ciente e de acordo:

Alcio Romário do Silva Júnior

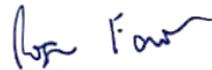
Assinatura do(a) orientador(a)

USO DE TRAÇADOR SALINO PARA DETERMINAÇÃO DE CONDIÇÕES HIDRODINÂMICAS
EM WEILANDS CONSTRUÍDAS

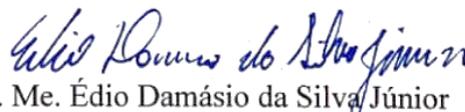
Trabalho de Curso DEFENDIDO e APROVADO em 07 de dezembro de 2018, pela
Banca Examinadora constituída pelos membros:



Prof. Dr. Bruno Botelho Saleh
IF Goiano – Campus Rio Verde
(Membro)



Prof. Dr. Rogério Favareto
IF Goiano – Campus Rio Verde
(Membro)



Prof. Me. Édio Damásio da Silva Júnior
IF Goiano – Campus Rio Verde
(Orientador)

AGRADECIMENTOS

“Bendito o varão que confia no senhor, e cuja esperança é o senhor.” Jeremias 17:7. Sou grato a Deus por tudo que tenho, se hoje posso concluir esta graduação, foi graças a força, fé e inteligência que me proporcionou.

O meu muito obrigado para Dona Matar Helena e Sr. Vicente de Paula e a Srta. Mikaele Estefânia, meus amados e queridos pais e irmã, que sempre fizeram o máximo para me ver estudando, vencendo as barreiras da distância e me dando força através de suas orações. Graças a vocês nunca me faltara educação, força de vontade e acima de tudo fé.

Agradeço ao Instituto Federal Goiano Campus – Rio Verde, por me oferecer toda a infraestrutura necessária a aplicação do meu projeto de TC, e principalmente ao laboratório de Hidráulica e Irrigação, por me fornecendo a oportunidade de realizar diversos projetos de pesquisas com bolsas remuneradas, laboratório de Materiais de Construção, onde fora realizado os testes de granulometria e ao laboratório de Saneamento e Meio Ambiente, que fora meu refúgio para as longas noites e dias de estudo. Em especial ao CNPq que financiou todo o projeto.

Ao meu amigo e professor Édio Damásio, por me orientar de maneira exemplar, atendendo as dúvidas e esclarecendo-as a todo momento, sempre disposto a ajudar e ensinar sobre as possibilidades de atuação profissional. Grato ao meu amigo e professor Bruno Botelho, por sempre me orientar e esclarecer as dúvidas encontradas diariamente, por ter me orientado no meu primeiro projeto, em 2015, na área de tratamento de esgoto, a qual, desde então sou apaixonado.

Obrigado meu amados e queridos amigos pelo carinho, companheirismo e fé, sempre me auxiliando e apoiando. Foram muitas horas de trabalho duro, outras de lágrimas, até muitas risadas, confesso que não faltaram histórias. Em especial Rhayane Carvalho e Marcos Vinicius que são pra mim, como irmãos.

Grato a Deus pelo afeto e cumplicidade da Srta. Kelly Fernandes, que sempre estivera ao meu lado, lutando e me ajudando nos momentos difíceis.

RESUMO

BATISTA, Mateus Costa. **Uso de traçador salino para a determinação de condições hidrodinâmicas em wetlands construídas**. 2018. 53p. Monografia (Curso de Bacharelado de Engenharia Ambiental). Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde, Rio Verde, GO, 2018.

A hidrodinâmica exprime relevante influência ao tratamento de esgotos, principalmente sobre o tempo de contato entre os microrganismos, meio suporte e o esgoto, intervindo nas reações físicas, químicas e biológicas no reator. O trabalho buscou investigar através de modelos matemáticos e com apoio da aplicação do uso de traçador salino as condições hidrodinâmicas em um sistema híbrido de wetlands construídas (WC). Através dos cálculos e das medições realizadas obteve-se valores de eficiência volumétrica e hidráulica, índice de curto circuito, modelo de dispersão, modelo de tanque em série e o tempo de retenção hidráulico real e teórico nas WCs estudadas. Este estudo foi realizado no IF Goiano – Rio Verde, na estação piloto de WC, composto por uma WC de fluxo vertical em série com uma WC de fluxo horizontal. Utilizou-se o método “estímulo-resposta em pulso” para o ensaio hidrodinâmico, onde empregou como traçador o cloreto de sódio. Foi aplicado 0,55 kg de NaCl dentro do tanque de armazenamento de efluente, em seguida agitando e liberando o esgoto para as WC, configurando o pulso. Aferiu-se a condutividade elétrica do esgoto na saída de cada célula em intervalos de 30 minutos. Obteve assim o tempo que cada parcela de volume de efluente leva para percorrer as WC. Com os resultados obtidos pode-se dizer que: o conjunto de WC apresentou leve ajuste entre os modelos idealizados e a realidade local, sendo que a WC vertical apresentou um leve desvio do escoamento de fluxo de mistura completa, com uma leve tendência ao regime disperso. Já a WC horizontal apresentou alto desvio ao escoamento de fluxo de pistão, pelo fato de apresentar alto nível de dispersão das partículas, havendo a existência de caminhos preferenciais, tendo ainda uma leve tendência ao fluxo disperso.

Palavra-Chave: hidrodinâmica; modelagem matemática; esgoto; traçador.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Wetlands superficial. Fonte: Salati (1998).	17
Figura 2 - Wetlands subsuperficial. Fonte: Salati (1998).....	18
Figura 3 - Tipos e filtros plantados com macrófitas, Fonte: Adaptado de (VYMAZAL e KROPFELOVÁ, 2008).	20
Figura 4 - Reator de fluxo em pistão. Fonte: Morilla, 2011.....	23
Figura 5 -Reator de mistura completa. Fonte: Edison, 2011.....	23
Figura 6 - Reator de tanques em série. Fonte: Edison, 2011.....	24
Figura 7 - Sistema de tratamento com wetlands híbridas. Fonte: Acervo Pessoal.....	28
Figura 8 - Planta baixa do sistema híbrido de wetlands construído. Fonte: Acervo Pessoal.	30
Figura 9 - Wetlands vertical, sistema de distribuição de esgoto. Fonte: Acervo Pessoal.	30
Figura 10 - Wetlands horizontal. Fonte: Acervo Pessoal.....	31
Figura 11 - Passo a passo segundo NBR 7217. Fonte: Acervo Pessoal.....	31
Figura 12 - Curva granulométrica do meio suporte. Fonte: Acervo Pessoal.....	32

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais características físico-químicas dos esgotos sanitários.....	11
Tabela 2- Caracterização do meio suporte	33
Tabela 3 - Estatística descritiva das vazões afluente e efluente às células de tratamento.	37
Tabela 4 - Variáveis medidas e calculadas no sistema de wetlands construídos após aplicação do traçados salino (a).....	40
Tabela 5 -variáveis medidas e calculadas no sistema de wetlands construídos após aplicação do traçados salino (b).....	40
Tabela 6- Comparação entre os tempos de retenção hidráulico projetado, teórico e real.	43

LISTA DE SIMBOLOS

Δt : variação do tempo (min);

CE: Condutividade elétrica ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$.)

C_i : é a concentração de cloreto de sódio ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$);

CU: coeficiente de uniformidade;

D: coeficiente de dispersão ($\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$);

d: número de dispersão;

EETD: Estação Experimental de Tratamento de Esgoto Doméstico;

ε : porosidade do meio suporte (%);

ICC: índice de curto circuitos;

L: comprimento (m);

N: número de tanques em série;

NaCl: cloreto de sódio;

\bar{Q} : vazão média da célula em estudo ($\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$);

Q: taxa de aplicação hidráulica ($\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$);

TDH: tempo de detenção hidráulico (dias);

TDHr: tempo de detenção hidráulico real (dias);

TDHt: tempo de detenção hidráulico teórico (dias);

T_i : é o tempo referente à concentração medida (dias);

T_p : é o tempo que corresponde ao pico de maior concentração (dias);

u: velocidade média ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$);

V: volume de esgoto na WC (m^3);

V_p : volume de poros (m^3);

WC – H: wetland construída de fluxo horizontal;

WC – V: wetland construída de fluxo vertical;

WC: wetland construída;

X : tempo em minutos da medição da CE;

Y: concentração de NaCl calculado;

λ Eficiência hidráulica;

σ^2 : variância;

σ_{θ}^2 : variância adimensional do pulso do traçador;

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
2	REVISÃO DE LITERATURA	10
2.1	CARACTERIZAÇÃO	10
2.2	WETLANDS CONSTRUÍDAS	11
2.3	CLASSIFICAÇÃO HIDRODINÂMICA DAS WETLANDS CONSTRUÍDAS	12
2.3.1	MEIO SUPORTE	13
2.3.2	WETLANDS DE FLUXO SUPERFICIAL	17
2.3.3	WETLANDS DE FLUXO SUBSUPERFICIAL	18
2.3.4	WETLANDS DE FLUXO HORIZONTAL SUBSUPERFICIAL	18
2.3.5	WETLANDS DE FLUXO VERTICAL	19
2.3.6	WETLANDS HÍBRIDAS	19
2.4	USO E CLASSIFICAÇÃO DA VEGETAÇÃO EM WETLANDS CONSTRUÍDAS	20
3	REGIME HIDRÁULICO	22
3.1	TEMPO DE DETENÇÃO HIDRÁULICA	24
4	USO DE TRAÇADORES	25
5	MATERIAIS E MÉTODOS	28
5.1	LOCALIZAÇÃO DA UNIDADE EXPERIMENTAL	28
5.2	CRITÉRIOS DE GERAÇÃO DE ESGOTOS E REDE COLETORA	28
5.3	SISTEMA PRIMÁRIO DE TRATAMENTO DO ESGOTO DOMÉSTICO	29
5.4	DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA HÍBRIDO DE WETLANDS CONSTRUÍDOS	29
5.5	CURVA GRANULOMÉTRICA	31
5.5.1	POROSIDADE DO MEIO SUPORTE	32
5.6	TESTE HIDRODINÂMICO	33
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
6.2	ESTÍMULO-RESPOSTA DO PULSO DE TRAÇADOR	37
6.3	VARIÁVEIS MEDIDAS E CALCULADAS NO SISTEMA DE WC	40
6.4	COMPARAÇÃO ENTRE O TDH PROJETADO E TDH REAL	42
7	CONCLUSÃO	44
7.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS	44
8	REFERÊNCIAS	45

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvendo econômico e o aumento da densidade demográfica dos grandes centros urbanos, têm provocado grandes transformações no meio ambiente, em especial a quantidade e qualidade dos recursos hídricos. Segundo Archela et al. (2003), quanto maior o volume de água utilizado, maior será a quantidade de água residuária devolvida aos mananciais, podendo esta causar controvérsias para a saúde pública e a economia da região.

De maneira a diminuir os danos causados pelo lançamento de esgotos *in natura* em corpos d'água, estes são destinados a estações de tratamento de esgotos (ETE), que em geral, consistem em sistemas projetados, promovendo a remoção da carga poluidora do esgoto e a recuperação da qualidade da água (KATO et al., 2014).

Segundo o Instituto Trata Brasil (2016), 52% da população brasileira tem acesso a coleta de esgoto, e de todo esse esgoto coletado, apenas 44,92% recebe o efetivo tratamento. Segundo a mesma organização, a média das 100 maiores cidades brasileiras em tratamento dos esgotos foi de 50,26%. Sendo que apenas 10 delas tratam acima de 80% de seus esgotos.

Logo, é necessário o uso de tecnologias para polimento do efluente final. Assim, as wetlands construídas (WC), apresentam baixos custos de implantação, operação e manutenção que podem ser aplicadas aos sistemas de tratamentos, oferecendo maior grau de qualidade ao efluente final.

Porém ainda são limitados os estudos dedicados a operação/dimensionamento de WC. Como por exemplo a falta de estudos correlacionados a fatores de dimensionamento e a hidrodinâmica com eficiência na remoção de poluentes.

A hidrodinâmica pode ser entendida como a dinâmica de movimento do fluido através da WC, que exprime relevante influência sobre o tempo de contato entre os microorganismos, meio suporte e as macrófitas com esgoto, intervindo nas reações dentro do reator. Segundo Usepa (2000), caso ocorra algum curto-circuito ou zona morta na WC, acarretará em efeitos no tempo de contato real, assim como na velocidade de escoamento e na eficiência do tratamento.

Assim sendo, faz-se necessário o estudo das condições hidrodinâmicas, para avaliação entre a diferença dos valores estipulados em projetos e os valores encontrados após os testes de investigação.

O objetivo do presente trabalho foi verificar o comportamento das vazões, comparar os modelos teóricos idealizados com os encontrados na realidade e descrever as equações que melhor representam o comportamento do fluxo hidrodinâmico das wetlands construídas.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Caracterização

Os esgotos apresentam características em função dos usos à qual a água foi submetida e as formas com que são exercidas, variando com o clima, situação socioeconômica e com os costumes da população (VON SPERLING, 2014).

Segundo o mesmo autor, os esgotos domésticos contêm aproximadamente 99,9% de água, sendo que a fração restante 0,1% é constituída de sólidos orgânicos e inorgânicos, suspensos e dissolvidos, além da fração de microrganismos.

Os lançamentos de efluentes líquidos em cursos d'água pode alterar as características do mesmo, como por exemplo: pH, temperatura, composição e concentração de cada componente, acarretando em consequências drásticas para o meio ambiente (NASCIMENTO,1996).

Em virtude dos despejos inadequados, pode-se gerar problemas de saúde na população, causados por ingestão de alimentos provenientes das águas contaminadas e/ou pelo contato direto com esta água. Além disso, quando esta é utilizada para o abastecimento humano, a baixa qualidade do recurso hídrico passa encarecer o processo de tratamento para posterior distribuição para a população (CETESB, 2013).

Assim sendo, faz-se necessário o tratamento dos esgotos domésticos de forma controlada. Para isto são utilizadas as Estações de Tratamento de Esgoto, chamadas ETEs, onde a água residual passa por processos físicos, químicos e biológicos de forma a reduzir a carga poluidora, devolvendo um efluente com características mais próximas aos dos mananciais da região.

Cumprir ressaltar que não existe um tipo padrão de ETE, ao adotar um sistema de tratamento é necessário levar em consideração o tamanho da área, tecnologia disponível, qualidade desejada para o efluente tratado e principalmente da legislação da região.

De modo geral as ETEs propiciam a remoção dos principais parâmetros relativos a esgotos domésticos, os quais merecem atenção especial devido a sua carga poluidora, estes são: sólidos de maneira geral, indicadores de matéria orgânica, nitrogênio, fósforo e indicadores de contaminação fecal (SPERLING, 2014).

O mesmo autor, apresenta na tabela 1, os principais parâmetros presentes nos esgotos domésticos. Estes são valores tipicamente utilizados em diversos estudos no que diz respeito ao tratamento destes resíduos.

TABELA 1 - PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DOS ESGOTOS SANITÁRIOS.

Parâmetro	Contribuição per capita (g/hab.dia)			Concentração	
	Faixa	Típico	Unidade	Faixa	Típica
Sólidos totais	120 – 220	180	mg/L	700 – 1350	1100
❖ Em suspensão	35 – 70	60	mg/L	200 – 450	350
▪ Fixos	7 – 14	10	mg/L	40 – 100	80
▪ Voláteis	25 – 60	50	mg/L	165 – 350	320
❖ Dissolvidos	85 – 150	120	mg/L	500 – 900	700
▪ Fixos	50 – 90	70	mg/L	300 – 550	400
▪ Voláteis	35 – 60	50	mg/L	200 – 340	300
❖ Sedimentáveis	–	–	mg/L	10 – 20	15
Matéria Orgânica					
❖ DBO ₅	40 – 60	50	mg/L	250 – 400	300
❖ DQO	80 – 120	100	mg/L	450 – 800	600
❖ DBO última	60 – 90	75	mg/L	350 – 600	450
Nitrogênio Total	6,0 – 10,0	8,0	mg N/L	4 – 15	45
❖ Nitrogênio Orgânico	2,5 – 4,0	3,5	mgN/L	1 – 6	20
❖ Amônia	3,5 – 6,0	4,5	mgNH ₃ –N/L	20 – 35	25
❖ Nitrito	≈ 0	≈ 0	mgNO ₂ ⁻ -N/L	≈ 0	≈ 0
❖ Nitrato	0,0 – 0,2		mgNO ₃ ⁻ -N/L	0 – 1	≈ 0
Fósforo	0,7 – 2,5	1,0	mgP/L	4 – 15	≈ 0
❖ Fósforo Orgânico	0,2 – 1,0	0,3	mgP/L	1 – 6	≈ 0
❖ Fósforo inorgânico	0,25 – 0,7	0,7	mgP/L	3 – 9	≈ 0
Ph	–	–	–	6,7 – 8,0	7
Alcalinidade	20 – 40	30	mgCaCO ₃ /L	100 – 250	200
Metais pesados	≈ 0	≈ 0	mg/L	Traços	Traços
Compostos orgân. Tóxicos	≈ 0	≈ 0	mg/L	Traços	Traços

Fonte: (SPERLING, 2014).

2.2 Wetlands Construídas

Áreas úmidas (Wetlands naturais), são caracterizadas por apresentarem água durante todo ou boa parte do tempo, como: pântanos, mangues, brejos ou várzeas. Durante séculos, estas áreas foram usadas como um local de descarga de esgoto sanitário, em sua maioria, por ser o canal de esgotamento mais cômodo do que pelo conhecimento da capacidade de autodepuração ou dos serviços prestados pelo ecossistema (WENTZ, 1987).

Aos poucos essa prática foi abolida, devido aos efeitos deletérios causados ao ecossistema, por outro lado foi observada a tratabilidade da água residuária neste ambiente, adotando assim WC. Estes apresentam capacidade de alterar a qualidade dos efluentes, por meio da ação de diversos mecanismos físicos, químicos e biológicos sem causar danos ao meio ambiente. Por essa razão, os wetlands construídos têm sido introduzidos de maneira artificial, como uma forma de tratamento de águas poluídas (LAULENSCHALAGER, 2001).

Os WC consistem em sistemas projetados, com uso de argila compactada ou de materiais para impermeabilização do tanque (denominado reator), que podem ou não utilizar de plantas aquáticas (macrófitas), estas dispostas sobre o substrato (areia, solo, brita, cascalho, escoria de alto forno entre outros), que promovem o papel de filtro e meio suporte para crescimento de bactérias e das raízes das plantas. Esta associação é capaz de promover a adsorção, absorção de nutrientes além de degradar/transformar a matéria orgânica complexa, em elementos mais simples que podem ser assimilados pelas plantas e microorganismos, promovendo a redução da concentração de poluentes.

Segundo Sandri et al. (2006), os sistemas de WC têm sido usados com bons resultados no tratamento de águas residuárias, com inclusive, a possibilidade de uso agrícola do efluente tratado, além do mesmo apresentar moderado custo de capital, baixo consumo de energia, manutenção, estética paisagística e aumento do habitat para a vida selvagem (MICHAEL JR., 2003)

A remoção de poluentes em WC, ocorre por meio da interação entre sedimentos, meio suporte, microrganismos, plantas, atmosfera e a água residuária. Sua eficiência dependerá do tempo de contato, que é uma variável determinante para o processo de remoção de alguns poluentes (PAOLI, 2013).

Segundo Zanella (2008), diversas dessas características são de interesse para o tratamento de esgoto e águas pluviais, o que leva a elaboração de sistemas específicos para o tratamento de águas residuais.

2.3 Classificação Hidrodinâmica das Wetlands Construídas

Segundo Stiegemeier (2014), para definição do tipo de WC utilizado deve-se avaliar cada sistema de tratamento de efluentes e ajustar o mais apropriado de acordo com as necessidades do projeto. A seguir serão apresentadas as principais classificações hidrodinâmicas das wetlands construídas.

2.3.1 Meio suporte

O meio filtrante dos sistemas WC está diretamente associado ao tratamento do esgoto: meio suporte para o crescimento microbiano, filtração e adsorção, atuar como meio suporte para fixação das raízes e rizomas da vegetação, além auxiliar na distribuição e recolhimento do fluxo de entrada e saída do reator (VYMAZAL e KROPFELOVÁ, 2008). Logo faz-se necessário o conhecimento das características para a escolha do meio suporte aplicado as WC.

Uma das principais propriedades é a condutividade hidráulica, pois permite o escoamento do esgoto através do meio suporte. Materiais com baixa condutividade resultam em escoamentos superficiais, impedindo a atuação dos microorganismos presentes na rizosfera, sendo então necessário o emprego de materiais capazes de manter uma boa condutividade ao longo do tempo (POÇAS, 2015).

De acordo com Santos (2016), o material usado não deve possuir granulometria muito fina (<0,2 mm), pois embora colabore para maior eliminação de microorganismos, absorção de nutrientes e clarificação, reduz a porosidade (podendo causar escoamento superficial). Por outro lado, não se deve usar granulometria muito grosseira (>4,0 mm), visto que facilite a condução hidráulica, porém prejudica o desenvolvimento das macrófitas, não realizando um tratamento satisfatório.

Na Alemanha, com a implantação das primeiras WC teve-se o uso do solo natural como elemento filtrante, no entanto observou-se que materiais com baixa condutividade hidráulica resultavam em escoamentos superficiais, não deixando que o esgoto entrasse em contato com a rizosfera. Deste modo, busca-se nas WC um material capaz de manter ao longo do tempo boas condições de fluxo, ou seja, alta condutividade hidráulica (POÇAS, 2015).

É essencial conhecer a porosidade e a permeabilidade (condutividade hidráulica) do meio suporte escolhido, assim se faz um estudo hidráulico e de dimensionamento dos wetlands construídos com maior eficácia (METCALF e EDDY, 1991).

Outros fatores devem ser levados em consideração ao escolher o material utilizado como meio suporte. Mello (2016), cita que a caracterização dos materiais utilizados como meio suporte em projetos de sistemas de WC precisam de cautela, devido à capacidade de filtração e adsorção de cada material, ou seja, a seleção e caracterização do material estão acondicionadas aos fins do tratamento no sistema.

Poças (2015), também relaciona a escolha do material filtrante ou meio suporte às finalidades do tratamento, porque o material deve possuir bom potencial reativo, isto é, a capacidade de promover a adsorção de compostos inorgânicos, como a amônia e ortofosfato e

também bom potencial de fluxo. A areia é um bom exemplo, pois tem ótimo potencial de fluxo, mas pouca ou nenhuma capacidade adsortiva.

O meio suporte ou o recheio de uma WC, como areia ou brita e também as raízes das plantas tende a acondicionar o comportamento hidrodinâmico do sistema. Estes fatores podem ainda interferir na formação de curtos-circuitos hidráulicos e zonas mortas e, dessa forma, causar alterações no Tempo de Detenção Hidráulica (TDH) das Wetlands (PAOLI e VON SPERLING, 2013).

A permeabilidade dos materiais filtrantes deve ser levada em conta para que possa permitir o escoamento da massa líquida, a maior capacidade de troca catiônica e a atividade microbiológica (LOHMANN, 2011). Assim sendo, busca-se materiais capazes de manter boas condições de escoamento por longos períodos de tempo e que possuam boa capacidade de adsorção de compostos, logo então, os materiais comumente empregados são: brita, areia, argila, escoria de forno, cascalho, pneu picado, bambu entre outros.

- **Argila**

A argila, como tem maior capacidade de troca catiônica pode ser usada quando necessária em pequenas quantidades para aumentar a capacidade de troca catiônica (CTC) do meio filtrante. Isso acontece porque quando o solo tem alta permeabilidade, como a areia e a brita, têm também baixa CTC sendo necessário utilizar alguma mistura para atender as duas características ao mesmo tempo (LEITÃO et al., 2002).

Duarte (2002) alerta ainda, que não se deve empregar um tipo de meio suporte (substrato) que contenha alto teor de argila porque os poluentes ao invés de serem degradados pelos microrganismos, tenderão a acumular-se no substrato e após saturação serão novamente liberados para o efluente.

- **Brita**

Em WC, as pedras britas normalmente possuem uma função um material de drenagem, as quais muitas vezes não fazem parte do processo de filtração, mas evitam a exposição do esgoto à superfície (HOFFMANN et al., 2010) e (WEBER, 2015). Segundo Zanella (2008), ela permite maior facilidade de manutenção da permeabilidade do leito.

Além disso, o preenchimento com brita até o nível do esgoto, impede o contato direto de pessoas e animais com efluente ali presente (VYMAZAL, 2005).

O emprego da brita também é usual quando se emprega no tratamento de esgotos primários, para reter os sólidos na sua superfície e depois sua decomposição enquanto

permanece no meio suporte, uma vez que o contato é facilitado entre biomassa aderida e os sólidos ali retidos.

- **Escória de alto forno**

As escórias de alto forno (EAF), por exemplo, parecem ter potencial considerável como adsorventes de baixo custo para o fósforo em soluções aquosas. Tanto experimentos em laboratório como também pesquisas de campo demonstram uma alta capacidade de adsorção de P por EAF (JOHANSSON e GUSTAFSSON, 2000).

Uma das vantagens principais na utilização de escória de alto forno para a remoção de fosfato em relação a outros métodos de tratamento químico é que a abundância de EAF e sua fácil disponibilidade, em determinadas regiões, fazem dela uma forte alternativa na investigação de um método econômico para a remoção de fosfato. Além disso, o material que é enriquecido com P pode ser usado como fertilizante, levando em consideração o P que estará disponível às plantas (DORNELAS, 2008).

Paoli (2010) trabalhando com wetlands e utilizando a escória de alto forno constatou que ela possuía alta capacidade de retenção de P através de adsorção e precipitação. De Paoli (2010) ao comparar leitos de wetlands com escória e outro com brita #2, obteve melhor desempenho de remoção de P-Total com a escória, 93% enquanto na outra obteve 76 % de remoção.

Como desvantagem da utilização da escória temos o trabalho de De Paoli (2010), que utilizando escória de aciaria como meio suporte em WHFSS e focando a remoção de fósforo, obtiveram um efluente final com valores de pH próximos de 12, inviabilizando, nesse caso, o lançamento direto em corpo d'água receptor sem a correção do pH.

- **Areia**

Poças (2015), observou em sua pesquisa que a areia e a brita são os materiais mais comumente utilizados como meio filtrante ou de suporte, e ainda concluiu que não houve nenhuma interferência no resultado em decorrência do material filtrante, como a colmatção.

Avaliando as potencialidades dos wetlands no Brasil observou-se que 28% dos trabalhos avaliados utilizam brita e areia como maciço filtrante (Lima 2016). Em muitos destes trabalhos obteve-se alta eficiência de remoção.

No entanto, Sousa et al. (2004), nas condições de um experimento com esgoto secundário, a remoção de fósforo em sistema wetland contendo areia lavada como substrato diminuiu, à medida que aumentou o tempo de operação do sistema. Nos meses iniciais, a remoção foi máxima (eficiência de 90%). Entretanto, essa eficiência tendeu a diminuir nos

meses subsequentes. Provavelmente, essa diminuição deve-se à saturação do substrato (areia lavável) com compostos de fósforo precipitados (TANNER et al.,1999; SOUSA et al.,2001).

A areia possui ótimo potencial de fluxo, porém, nenhuma, ou muito pouca capacidade adsorptiva (SEZERINO, 2006).

- **Condutividade hidráulica**

A condutividade hidráulica ou a permeabilidade é a capacidade que um meio possui de permitir o escoamento de água entre os seus espaços vazios, sendo o grau de permeabilidade uma expressão numérica do coeficiente de permeabilidade, este coeficiente depende principalmente da temperatura e do índice de vazios (CAPUTO, 1996).

Uma das propriedades intrínsecas do meio suporte é sua condutividade hidráulica, essa é fundamental para obtenção do desempenho esperado (MENDONÇA, 2015).

Entretanto, devido às limitações físicas dos sistemas de escoamento em meios porosos, algumas condicionantes devem ser atendidas para favorecer a manutenção do fluxo laminar, constante e uniforme, sem turbulência, durante a vida útil do sistema. Tais como o emprego de partículas uniformes, que tendem a amenizar os curtos-circuitos no escoamento em reatores que operam com grandes gradientes hidráulicos (perdas de carga), ou que sofrem por falhas construtivas, e a inclusão da precipitação, da evapotranspiração no balanço hídrico dos sistemas (REED e COL., 1995).

A escolha da granulometria do meio suporte está diretamente relacionada com aumento ou diminuição da condutividade hidráulica, visto que, quanto maior a granulometria, maior será a presença de poros do meio e conseqüentemente maior a condutividade. Enquanto que, em ambientes com menor presença de poros, menor será o movimento do esgoto ao longo do perfil do meio suporte.

No entanto, a condutividade hidráulica no meio suporte é de difícil aferição no sistema, porque é influenciada por fatores como a ocorrência de fluxo preferenciais, curto circuitos e obstrução da porosidade, em consequência de variações de crescimento e degradação de raízes e acúmulo/degradação de resíduos sólidos nas WC (BRASIL e MATOS, 2008).

A porosidade é expressa pela porcentagem do volume de vazios em relação ao volume total da amostra previamente coletada. Quanto mais poroso for um meio, maior será a quantidade de vazios, conseqüentemente mais permeável e maior a condutividade hidráulica (OLIVEIRA, 2002).

A análise granulométrica consiste na determinação do tamanho das partículas, em se tratando do meio suporte para wetlands, pode-se utilizar da metodologia por peneiramento

(NBR 7217/1987). Por exemplo, em solos constituídos por agregados miúdos, areia, argila bem como ao se tratar de agregados graúdos como, brita, escoria de alto forno e matérias sintéticas específicos.

Segundo Brasil e Matos (2008), a redução no valor da condutividade hidráulica pode ser esperado, pois, durante o tratamento das águas residuárias, ocorre dentro das WC o desenvolvimento do biofilme, a formação de precipitados e a retenção de sólidos suspensos do efluente, que contribuem para obstrução do espaço poroso e conseqüentemente na diminuição da condutividade hidráulica no meio suporte.

2.3.2 Wetlands de fluxo superficial

Nesta modalidade o efluente escoava acima do meio suporte e entre os caules das plantas e os sistemas de raízes, promovendo maior aeração no efluente, as plantas geralmente apresentam-se enraizadas na base, conforme trabalho de Calijuri et al. (2009), usando a espécie *typha sp* (taboa) e *Brachiaria arrecta* (braquiária do brejo). Ainda sobre o mesmo sistema, Salati (2009), evidencia o uso de macrófitas flutuantes, principalmente a espécie *Eicchornia crassipes* (aguapé) e submersas como *Egeria densa*, *Elodea canadenses*, *Elodea nuttallii*, *Ceratophyllum demersum* e *Hydrilla verticillata*.

A exposição do esgoto ao meio ambiente ocasiona maior incidência de radiação ultravioleta, podendo levar a eliminação de microrganismos, porém um fator negativo a este tipo de sistema, é que o mesmo fica visível podendo levar a criação e proliferação de vetores (STIEGEMEIER, 2014), conforme figura 1.

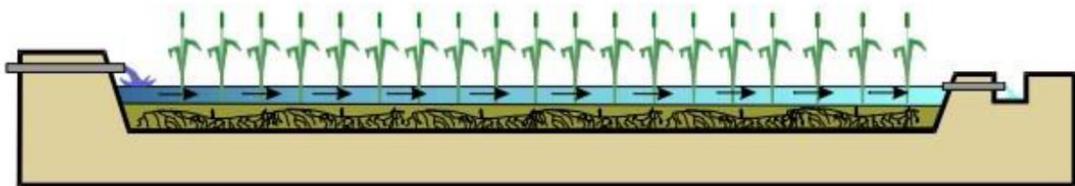


Figura 1- Wetlands superficial. Fonte: Salati (1998).

Segundo Usepa (2000), as wetlands de fluxo superficial possuem uma melhor eficiência para remoção de matéria orgânica e de sólidos suspensos, pois tem maior tempo de detenção hidráulica, conforme o manual da PROSAB (2009), estes sistemas são adequados para receber esgotos de lagoas de estabilização, realizando o polimento através da retirada de nutrientes.

2.3.3 Wetlands de fluxo subsuperficial

Neste sistema o efluente não entra em contato com a atmosfera, tendo seu escoamento apenas dentro do meio suporte em contato com as raízes das macrófitas. A passagem do esgoto pelas raízes proporciona o contato com as bactérias ali presentes, promovendo a depuração/transformação do poluente (ZINATO e GUIMARÃES, 2017). Segundo Zanella (2008) em virtude do efluente não escoar superficialmente o risco de geração de odores, proliferação de agentes patogênicos, e a exposição ao homem e animais são minimizados, conforme figura 2.

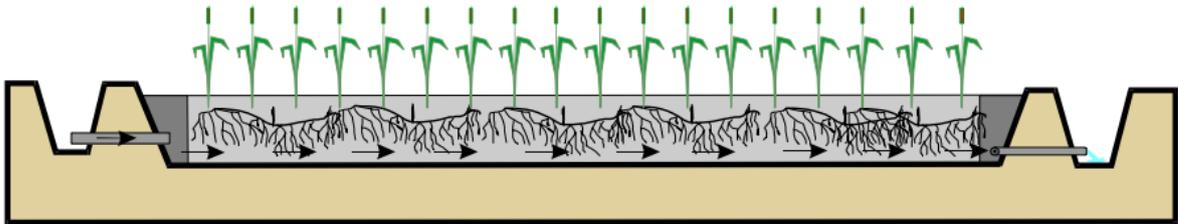


Figura 2 - Wetlands subsuperficial. Fonte: Salati (1998).

Sabido das condições facultativas associadas ao substrato e as raízes das plantas, Usepa (2000), diz que este processo demonstra maior eficiência para remoção de nitrogênio, fosforo e de metais pesados devido as grandes variedades de reações que ocorrem dentro do meio suporte.

2.3.4 Wetlands de fluxo horizontal subsuperficial

O esgoto percorre o leito em fluxo horizontal, com isso entende-se que o efluente entra pelo cabeceira do reator e segue o escoamento longitudinalmente até a saída na outra extremidade, passando por diversas zonas encontradas dentro do reator.

Na zona de raízes existe a atuação de bactérias aeróbicas, estas coexistem pela propiciação de condições aeróbicas pelas plantas, que transportam oxigênio e fazem a difusão do mesmo no meio líquido. Nas zonas anaeróbicas a depuração ocorre por processos de origem física, química e a principalmente pela degradação microbiológica (STIEGEMEIER, 2014). O leito deve ter uma granulometria tal que permita o fluxo contínuo do esgoto, sem ocorrência da colmatação do meio (VON SPERLING e et al., 2009).

Neste sistema o princípio da remoção/transformação dos nutrientes e da matéria orgânica se dá pela atuação dos microorganismos, favorecidos pela zona de raízes e exsudados, podendo estes serem aeróbicos, facultativos e anaeróbicos. Em WC de fluxo horizontal subsuperficial pode-se encontrar espécies emergentes tais como *ypa sp* (taboa) e *Brachiaria arrecta* (braquiária do brejo), usadas por, Brasil et al. (2007), além de Calijuri et al. (2009).

2.3.5 Wetlands de fluxo vertical

O sistema é alimentado na parte superior de forma intermitente, o efluente atravessa verticalmente todo meio suporte, chegando até a base do sistema, onde o efluente é recolhido por um sistema de drenos. Salienta-se que a medida que o efluente escoar pelo leito, atravessa diversas zonas, favorece a depuração/transformação dos poluentes.

Este sistema é construído em superfície plana e as macrófitas são plantadas na superfície do reator, fazendo com suas raízes infiltrem nas camadas inferiores (ZINATO e GUIMARÃES, 2017).

A maneira como esgoto é disposto, promove um arraste de oxigênio atmosférico para dentro do leito filtrante e juntamente com o oxigênio transferido pelas macrófitas, tornam a degradação da matéria orgânica mais eficiente (SEZERINO, 2006).

Neste sistema são comumente utilizadas macrófitas emergentes tais como: *Typha latifolia* e *Phragmites carca*, utilizadas por Juwarkar et al. (1995) na Índia, além do uso da *Typha sp.* e *Eleocharis sp.* por Mazzola et al. (2005), *Eleocharis sp.*, por Araujo et al. (2013).

Há depender das condições topográficas da área, existe a necessidade do uso de bombas para elevar a cota do efluente. Caso sejam utilizados mais de um leito em paralelo, um dos leitos poderá receber as bateladas durante um ou mais dias, enquanto os outros permanecem em repouso, o que permite a ocorrência da digestão e secagem do lodo na superfície e a manutenção das condições aeróbicas no leito (SPERLING e et al., 2009).

2.3.6 Wetlands híbridas

Os modelos híbridos consistem na combinação de diferentes tipos de wetlands construídas, favorecendo a maior remoção de poluentes, estes modelos consistem na combinação de células de fluxo horizontal e vertical. A configuração mais comum é uma célula vertical seguida de uma horizontal. Essa configuração vem sendo bastante aplicada, principalmente na Europa, devido aos altos requisitos de remoção de amônia nesses países (KADLEC e WALLACE, 2008).

A associação do sistema de fluxo vertical em série com fluxo horizontal, proporciona ao esgoto um ambiente mais oxigenado, promovendo a nitrificação e a ação de bactérias aeróbicas, ao passo que, segue para wetland de fluxo horizontal, o esgoto encontra por condições predominantemente aeróbicas e anóxicas, acarretando no processo de desnitrificação e redução da concentração de DBO^{20}_5 . Com tudo o resultando será um esgoto com baixa concentração de sólidos suspensos e nitrogênio total. (COOPER et al., 1999; KADLEC; WALLACE, 2009).

A figura 3, traz a classificação completa das WC.

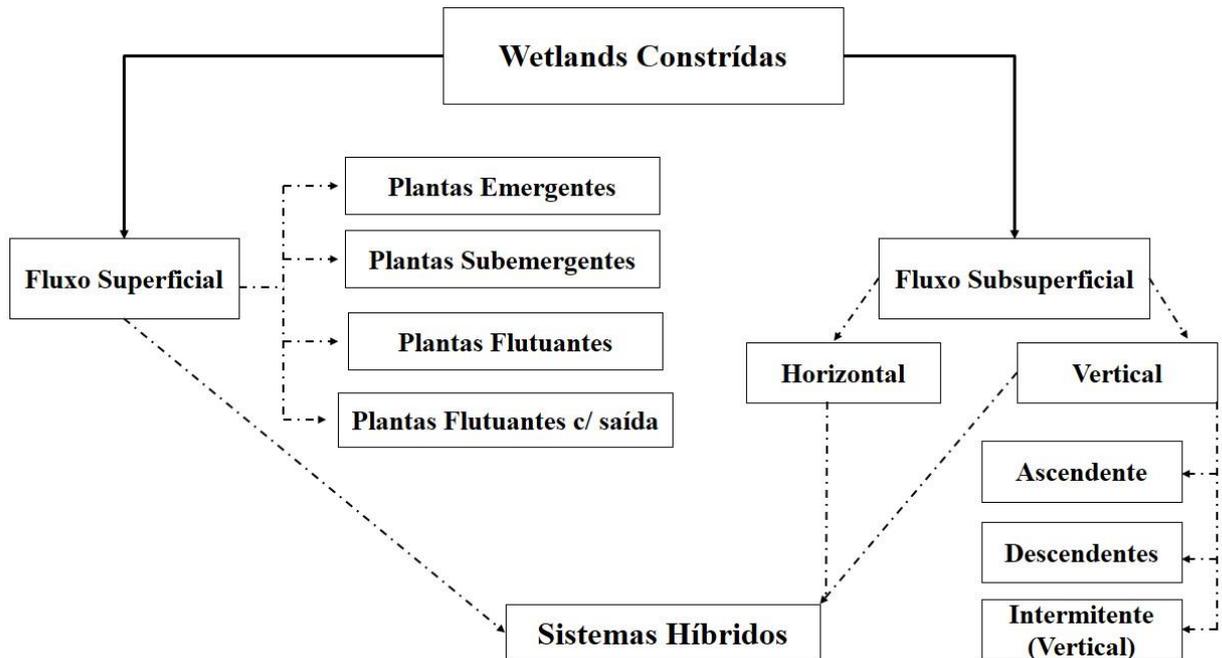


Figura 3 - Tipos e filtros plantados com macrófitas, Fonte: Adaptado de (VYMAZAL e KROPFLOVÁ, 2008).

2.4 Uso e classificação da vegetação em wetlands construídas

As espécies vegetais utilizadas em wetlands devem ter características de áreas alagada além de apresentar um sistema radicular bem desenvolvido. Estas plantas contribuem para a efetiva degradação e transformação dos compostos encontrados no esgoto, através da liberação de exsudatos pelo sistema de zona de raízes, favorecendo a concentração e o desenvolvimento da microbiota que auxiliam na degradação de poluentes e nos processos bioquímicos para remoção de nutrientes.

Hawes e Brigham (1992), apresentaram possíveis mecanismos para melhor compreender a interação entre os exsudatos e os microrganismos. De acordo com os autores, o efeito pode ser direto, com a atração para rizosfera e provimento de nutrientes para o crescimento de microrganismos; e indiretos, com o estímulo do crescimento de microrganismos antagonistas e mudanças no ambiente químico. Segundo Bertin et al. (2003), os compostos exsudatos incluem a secreção de íons, oxigênio livre, água, enzimas, mucilagem e uma diversidade de metabólitos primários e secundários com carbono na sua composição.

Segundo Armstrong et al. (1998), as macrófitas são adaptadas morfológicamente para se desenvolverem em porções inundadas e apresentam espaços internos que possibilitam o transporte de oxigênio para o sistema radicular, o que cria condições de oxidação aeróbia na rizosfera e elevam o potencial redox, possibilitando o crescimento e fixação de bactérias

nitrificadoras. Já para Rubim (2016), as raízes, caules e folhas das macrófitas podem proporcionar o aumento da área de contato e a aderência para desenvolvimento do biofilme, além da promoção de condições aeróbicas através do transporte de oxigênio, impedimento da colmatação do meio suporte, e de produzi carbono para comunidades de microrganismos heterotróficos promovendo elevada densidade de atividade biológica

Por tanto, para a seleção de espécies vegetais em sistema de wetlands construídos deve-se levar em consideração aspectos de sanidade das plantas, viabilidade do seu cultivo em longo prazo e aspectos estéticos do sistema, e a capacidade da vegetação de adaptar-se à determinada região.

As macrófitas podem ser classificadas como emergentes, flutuantes e submersas.

- **Macrófitas emergentes**

Neste sistema utilizam de plantas que desenvolvem seu sistema radicular preso ao meio suporte, sendo que o caule e as folhas ficam parcialmente submersos, onde o esgoto pode ser tratado ao passar através das raízes e caules. Segundo Ansari et al. (2016), durante a passagem do esgoto pela rizosfera, ocorre a degradação do mesmo pela ação dos microrganismos e pelos processos físicos e químicos. Exemplos: *Juncos ssp e Typha spp, Typha domingensis*.

- **Macrófitas flutuantes**

Podem ou não ter as raízes presas ao substrato, apresentam rápido crescimento, alta capacidade de assimilação de nutrientes, grande capacidade de estocar nutrientes na biomassa, tolerância às características físicas e químicas do esgoto e tolerância às condições climáticas locais (TANNER, 1996).

Segundo Salati et al. (2009), diz que a ação depuradora desses sistemas de plantas flutuantes ocorre pela adsorção de nutrientes e metais pelo sistema radicular das plantas, ação de microrganismos associados à rizosfera, e grande produção de biomassa que pode ser utilizada na produção para ração animal, biofertilizantes e energia. Alguns exemplos de espécies: *Eichhornia crassipes, Lemma spp, Pistia stratiotes Salvinina molesta*.

- **Macrófitas submersas**

Geralmente são plantas que podem ou não estar enraizadas no meio suporte, estas crescem totalmente submersas, algumas ainda, apresentam rizoides pouco desenvolvidos e que permanecem flutuando submersas, geralmente ficam presas aos pecíolos e caules das macrófitas emersas (VILELA, 2016).

Esta modalidade é utilizada geralmente para polimentos de efluentes, tratamento secundário e/ou terciário. Isto devido a sua sensibilidade a condições anaeróbicas e à serem

tampadas por outras plantas. Segundo Santos (2015), estas macrófitas consomem o dióxido de carbono dissolvido na água e provocam um acréscimo na concentração de oxigénio dissolvido, levando a um aumento do pH que facilita a volatilização de amónia e precipitação química do fósforo. Exemplo: *Elódea*, *Egeria densa*, *Mayaca sp*, *Utricularia sp* e *Cobomba*.

3 Regime hidráulico

Variáveis hidráulicas têm importância fundamental no projeto e na operação satisfatória de Sistemas de Wetlands construídos Hodgson et al. (2004). Segundo Von Sperling (2009), as modificações na composição e concentração dos compostos durante a permanência do efluente no reator são dadas em virtude do transporte hidráulico (entrada e saída) e da cinética das reações (produção e consumo).

Segundo o mesmo autor, o modelo hidráulico de um reator é função do tipo de fluxo e do padrão de mistura. Em termos de fluxo, têm-se as seguintes condições.

- Fluxo intermitente (ou batelada): entrada e/ou saída descontínua;
- Fluxo contínuo: entrada e saída contínuas.

Com relação ao padrão de mistura, depende da forma geométrica do reator, da quantidade de energia introduzida por volume, tamanho da unidade entre outros fatores, tendo como modelos idealizados fluxo de pistão e mistura completa Von Sperling (2009).

A avaliação das características hidrodinâmicas contribui para o dimensionamento ideal do sistema de tratamento (MATTOS e LUCRECIO, 2012).

• Reator de fluxo em pistão

As partículas do fluido entram continuamente em uma extremidade do tanque, passam através do mesmo e são descarregadas na outra extremidade, na mesma sequência em que entraram. O fluxo se processa como êmbolo, sem misturas longitudinais. As partículas mantêm a sua identidade e permanecem no tanque por um período igual ao tempo de detenção hidráulica. Este tipo de fluxo é reproduzido em tanques longos, com elevada relação comprimento-largura, na qual a dispersão longitudinal é mínima (VON SPERLING, 2009).

Desse modo, se entende que no fluxo em pistão não há mistura longitudinal, e o decaimento deve ser constante.

O regime de fluxo em pistão é o esperado para wetlands construídos de fluxo horizontal de escoamento subsuperficial, ou ser o mais próximo do fluxo em pistão para otimizar sua eficiência de tratamento (MATTOS e LUCRECIO, 2012).

Lima et al. (2016) concluiu em seu trabalho que o transporte hidráulico dos constituintes presentes na wetland apresenta canalizações e um padrão de mistura tendendo a fluxo em pistão.

A figura 4 traz um exemplo idealizado do sistema.

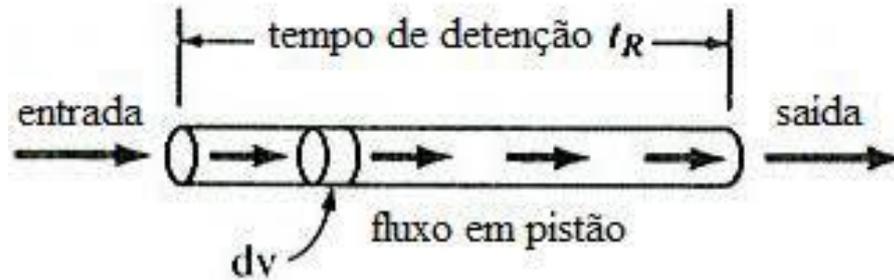


Figura 4-Reator de fluxo em pistão. Fonte: Morilla, 2011.

- **Reator de mistura completa:**

As partículas que entram no tanque são imediatamente dispersas em todo o corpo do reator. O fluxo de entrada e saída é contínuo. As partículas deixam o tanque em proporção a sua distribuição estatística. A mistura completa pode ser obtida em tanques circulares ou quadrados se o conteúdo do tanque for contínua e uniformemente distribuído (VON SPERLING, 2009).

Desse modo, se entende que o efluente será homogêneo, portanto sua concentração será igual em qualquer ponto do reator.

A maior parte dos reatores operando para tratamento biológico de efluentes não tem um comportamento hidrodinâmico ideal, mas podem ser, dentro de uma faixa de erro aceitável, considerados reatores de fluxo pistão ou mistura completa ideais (BEWTRA; BISWAS, 2006).

Toscani (2010) afirma que quando há choques de cargas, seja de temperatura, matéria orgânica, nutrientes e outros, o modelo de mistura completa têm melhor estabilidade operacional. Outro levantamento do autor, é em relação a forma geométrica dos reatores de mistura completa, que afirma que se aplica melhor com formatos circulares onde ocorre agitação mecânica. A figura 5 traz um exemplo idealizado do sistema.

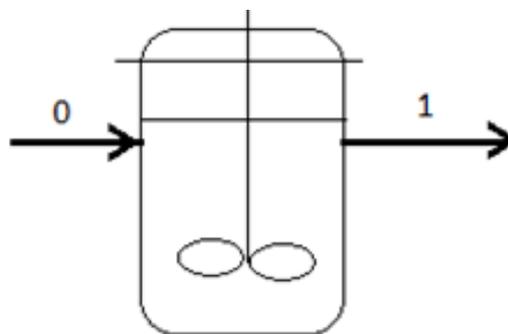


Figura 5 -Reator de mistura completa. Fonte: Edison, 2011.

- **Modelo de taques em série**

Os reatores de mistura completa em série são usados para modelar o regime hidráulico que existe entre os regimes ideais de fluxo de pistão e mistura completa. Se a série for composta de uma unidade apenas, o sistema reproduz um reator de mistura completa. Se o sistema apresenta um número infinito de reatores em série, o fluxo em pistão é reproduzido. O fluxo de entrada e saída é contínuo. Unidades em série são também comumente encontradas em lagoas de estabilização e de maturação (VON SPERLING, 2009).

Metcalf & Eddy (1991), trouxeram que o modelo de mistura completa são associações de reatores em série, que tanto absorve os choque de carga quanto ocupa menos volume que apenas a configuração de célula única para se obter a mesma eficiência. A figura 6 traz um exemplo idealizado do funcionamento do sistema.

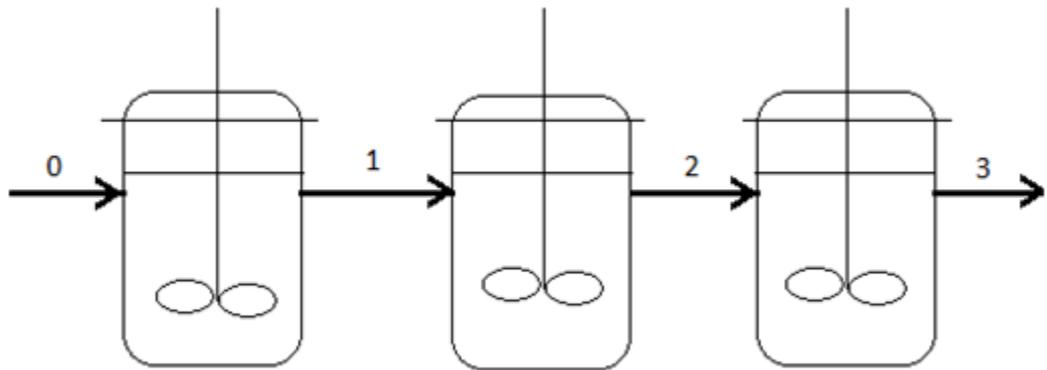


Figura 6-Reator de tanques em série. Fonte: Edison, 2011.

- **Reatores de fluxo disperso**

O fluxo disperso ou arbitrário é obtido e um sistema qualquer com um grau de mistura intermediário entre dois extremos idealizados de fluxo de pistão e mistura completa. Na realidade, a maior parte dos reatores apresenta fluxo disperso. No entanto, devido à maior dificuldade na sua modelagem, são feitas aproximações para um dos modelos hidráulicos ideais. O fluxo de entrada e saída é contínuo (VON SPERLING, 2009).

Desse modo, o fluxo disperso surgiu para ser um fluxo arbitrário, no qual existe uma mistura intermediária, que corresponde a maioria dos reatores reais.

3.1 Tempo de detenção hidráulica

O Tempo de detenção hidráulico (TDH), é de grande importância para a área de tratamento de efluentes, pois é parte fundamental para projetos e operação satisfatória de diversos sistemas de tratamentos, dentre eles o WC. Segundo Giraldo et al., (2009), variáveis

como TDH e o grau de mistura podem determinar a eficiência da remoção de poluentes em WC. Para o tratamento de efluentes em WC, a literatura recomenda um tempo de detenção hidráulico de 5 a 14 dias para os sistemas superficiais e de 2 a 7 dias para sistemas subsuperficiais (Reed, citado por KLETECKE, 2011). A ocorrência de curto circuito ou zonas mortas em WC podem trazer como consequência um efeito de menor tempo de contato e nas velocidades de fluxo, e assim afetam a eficiência do tratamento (HEADLEY e KADLEC, 2007).

O TDHt (tempo de detenção hidráulico teórico) pode ser entendido como tempo de permanência do esgoto no reator, WC. O TDHt, segundo Headley e Kadlec (2007).

Salienta-se lembrar que nos WC é utilizado material de preenchimento (meio filtrante), sendo assim, deve-se levar em consideração a porosidade desse material, sendo $V = \text{Volume Total} \times \text{porosidade}$.

Curto-circuito é o termo usado para descrever a passagem do esgoto através do sistema num curto período de tempo, sendo este menor que o TDHt. Zonas mortas representam as regiões em que os tempos de permanência de partículas do líquido no interior do reator, em média, é relativamente alto, quando comparado aos valores do tempo teórico de detenção hidráulico (Teixeira, 1995).

Estes eventos podem ocorrer devido a mistura pobre e a localização inadequada dos dispositivos de entrada e saída do efluente, crescimento do biofilme, desenvolvimento das raízes, acúmulo de sólidos no material filtrante bem como pela estratificação do efluente, devido as mudanças de temperatura e densidade do efluente.

Passos (2017) alerta que o TDH observado pode ser apenas uma premissa teórica e podem ocultar fenômenos hidráulicos que tornam o Tempo de Detenção Hidráulico Real (TDHr) e o comportamento hidrodinâmico diferentes dos teóricos, podendo resultar em baixas eficiências de tratamento.

O TDHt é aquele que apenas verificamos a razão entre o volume da unidade e a vazão afluente média, no entanto para saber o TDHr de um reator, testes como o de traçadores devem ser instalados para acompanhar a concentração adicionada no início do tratamento.

4 Uso de traçadores

Como dito anteriormente, durante a passagem do efluente pelo sistema de WC, ocorre o fenômeno de remoção de materiais sólidos através da sedimentação, e somando-se ao crescimento do sistema de raízes, pode-se levar ao fenômeno de obstrução dos poros. Para autores como Pedescoll et al. (2011) e De Paoli e Von Sperling (2013), a presença das plantas contribui para redução da porosidade e condutividade hidráulica nos sistemas de WC. Enquanto

que para Brix (1997), Brasil e Matos (2008) e Hua et al. (2014) dizem que, na verdade, as raízes favorecem o escoamento do efluente, devido ao crescimento das raízes expandindo o leito, promovendo novos caminhos no meio suporte.

Assim sendo faz necessário a identificação do tempo de detenção hidráulica real na avaliação hidrodinâmica de sistemas alagados construídos, para tal faz-se imprescindível o uso de traçadores.

Dentre os traçadores aplicados, destacam-se: Lítio, Brometo, Rodamina WT e Cloreto (KADLEC e WALLACE, 2009). O teste com traçador consiste em adicionar uma substância em um determinado volume de amostra (efluente). Essa substância poderá alterar ou acrescentar algumas propriedades físicas ou químicas no efluente, de modo que seja possível verificar indícios do traçador quando este passar por um ponto determinado do sistema. Com isso, é possível obter o tempo que cada parcela de volume de efluente leva para percorrer as WC, assim sendo, gerará uma curva de distribuição do TDH (MATOS et al., 2015).

Um inconveniente no uso de traçadores é que não existe uma substância ideal, que atenda aos critérios de apresentar características semelhantes ao fluido e não cause alterações no meio e que, ao mesmo tempo, apresente fácil detecção, mesmo quando em baixas concentrações.

O cloreto de sódio é um produto barato, fácil de adquirir, ocupa pouco volume e é de fácil detecção, no entanto, apresenta características que o tornam não ideal, como ser passível de absorção; suas soluções não apresentam massa específica semelhante à do líquido em tratamento, o que pode ocasionar fluxo preferencialmente vertical do sal, especialmente quando utilizadas soluções mais concentradas.

Ao se escolher traçadores deve-se observar fatores como a toxicidade, reatividade, solubilidade e limite de detecção (DIERBERG e DeBUSK, 2005).

Os testes com traçadores podem ser analisados, à condutividade hidráulica in loco, para mensurar, modelar e investigar o efeito da colmatação devido ao acúmulo de sólidos, crescimento do biofilme e a contribuição da vegetação nesse processo (KNOWLES et al., 2010; KNOWLES et al., 2011; NIVALA et al., 2012), além da distribuição do tempo de detenção hidráulico real (TDHr), que representa o tempo em que o fluido atravessa o filtro; e permite avaliar a presença de zonas mortas, curtos-circuitos e recirculação interna do fluido (LEVENSPIEL, 2000; METCALF e EDDY, 2003; KADLEC e WALLACE 2008)

No entanto, o ajuste dos modelos de escoamento e a obtenção dos parâmetros hidráulicos podem ser dificultados pelas condições ambientais locais e processos biológicos que ocorrem em WC de escoamento subsuperficial.

Borges et al. (2009), trabalhando com wetlands de escoamento subsuperficial horizontal observaram ainda perda do traçador fluorescente com adição de corantes (rodamina e fluoresceína sódica) devido, principalmente, à adsorção ao substrato e ao leito orgânico presente.

De Paoli e Sperling (2013), verificaram em teste com traçador, que houve diferença de condutividade hidráulica ao longo do leito do *wetland* construído plantado, apresentando caminhos preferenciais (com menor resistência do meio), onde apresentou TDHr para a unidade plantada menor que na unidade não plantada.

Mattos e Lucrésio (2012) ao realizarem ensaio com o traçador fluoresceína obtiveram curva de passagem na seção de saída do wetland construído, onde encontraram indicadores de eficiência hidráulica para a operação do sistema, concluindo que o wetland construído analisado tinha escoamento de fluxo disperso, aproximando-se do regime de fluxo pistão, regime este esperado para wetlands construídos de fluxo horizontal e escoamento subsuperficial.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 Localização da Unidade Experimental

A presente pesquisa foi realizada na Estação Experimental de Tratamento de Esgoto Doméstico (EETED), localizada no Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia Goiano, no município de Rio Verde-Go. Esta encontra-se sob as coordenadas geográficas Latitude 17°48'19.93"S e Longitude 50°54'24.28"O.

A EETD foi construída com objetivo de fomentar e auxiliar no conhecimento dos discentes, docentes bem como a comunidade adjacente sobre a importância na otimização de parâmetros e critérios de projetos quanto ao tratamento do esgoto doméstico.

A estação conta com tratamento prévio do esgoto através de um tanque séptico seguido em série com sistema híbrido de wetlands construídas, a mesma encontra-se em operação desde de julho de 2016. A seguir a figura 7 representa todo o sistema de tratamento.



Figura 7 - Sistema de tratamento com wetlands híbridas. Fonte: Acervo Pessoal.

5.2 Critérios de Geração de Esgotos e Rede Coletora

Para dimensionamento da unidade experimental, considerou-se a contribuição dos esgotos de 4 casas de funcionários que residiam no instituto, sendo contabilizado um total de 12 pessoas. Foi considerado uma geração *per capita* de esgoto de 100 L hab⁻¹ d⁻¹, segundo recomendação da NBR 7229 (ABNT, 1993).

Ainda considerando a mesma norma e as condições locais, foi estimado uma produção diária de 1200 litros. Assim, todo esgoto gerado é drenado para uma rede coletora de 100 mm

de diâmetro, feita a partir de tubos de PVC com uma extensão de aproximadamente 80 m. Sendo que a cada nova ligação dos ramais residenciais e/ou mudanças de direção da rede foram instaladas caixas de passagem com diâmetro de 600 mm, feitos de concreto pré-fabricados.

5.3 Sistema Primário de tratamento do Esgoto Doméstico

O esgoto chega até a EETED por gravidade, onde o mesmo é previamente tratado de forma anaeróbia por um tanque séptico, construído de alvenaria possuindo 3,4 m³ de volume. Possui uma geometria prismática com: 1,2 m largura, 2,2 m comprimentos por 1,3 m profundidade.

Posteriormente o esgoto segue para um tanque de sucção, também construído em alvenaria com 1,2 m³ útil, sendo 1,1 m de comprimento e 1,1 m de largura com 1,0 metro de profundida útil. Este é dotado de sistema motor bomba afogado.

Após recalque, o esgoto é direcionado para uma caixa d'água de polietileno de 1000 L, alocada a 1 m do solo, servindo como caixa de acumulação. Onde posteriormente, o esgoto seguirá por gravidade até o sistema híbrido de WC, passando primeiro pela wetland de fluxo hidráulico vertical subsuperficial e em série com wetland de fluxo hidráulico horizontal subsuperficial.

5.4 Dimensionamento do sistema híbrido de wetlands construídos

Para dimensionamento do sistema híbrido de wetlands construídas, embasou-se na cinética de remoção de poluentes de 1º ordem, onde utilizou-se o fluxo de mistura completa para a WC-Vertical e pistão para WC-horizontal.

As células foram implantadas através da escavação do solo, com posterior recobrimento/impermeabilização com uso da manta de polietileno de alta densidade (PEAD) de 1,5mm, preenchidas com uma camada de substrato (brita n° 2), e em seguida foi plantado o capim vetiver (*Chrysopogon zizanioides*).

As células foram projetas com geometria de tronco de pirâmide invertida, deixando uma borda livre com intuito de impedir possíveis extravasamentos do esgoto ou das águas pluviais, o sistema é alimentado de forma intermitente.

Salienta-se lembrar que se instalou 3 hidrômetros volumétricos, sendo 1 antes e depois da WC-V e outro após a WC-H, podendo assim verificar as vazões. Os volumes de entrada e saída de esgoto do sistema, foram registrados diariamente do sistema de WC. Foram coletadas 295 amostras a montante da WC-V, 293 a justamente da mesma e 293 a montante da WC-H, correspondendo a aproximadamente 10 meses.

Para amostragem dos dados hidrodinâmicos, realizou-se as leituras através da condutividade elétrica do esgoto, nos pontos denominados amostrador II e amostrador III. Conforme figura 8.

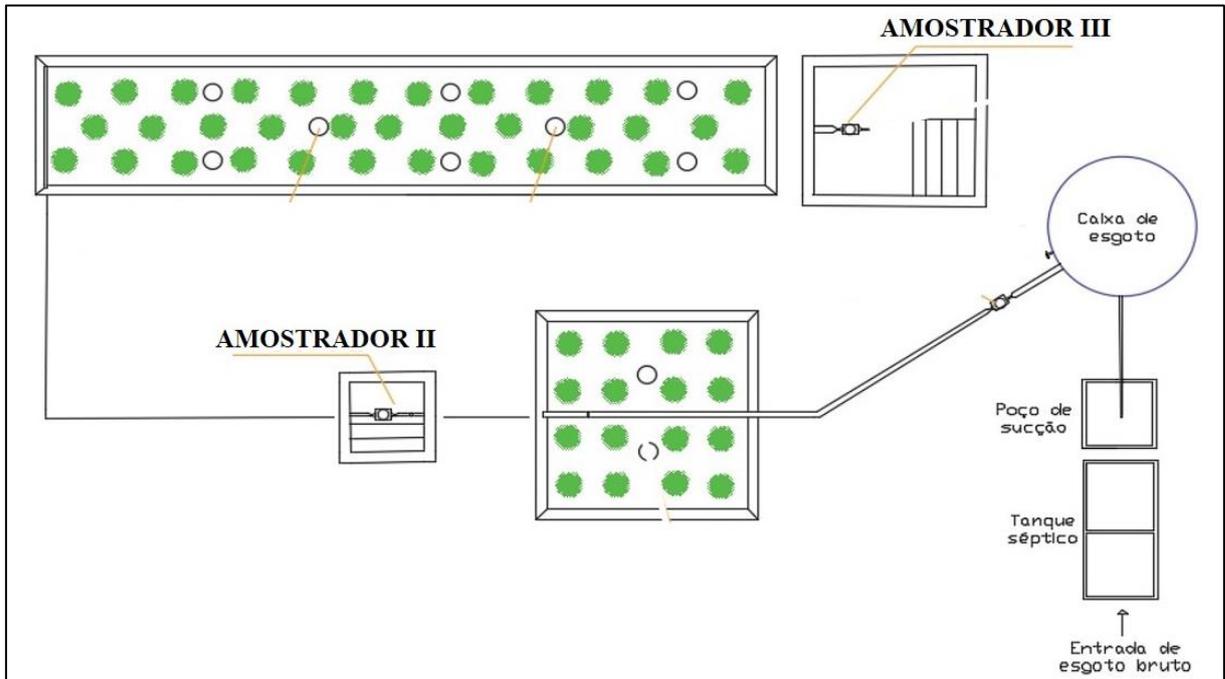


Figura 8 - Planta baixa do sistema híbrido de wetlands construído. Fonte: Acervo Pessoal.

Uma vez por semana foi realizado a limpeza nos hidrômetros, visto que ao longo do tempo o mesmo apresenta o fenômeno de colmatção

A WC-V possui largura e comprimento de 3m, profundidade de 0,85 m e tempo de detenção hidráulico de projeto de 2 dias. A célula é alimentada com fluxo subsuperficial vertical descendente, promovido por um cano de PVC de 100 mm, perfurado longitudinalmente, disposto no centro da célula de forma a promover uma distribuição homogênea da água residual. Ao fundo da mesma há um sistema de drenagem que conduz o esgoto para célula posterior. Conforme a figura 9.



Figura 9 - Wetlands vertical, sistema de distribuição de esgoto. Fonte: Acervo Pessoal.

A WC-H possui largura e comprimento de 2x10 m, profundidade de 0,4m conforme (figura 10). A célula possui tempo de detenção hidráulico de projetado de 3,5 dias, sendo alimentada com fluxo subsuperficial horizontal, promovido por um cano de PVC de 50 mm, perfurado longitudinalmente. A drenagem do esgoto é também realizada por tubos de PVC de 50 mm a jusante do sistema.



Figura 10 - Wetlands horizontal. Fonte: Acervo Pessoal.

5.5 Curva granulométrica

Para determinação do diâmetro efetivo e do coeficiente de uniformidade do material filtrante das wetlands utilizou-se da metodologia aplicada segundo a NBR 7217 (ABNT, 1987), e Faria (2000), respectivamente, os ensaios foram realizados no laboratório de materiais de construção do Instituto Federal Goiano, Campus-Rio Verde.

As amostras foram coletadas das WC-V e WC-H, lavadas em água corrente, posteriormente foram levadas para estufa a (105 – 110) C°, durante 24 horas. Em seguida pesou-se 0,5kg do material e pôs sobre as peneiras que já se encontravam sobrepostas na ordem crescente, da base para o topo, (nas malhas 2; 4,76; 6,3; 9,52; 19; 25,4; 37,7; 50; 63 e 75). Em seguida realizou-se agitação mecânica e por fim pesou-se a massa retida em cada peneira, com os dados obtidos elaborou-se uma curva granulométrica, conforme a figura 11 e 12.



Figura 11 – Passo a passo segundo NBR 7217. Fonte: Acervo Pessoal.

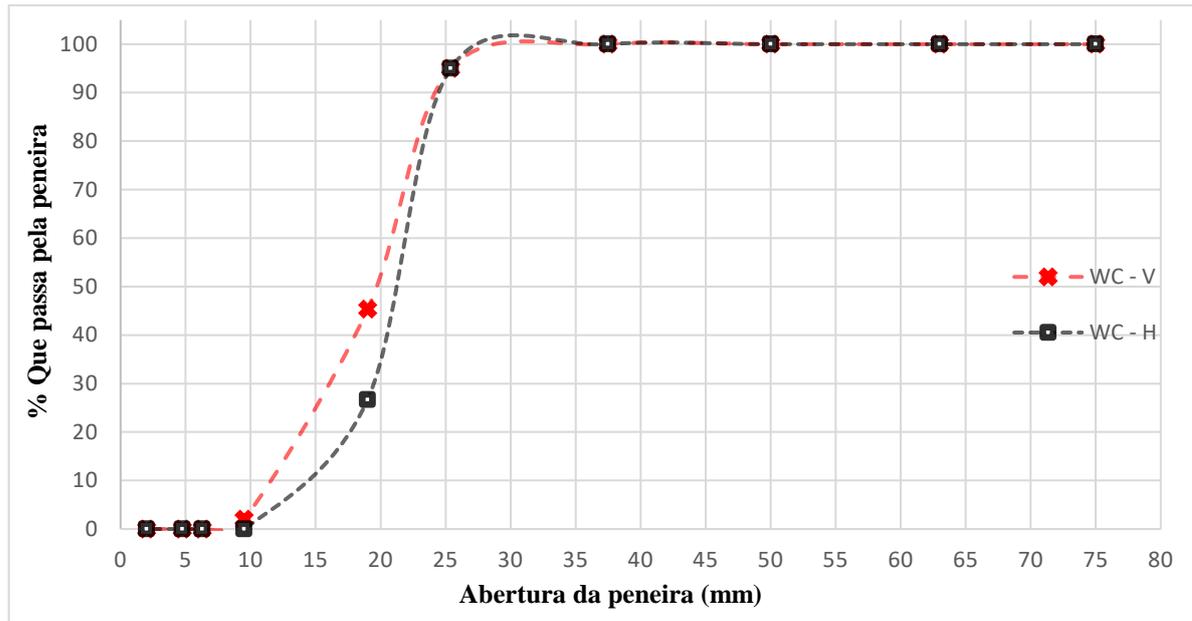


Figura 12 – Curva granulométrica do meio suporte. Fonte: Acervo Pessoal.

O diâmetro efetivo é determinado através da abertura da peneira que retém 90%, ou seja, que permite a passagem de apenas 10% do material. O coeficiente de uniformidade é obtido através da equação 1.

$$CU = \frac{D_{60\%}}{D_{10\%}} \quad (1)$$

em que,

CU: Coeficiente de Uniformidade (adimensional);

$D_{60\%}$: Diâmetro da peneira que passou 60% do agregado(mm);

$D_{10\%}$: Diâmetro da peneira que passou 10% do agregado(mm);

Na equação tem-se a relação entre as aberturas da peneira que possibilita a passagem de 60% sobre a peneira que proporciona a passagem de 10% do agregado analisado. Salienta-se que no presente ensaio não havia há presença das malhas com abertura de 32 e 12,5 mm, sendo necessária a interpolação de valores para determinação do $D_{60\%}$ e $D_{10\%}$.

5.5.1 Porosidade do meio suporte

Foram realizados ensaios para avaliação da porosidade inicial (sabe-se que ao longo do tempo a porosidade pode variar em função da biomassa acumulada no meio suporte ou mesmo a colmatagem dos leitos) do meio suporte das WC, nesses ensaios, preencheram-se dois recipientes cilíndricos de 12,08 L cada um com meio suporte das WC-V e WC-H (um para cada recipiente).

As amostras de brita foram coletadas em parcelas de forma aleatória em cada célula de tratamento. Após o preenchimento do recipiente com o material suporte, adicionou-se determinado volume de água até saturação total do meio (até a base superior do recipiente). A relação percentual do volume de água gasto para saturar o meio e o volume do recipiente do meio suporte corresponde à porosidade do meio suporte da WC analisada. Na WC-V, a porosidade do meio foi de 45,12 %, enquanto na WC-H foi de 46,69 %.

A Tabela 2, resume os dados referentes a porosidade, diâmetro efetivo, $D_{10\%}$, $D_{60\%}$ e o Coeficiente de Uniformidade encontrado nas Wetland vertical e horizontal.

Tabela 2- Caracterização do meio suporte

Meio Suporte	Porosidade (%)	$D_{EFETIVO}$	D_{10}	D_{60}	CU
WC - Vertical	45,12	11,5	11,5	20	1,74
WC - Horizontal	46,69	15	15	22	1,47

A obtenção dos valores de porosidade é de suma importância para a determinação do tempo de detenção hidráulico teórico, sendo este o tempo teórico de retenção do líquido durante os ensaios realizados na WC, podendo ser encontrado através da equação 2.

$$TDH_t = \frac{V_p}{\bar{Q}} = \frac{L.b.h.\varepsilon}{\bar{Q}} \quad (2)$$

Em que,

TDH_t : Tempo de Detenção Hidráulico Teórico (dias);

V_p : Volume de poros (m^3);

ε : Porosidade do meio suporte (%);

\bar{Q} : Vazão média da célula em estudo ($m^3.d^{-1}$).

5.6 Teste Hidrodinâmico

O ensaio com traçador foi realizado utilizando-se de uma solução contendo 0,55kg de cloreto de sódio (NaCl). Para o preparo da solução, adicionou-se o sal junto ao tanque de armazenamento de esgoto e posteriormente promoveu-se agitação, em seguida o esgoto foi aplicado na forma de pulsos na zona de entrada do sistema híbrido de WC.

A solução contendo traçador foi injetada no dia 19/08/2018 às 09:00 h. O início da coleta e leitura das amostras às 09:30 h do mesmo dia, prosseguindo até o dia 27/08/2018, totalizando 8 dias de monitoramento.

Após aplicação do pulso, o esgoto foi monitorado através da quantificação da condutividade elétrica do NaCl com o uso da sonda AK88, da marca AKSO, que possui intervalo de 0 a 1999 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. Posteriormente a condutividade elétrica pode ser convertida em concentração de NaCl pela curva-padrão.

Testes preliminares foram realizados com o intuito de saber a dosagem adequada de sal a ser aplicada bem como dos intervalos de coleta. Neste período experimental observou-se o efeito de toxicidade as plantas da WC-V, causado devido à grande quantidade de NaCl usada inicialmente.

Após a fase de testes, os dados foram coletados in loco de 30 e 30 minutos através da sonda, os dados foram anotados numa planilha que posteriormente fora digitalizada com auxílio de computador.

Os pontos analisados correspondem ao amostrador II, localizado a jusante da wetland vertical. E o segundo ponto sendo o amostrador III, localizado a jusante da wetland de fluxo horizontal.

5.6.1 Cálculo das condições hidrodinâmicas

Afim de comparar os dados coletados após o ensaio do traçador nas wetlands, foi aplicado alguns cálculos para avaliação das condições hidrodinâmicas, para tal utilizou-se de algumas variáveis.

- **Tempo de detenção real (TDH_r):**

É obtido através da equação eq.(3), onde ajustou-se os valores de C_i , T_i e Δt através do uso de ferramentas computacionais, com a análise de regressões dos dados de condutividade elétrica e o tempo de aplicação do traçador, obtendo equações matemáticas com R^2 próximo a um, indicando compatibilidade. (METCALF e EDDY, 2003);

$$\text{TDH}_r = \frac{\sum T_i \cdot C_i \cdot \Delta t}{\sum C_i \cdot \Delta t} \quad (3)$$

Sendo: C_i é a concentração de cloreto de sódio ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$), T_i é o tempo referente à concentração medida (dias), Δt variação do tempo (min).

- **Eficiência volumétrica (e_v)**

A eficiência volumétrica eq.(4) (KADLEC e WALLACE, 2009)

$$e_v = \frac{\text{TDH}_r}{\text{TDH}_t} \quad (4)$$

Sendo: TDHr o tempo de detenção hidráulico real ($m^3 \cdot d^{-1}$) e TDHt o tempo de detenção hidráulico teórico ($m^3 \cdot d^{-1}$).

- **Eficiência hidráulica**

A Eficiência hidráulica (λ), é calculada conforme eq.(5) (PERSSON et al., 1999);

$$\lambda = \frac{t_p}{TDH_t} \quad (5)$$

Sendo: t_p é o tempo que corresponde ao pico (maior concentração) (dias).

- **Índice de Curto Circuitos**

O índice de curto circuitos (ICC), eq.(6) (METCALF e EDDY, 2003);

$$ICC = \frac{T_i}{TDH_r} \quad (6)$$

Sendo: T_i é o tempo referente à concentração medida (dias).

A vazão média foi utilizada nos cálculos pelo fato da vazão real ser diferente da vazão de projeto, portanto faz-se necessário o uso da média das vazões obtidas durante o período de ensaio.

- **Modelo de dispersão**

Considerando o modelo de dispersão axial, os espalhamentos do pulso através dos reatores foram mensurados através do coeficiente de dispersão D ($m^2 \cdot s^{-1}$). Segundo Levenspiel (2000), a Equação 8 é um grupo adimensional que caracteriza o espalhamento do fluxo no reator.

$$d = \frac{D}{u \cdot L} \quad (8)$$

Sendo, d : número de dispersão; u : velocidade média ($m \cdot s^{-1}$) do escoamento; L : comprimento (m) do reator.

O resultado obtido pela Equação 8 indicou o número de dispersão da WC e a sua proximidade a algum modelo idealizado [(Reator de mistura Completa- RMC) ou (Reator de Fluxo em Pistão – RFP)]. Entretanto, para obter d , Levenspiel (2000) sugere o uso da Equação 9, considerando a variância (σ) dos dados obtidos.

$$\frac{\sigma^2}{TDH_r^2} = 2 \cdot \frac{D}{u \cdot L} \quad (9)$$

Onde
$$\sigma^2 = \frac{\sum Ti^2 \cdot Ci \cdot \Delta Ti}{\sum Ci \cdot \Delta Ti} - TDHr^2 \quad (9.1)$$

Para valores de $d < 0,01$, há tendência do escoamento do esgoto pelos leitos de tratamento ser aproximado ao fluxo pistonado, enquanto $d > 0,01$, indica grande desvio do escoamento reator de fluxo em pistão.

Após quantificação do valor de d , foram geradas curvas representativas do modelo de dispersão mais adequado para as células de tratamento WC-Fluxo subsuperficial Vertical e WC-Fluxo Subsuperficial Horizontal.

- **Modelo de Tanques-em-série**

O modelo de Tanques-em-série (TIS) pode ser usado toda vez que o modelo de dispersão foi utilizado, para um desvio não tão grande do escoamento pistonado (Levenspiel, 2000). Para estimativa do número de tanques (N) que representa cada WC, utilizou-se a Equação 10.

$$N = \frac{1}{\sigma_{\theta}^2} \quad (10)$$

Sendo σ_{θ} : variância adimensional do pulso do traçador, podendo ser calculada pela Equação 10.1.

$$\sigma_{\theta}^2 = \frac{TDHr - tp}{TDHr} \quad (10.1)$$

No qual tp é o tempo (d) correspondente à concentração de pico.

Ao se tratar dos tanques em série (N), pode-se entender que este modelo representa o número de reatores de mesmo volume, igualmente agitados, em série, através dos quais o fluido escoar, logo quanto maior o número de tanques menor é o grau de agitação e, no caso em que o número de tanques tende ao infinito, prevalece o fluxo de escoamento pistonado (Levenspiel, 2000).

Valor de N próximo a 1 indica fluxo de escoamento similar à Reator de Mistura completa, enquanto $N = \infty$, escoamento do tipo Reator de Fluxo em Pistão (LEVENSPIEL, 2000).

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Estatística Descritiva nas Vazões das Células de Tratamento

Afim de verificar os volumes de entrada e saída de esgoto do sistema, elaborou-se a tabela 3, com as estatísticas descritivas das vazões do sistema de WC.

Tabela 3- estatística descritiva das vazões afluente e efluente às células de tratamento.

Parâmetros	Vazões (L.d ⁻¹)		
	A – WC – Vertical	E – WC - Vertical	E – WC - Horizontal
Média	644,8	568,0	545,9
Mediana	586,9	497,4	410,7
Mínima	0,0	0,0	0,0
Máxima	2.659,6	2.599,9	3.650,6
Desvio Padrão	445,3	419,8	450,2

Conforme tabela 3, pode-se observar que as vazões médias afluentes nos dois sistemas são maiores que as vazões médias efluente. Este fato pode ser atribuído a evaporação do sistema. Perdas por infiltração são descartadas, pelo fato do sistema ser impermeabilizado por uma manta de PEAD.

Observou-se maior valor de vazão máxima na vazão efluente da WC-H, haja visto que esta sofre influência direta pelas contribuições de precipitação com relação ao tamanho da área superficial, sendo 20m² na Wetlands horizontal e 9m² na vertical, por tanto, quanto maior a área maior o volume de contribuição para vazão efluente.

Com relação ao desvio padrão das médias das vazões, foi verificado um grande desvio dos valores obtidos pelas médias, este fato pode ser explicado por fatores e circunstâncias, tais como: defeitos apresentados no sistema de recalque da motobomba, evapotranspiração, precipitações, o uso de hidrômetros volumétricos, que apesar de contribuírem com as medições de vazões, apresentam rápida colmatção, promovendo assim a perda da carga hidráulica, e pôr fim a variação da geração de esgotos durante o período letivo e o período de férias.

6.2 Estímulo-Resposta do Pulso de Traçador

A curva de passagem que mostra a variação da concentração do traçador em função do tempo é apresentada a seguir:

Conforme o gráfico da figura 13, observa-se uma tendência da WC -V a um modelo de reator de mistura completa, visto que, logo após a aplicação da solução salina, o esgoto já apresenta alta resposta de pulso, observa-se ainda que há presença de dois picos iniciais, como

também observado por Levenspiel, (2000) que sugere a presença de circulação interna lenta, desse modo uma mistura inadequada.

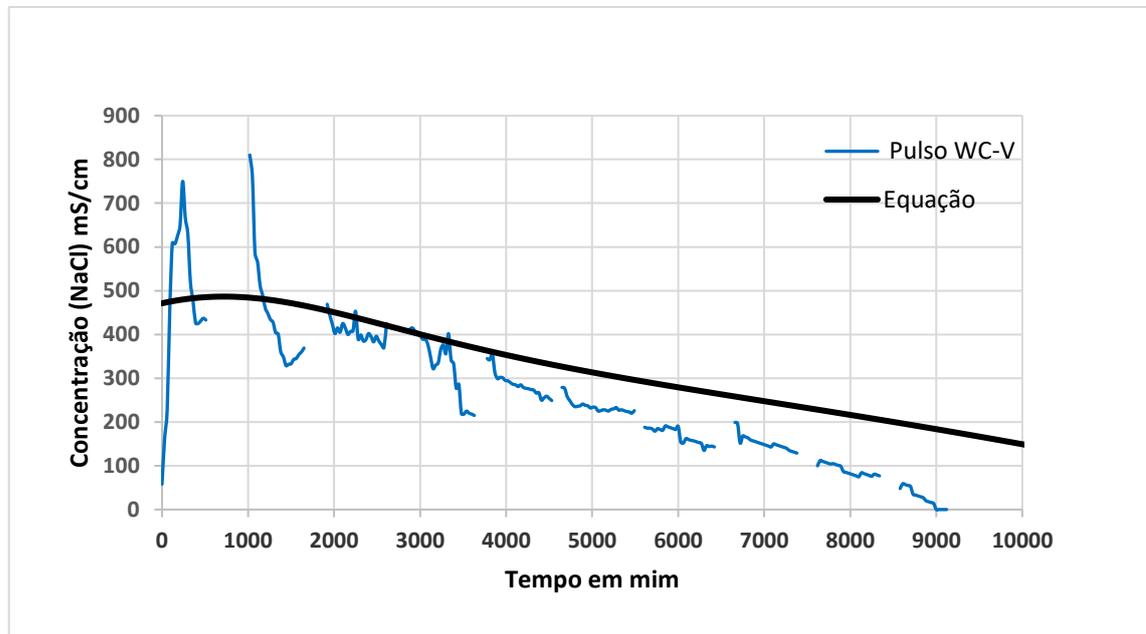


Figura 13 - Concentração do pulso traçador em função do tempo de medição na Wetland Construída de fluxo Vertical. Fonte: Acervo Pessoal.

A partir dos valores de concentração obtidos após leitura da CE do esgoto, foi possível determinar uma equação de ajuste Eq. (11) obtida através de ferramentas computacionais, onde ajustou-se uma equação matemática que melhor representasse os valores obtidos através da concentração dos pulsos do traçador em função do tempo. Equação (Sum of two Lorentzian) apresentou $R^2 = 0,81$. A partir das informações obtidas pela equação 11 calculou-se o TDHr

$$Y = \left(\frac{377,3}{1 + \left(\frac{x-383,3}{3648} \right)^2} \right) + \left(\frac{1173}{1 + \left(\frac{x-5245}{19324} \right)^2} \right) \quad (11)$$

Sendo: y, a concentração de NaCl calculado, x tempo em minutos;

Observa-se que o valor do TDH real (3,25 dias), foi superior ao TDH teórico (3,16 dias), sendo uma defasagem de 0,09 dias ou 130 minutos. Este resultado evidencia um atraso na resposta do traçador, que pode indicar a existência de zonas com recirculação interna ou zonas mortas, conforme sugerido por Mattos e Lucrécio (2012).

Já na WC horizontal, foi obtido uma curva de passagem demonstrada na figura 14, observa-se uma tendência do traçador a um modelo idealizado de reator de fluxo em pistão, comparando com o trabalho de Siqueira (1998). Conforme observações de Levenspiel, (2000),

quando há ascensão rápida e descida lenta da curva de passagem, é um indicativo do escoamento em caminhos paralelos ou a formação de canais preferenciais.

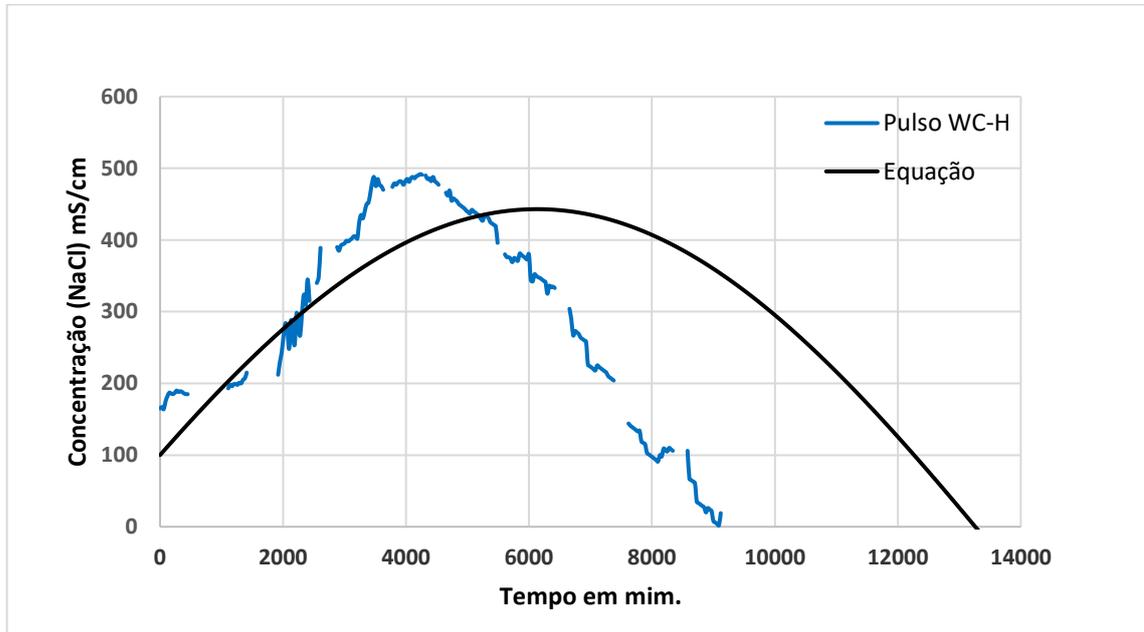


Figura 14 - Concentração do pulso do traçador em função do tempo de medição na Wetland Construída de fluxo Horizontal. Fonte: Acervo Pessoal.

Com os valores de concentração obtidos após leitura da CE do esgoto, foi possível determinar a equação de ajuste, Eq. (12) obtida também através de ferramentas computacionais, onde ajustou-se uma equação matemática que melhor representasse os valores obtidos através da concentração dos pulsos do traçador em função do tempo, equação (Gaussian distribution) apresentou o $R^2 = 0,93$. A partir das informações obtidas pela equação 12 calculou-se o TDHr.

$$Y = 1443 * e \left[-0.5 * \left(\frac{(X-6132)^2}{8323} \right) \right] \quad (12)$$

Sendo: y, a concentração de NaCl calculado, x tempo em minutos

O valor do TDH real calculado, foi de 4,31 dias, já o TDH teórico foi de 4,6 dias, logo entende-se que há uma defasagem dos valores obtidos, podendo inferir a existência de caminhos preferenciais do escoamento do esgoto, acarretando no TDH_T maior TDH_R , conforme mencionado por RIBEIRO (2007).

6.3 Variáveis Medidas e Calculadas no Sistema de WC

Na tabela 4, são apresentados os dados obtidos através das observações, coletados durante a realização do teste do traçador.

Tabela 4 – variáveis medidas e calculadas no sistema de wetlands construídos após aplicação do traçador salino (a).

VARIÁVEL	UNIDADES	SISTEMA HÍBRIDO	
		WC - Vertical	WC - Horizontal
Q_{afi}	$\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$	0,758	0,733
Q_{eff}	$\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$	0,733	0,686
t_p	dias	0,58	5,29
T_i	dias	0,02	0,1

Q_{afi} : vazão afluente;

Q_{eff} : vazão efluente;

t_p : é o tempo de pico que corresponde ao pico de maior concentração;

T_i : é o tempo referente à concentração medida

Na tabela 5, podem ser observados as variáveis calculadas com auxílio de ferramentas computacionais, para investigação das condições hidrodinâmicas da wetland de fluxo vertical e wetland de fluxo horizontal.

Tabela 5 -variáveis medidas e calculadas no sistema de wetlands construídos após aplicação do traçador salino (b).

VARIÁVEL	UNIDADES	VALORES CALCULADOS		VALORES IDEALIZADOS	
		WC - V	WC - H	RFMC	RFP
TDH_t	d	3,16	4,6	---	---
TDH_r	d	3,25	4,31	---	---
e_v		1,03	0,93	1	1
λ		0,18	1,15	0	∞
d		0,25	0,12	∞	0
N		1,22	4,35	1	∞
ICC		0,0064	0,023	0	1

Valores idealizados retirados de (Levenspiel, 2000).

TDH_t : tempo de detenção hidráulico teórico; d : número de dispersão;

TDH_r : tempo de detenção hidráulico real; N: número de tanques em série;

e_v : eficiência volumétrica; ICC: Índice de curto circuitos

λ : eficiência hidráulica.

Com relação aos valores de eficiência volumétrica, obteve-se 1,03 para WC-V e 0,93 para WC- H, segundo (THACKSTON et al., 1987), para valores próximos a 1, pode-se julgar que o reator foi totalmente utilizado. Conforme os valores encontrados nas WC e os valores idealizados na tabela 5, entende-se que o modelo idealizado inicialmente fora ajustado na realidade, sendo a WC –V fluxo de mistura completa e a WC- H fluxo pistonado.

Corroborando com estes resultados, foi observado por De Paoli e Sperling (2013), trabalhando com WC plantadas e não plantadas também obteve altos valores de eficiência volumétrica nos reatores demonstrando um bom aproveitamento do volume útil nos dois sistemas, sendo 97% ev para a unidade não plantada e 89% ev na unidade plantada.

No entanto em situações semelhantes Matos et al. (2015), encontraram melhor eficiência volumétrica na WC plantada do que na unidade não plantada, indicando juntamente com o resultado do ICC que a primeira encontra-se menos colmatada. Ainda sobre este trabalho, os autores justificaram a maior eficiência volumétrica na unidade plantada pela expansão da razies e rizomas pelo espaço poroso que, ao se degradarem proporcionam maior volume de vazios no meio.

A eficiência hidráulica é utilizado como medida para análise dos volumes mortos e padrão de escoamento em wetlands construídas segundo (PERSSON et al., 1999). De acordo com Metcalf e Eddy (2003) e Cota et al (2011), valores de λ próximos a 1 indicam uma distribuição uniforme do fluxo no sistema, apresentando uma tendência ao fluxo pistonado.

Ao analisar os valores obtidos de λ para WC - V 0,18 e WC - H 1,15, em comparação aos valores idealizados por Levenspiel (2000), pode-se verificar, que a WC - H tem um alta tendência ao desvio do fluxo pistonado. Enquanto que, valores abaixo de 0,50, representam uma baixa eficiência hidráulica conforme mencionado por Persson et. al, (1999). Podendo induzir que a WC - V teve um alta tendência ao desvio do escoamento de fluxo de mistura completa.

Considera-se o valor de d nos reatores com fluxo pistão igual a zero (ou seja, sem dispersão longitudinal entre volumes de controle subsequentes), enquanto que nos reatores de mistura completa o valor tende ao infinito, conforme mencionado por Toscani (2010).

Segundo Levenspiel, (2000) para valores de $d < 0,01$, há tendência do escoamento próximos ao fluxo pistonado, enquanto $d > 0,01$, indica grande desvio do escoamento reator de fluxo em pistão.

Após obtenção dos valores de “ d ” para WC –V 0,25 e WC – H 0,12. Observou-se que na WC-V tem alta dispersão, com leve tendência ao desvio do fluxo de mistura completa, já

para a WC-H, foi observado alta dispersão, porém menor que a vertical, indicando alto desvio do fluxo pistonado.

Segundo estudos realizados Borges et al. (2009), para a dispersão em wetlands horizontais, obteve-se valores de “d” que variavam entre 0,034 e 0,049, valores considerados inferiores à média observada na literatura. Já Lima et al. (2016), ao também analisarem o grau de dispersão em wetlands horizontais a partir da determinação do coeficiente de dispersão, encontraram 65 valores de 0,14 e 0,15 para o d, chegando à conclusão que ambos se caracterizam como o fluxo disperso, tendendo ao modelo de fluxo pistão. Este fato é justificado pela presença do hidrômetro volumétrico, que diminui a velocidade do fluxo em escoamento, fazendo com que o traçado disperse mais facilmente sobre a WC.

Foi verificado na WC – V um número de 1,22 tanques em série, indicando uma tendência ao reator de mistura completa, já para o valor encontrado na WC – H de 4,35, pode-se inferir uma tendência ao escoamento pistonado, conforme valores idealizados por Levenspiel, (2000).

Segundo Costa et al, (2011) as plantas presentes em sistemas de wetlands têm a capacidade de diminuir o índice de curto-circuito (ICC), sugerindo boas condições de mistura no reator. Segundo trabalhos realizados por Brix (1997) e Brasil e Matos (2008), o desenvolvimento das raízes promovem maior quantidade de poros, o que parece contribuir para maior facilidade de escoamento.

Conforme os dados observados pela tabela 5, para a interpretação dos conjuntos de dados da eficiência volumétrica e do índice de curto circuito, pode-se observar de maneira geral que ambas as WC apresentaram alta ev e baixo ICC, indicando que os reatores encontram-se pouco colmatado. Porém para a WC – H, observou maior existência de caminhos preferenciais em relação a vertical.

Ainda sobre a tabela 5, pode-se afirmar que através do ICC da WC-V 0,0064, há uma forte tendência ao escoamento do fluxo de mistura completa, enquanto que a WC- H 0,023 apresentou alto desvio do fluxo em pistonado.

6.4 Comparação entre os TDH projetado e TDH real

Na tabela 6, estão apresentados os dados correlatos ao tempo de detenção hidráulico projetado e os TDH real calculado com o uso do traçador salino após 2,5 anos de uso do sistema para tratamento de esgoto doméstico.

Tabela 6-Comparação entre os tempos de detenção hidráulico projetado, teórico e real.

Meio Suporte	TDH projeto (d)	TDH T (d)	TDH R (d)
WC - Vertical	2	3,16	3,25
WC - Horizontal	3,5	4,6	4,31

Os THD de projeto foram encontrados, segundo a cinética de remoção de poluentes de 1º ordem, onde utilizou-se o fluxo mistura completa para a WC-Vertical e pistão para WC-horizantal.

Ao observar a tabela 6, pode-se dizer que, tanto na WC-V e na WC-H os TDHr foram maiores que o TDH de projeto, este fato pode ser justificado pelas contribuições de vazões e pelo desenvolvimento do sistema de raízes das macrófitas.

Com relação as vazões, foi considerado para a contribuição dos esgotos uma produção diária de 1200 litros, considerando 12 pessoas nas 4 residenciais. Porém, devido à baixa geração de esgoto durante o período letivo e o de férias, também observada no trabalho de Secchi et al. (2016), e somando-se ainda a influência hidráulica dos hidrômetros volumétricos instalados a jusante e montante de cada célula, tem se maior contribuição para a retenção do esgoto nas WC.

Os hidrômetros volumétricos funcionam com à diferença de pressão na entrada e saída do hidrômetro, através da carga hidráulica, o que provoca o movimento giratório do êmbolo, movimento este que é transmitido ao mecanismo de medição (SAMMAE, 2017). Segundo mesmo autor esse mecanismo para muito facilmente com a perda de pressão. Por essas características, e pelo pouco volume de esgoto gerado, houve pouca carga hidráulica no fluxo em escoamento, não promovendo a pressão adequada para movimentar o êmbolo giratório, influenciando num maior TDH real nas WC.

Desde o início do projeto até a presente data dos ensaios, observou-se um desenvolvimento expressivo das razies das macrófitas, o que pode ter promovido maior área de poros, pela análise dos valores encontrados da eficiência volumétrica (e_v) e pelo índice de curtos-circuitos (ICC), verifica-se que o sistema híbrido de wetland apresenta-se pouco colmatado, conforme encontrado também por Brix, (1997) e Brasil e Matos (2008).

7 CONCLUSÃO

Após 2,5 anos de uso do sistema híbrido de wetlands construídos para tratamento de esgoto foi observado que a redução do volume de esgoto gerado, influenciou significativamente para a redução das vazões e no aumento do TDH real das WC, neste último pode-se acrescentar ainda a contribuição dos hidrômetros volumétricos e o aumento de poros no meio suporte pelo desenvolvimento das raízes das macrófitas.

A partir do ensaio realizado com o traçador salino permitiu obter a curva de estímulo – resposta do wetland construída vertical e horizontal, de modo que através destas curvas, foi possível determinar os indicadores de eficiência hidrodinâmica para as condições de funcionamento do processo na ocasião do estudo.

De maneira geral o conjunto da WC Vertical e Horizontal apresentou ótima eficiência volumétrica, indicando ajuste entre os modelos idealizados e a realidade encontrada.

A WC vertical apresenta um leve desvio do escoamento de fluxo de mistura completa, com uma leve tendência ao regime disperso, isso se deu pela wetland apresentar poucos caminhos preferenciais, alta dispersão, sendo caracterizado por um número pequeno de tanques em série além do fato do modelo inicialmente idealizado ter se encaixado com a realidade condizente da WC.

A WC horizontal apresentou alto desvio ao escoamento de fluxo de pistão, pelo fato de apresentar alto nível de dispersão das partículas, havendo a ainda existência de caminhos preferenciais, observando uma leve tendência ao fluxo disperso.

7.1 Considerações Finais

- **Novas Investigações:** Afim de verificar as variáveis hidrodinâmicas obtidas através das avaliações nas WC, deverão ser realizados novos testes com uso de outros traçadores. Pode-se ainda comparar com os resultados obtidos a partir de ensaios sem a presença dos hidrômetros volumétricos.
- **Melhorias:** A manutenção é peça fundamental para a eficiência global do sistema, por isso, deverão persistir as práticas de desobstrução de hidrômetros e da rede de coleta, remoção do lodo do tanque séptico, manutenção preventiva na motobomba, limpeza periódica das WC, a remoção de pragas e da vegetação morta das macrófitas.
- **Projetos Futuros:** Para o dimensionamento de um sistema híbrido de WC, pode-se utilizar da cinética de remoção de poluentes de 1º ordem, utilizando fluxo de mistura completa para WC vertical e pistão para WC horizontal.

8 REFERÊNCIAS

- ALVES, L. G. **A interferência de diferentes níveis de radiação solar no tratamento de esgoto sanitário em lagoas de alta taxa.** 2012.50 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2012.
- ANSARI, A. A. et al. **Phytoremediation. Management of Environmental Contaminants,** Volume 4. Suíça, Springer, 2016.
- ARAÚJO, R. B.; NETO, J. W. S.; CATTONY, E. B. M.; Avaliação de Leitões Cultivados com Macrófitas no Pós Tratamento de Vinhaça Oriunda de Reator Anaeróbio. In: **SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE APLICAÇÃO DE WETLAND CONSTRUÍDOS NO TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS,** 1., 2013, Florianópolis. Anais...Florianópolis: UFSC, 2013. Pág. 26.
- ARCHELA, E.; CARRARO, A.; FERNANDES, F.; BARROS, O. N. F.; ARCHELA, R. S. Considerações sobre a geração de efluentes líquidos em centros urbanos. **Geografia,** Paraná, v. 12, p.1-9, 2003.
- ARMSTRONG, W; ARMSTRONG, P.M.B; JUSTIN, S.H.F.W Convective gas-flow in wetland plant aeration. In: JACKSON, M. B.; DAVIES, D. D.; LAMBERS, H. **Plant Life under oxygen deprivation.** SBP Academic Publishing Bv, Netherlands, 1998.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7217: Agregados – Determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro.1987.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7229: Projeto, construção e operação de sistemas de tanques sépticos.** Rio de Janeiro. 1993.
- BERTIN, C.; YANG, X. H.; WESTON, L. A. The role of root exudates and allelochemicals in the rhizosphere. **Plant and Soil,** v. 256, p. 67-83, 2003.
- BEWTRA, J. K.; BISWAS, N. Biological Treatment of Wastewater. In: **Encyclopedia of environmental science and engineering.** Vol. 1. 5th Ed. Boca Raton: CRC Press, 2006. 649.
- BORGES, A. C.; MATOS, A. T.; CALIJURI, M. C.; OLIVEIRA, G. H. H.; ROLDÃO, J. S. F. Uso de traçadores para avaliação da hidrodinâmica de sistemas tropicais. **Engenharia Agrícola,** Jaboticabal, v.29, n.2, p.301-310, 2009.
- BRASIL, M. S.; MATOS, A. T. Avaliação de aspectos hidráulicos e hidrológicos de sistemas alagados construídos de fluxo subsuperficial. **Engenharia Sanitária e Ambiental,** Rio de Janeiro, v.13, p.323-328, 2008.
- BRASIL, M. S.; MATOS, A. T.; SOARES, A. A.. Plantio e desempenho fenológico da taboa (*Thypha* sp.) utilizada no tratamento de esgoto doméstico em sistema alagado construído. **Engenharia Sanitária e Ambiental,** Rio de Janeiro v. 12, n. 3, p. 266-272, 2007.
- BRIX, H. Do macrophytes play a rolen in constructed treatment wetlands. **Water Science and Technology,** Oxford, v.35, n.5, p.11-17, 1997.

CALIJURI, M. L.; BASTOS, R. K.; MAGALHÃES, T. B.; CAPELETE, B. C.; DIAS, E. H.O. Tratamento de esgoto sanitário em sistema de reatores UASB/Wetlands construídas de fluxo horizontal: eficiência e estabilidade de remoção de matéria orgânica, sólidos, nutrientes e coliformes. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v.14, n. 3, p. 421-430, set. 2009.

CAPUTO, H.P. **Mecânica dos Solos e suas Aplicações: Fundamentos**. 6 ed., v. 1. Rio de Janeiro: LTC Editora, 1996. 233 p.

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo - **Qualidade das águas superficiais no estado de São Paulo**, 2013. São Paulo: CETESB, 2014. Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br/agua/aguas-superficiais/35-publicacoes/-relatorios>, Acesso: em 20/06/2018.

COOPER, P.; GRIFFIN, P.; HUMPHRIES, S.; POUND, A. Design of a hybrid reed bed system to achieve complete nitrification and denitrification of domestic sewage. **Water Science and Technology**. Londres, v.40, n.3, p. 283-289, 1999.

COTA, R. S.; von SPERLING, M.; PENIDO, R. C. S. Tracer studies and hydraulic behaviour of planted and un-planted vertical-flow constructed wetlands. **Water Science and Technology**, Oxford, v.64, n.5, 2011.

CUNHA, D. O.; MERLI, R. L.; JUNIOR, E. S. O Uso do Tratamento de Esgoto Sustentável: O Estado da Arte das Wetlands. **Revista de Administração e Negócios da Amazônia**, Porto Velho, V.10, n.2, mai/ago, 2018.

DE PAOLI, A.C. *Análise de desempenho e comportamento de wetlands horizontais de fluxo subsuperficial baseado em modelos hidráulicos e cinéticos*. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) -Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

DE PAOLI, A.C; SPERLING, M.V. Avaliação das condições hidrodinâmicas de Wetlands construídos de escoamento horizontal e subsuperficial. **Revista eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais**, 2013, v.1. n.2, p.213-222.

DIERBERG, F.E.; DeBUSK, T. A. An evaluation of two tracers in surface-flow wetlands: rhodamine-WT and lithium. **Wetlands**, Lawrence, v.25, n.1, p.8-25, 2005.

DUARTE, SUSANA. **Estudo das Potencialidades das Zonas Húmidas Artificiais no Tratamento de Efluentes Aquícolas**. 2002. Monografia de final de Curso (Licenciatura em Engenharia do Ambiente) -Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2002.

DORNELAS, F. L., **Avaliação Do Desempenho De Wetlands Horizontais Subsuperficiais Como Pós-tratamento De Efluentes De Reatores Uasb**. Dissertação (Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – UFMG, 2008.

EDISON, Carlos. **Como calcular um CSTR isotérmico na munheca**. 2011. Disponível em: <<http://carlosedison.blogspot.com/2011/04/como-calculer-um-cstr-isotermico-na.html>>. Acesso em: 25 nov. 2018.

FARIA, M. A. de. **Irrigação por gotejamento e microaspersão**. Monografia de final de curso (Especialização a distância: Sistemas pressurizados de irrigação)- Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2000.

GALVÃO, A.; MATOS, J. S. A contribuição da evapotranspiração no tratamento de águas residuais através de leitos de macrófitas. **Revista Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v 33, pág 53-58, 2012.

GIRALDO, D.; VITTURI, M. de M.; ZAMARELLA, M.; MARION, S.; IANNELLI, R. Hydrodynamics of vertical subsurface flow constructed wetlands: tracer tests with rhodamine WT and numerical modeling. **Ecological Engineering**. V35, p 265-273, 2009.

HAWES, M. C.; BRIGHAM, L. A. Impact of root border cells on microbial populations in the rhizosphere. **Advances in Plant Pathology**, London, v. 8, n. 6, p. 119-148, Dec. 1992.

HEADLEY, TR., KADLEC, R. H. Conducting hydraulic tracer studies of constructed wetlands: a practical guide. **Ecohydrology & Hydrobiology**, v.7, n. 3-4, p. 269-282, 2007.

HODGSON, C.J.; PERKINS, J.; LABADZ, J.C. The use of microbial tracers to monitor seasonal variations in effluent retention in a constructed wetland. **Water Research**, Oxford, v.38, n.18, p.3.833-3.844, 2004.

HOFFMANN, H. ; PLATZER, C.; WINKER, M. ; MUENCH, E. V.. Technology review of constructed wetlands: Subsurface flow constructed wetlands for greywater and domestic wastewater treatment. **Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ)**, Eschborn, Germany, 2011.

HUA, G. F.; ZHAO, Z. W.; KONG, J.; GUO, R.; ZENG, Y. T.; ZHAO, L. F.; ZHU, Q. D. Effects of plant roots on the hydraulic performance during the clogging process in mesocosm vertical flow constructed wetlands. **Environmental Science Pollution Research International**, Heidelberg, v.21, n.22, p.13017-13026, 2014.

INSTITUTO TRATA BRASIL- Instituto Trata Brasil (Org.). **Situação Saneamento no Brasil: Tratamento Esgoto 2017**. Disponível em: <<http://m.tratabrasil.org.br/saneamento-no-brasil>>. Acesso em: 20 jun. 2018.

JOHANSSON, L.; GUSTAFSSON, J.P. Phosphate removal using blast furnace slags and opoka – mechanisms. **Water Res.**, v.34, p. 259–265, 2000.

KADLEC, R. H.; WALLACE, S. D. **Treatment Wetlands**, 2nd ed.; CRC Press: Boca Raton, FL, 2009.

KATO, M. T.; ANDRADE NETO, C. O. de; CHERNICHARO, C. A. de L.; FORESTI, E.; CYBIS, L. F. Configurações de Reatores Anaeróbios. In: CAMPOS, J. R. (Coord.). Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo.1. ed.Rio de Janeiro: **ABES**, 2014. cap. 3, p. 53-99.

KLETECKE, R. M. **Remoção/exportação de nutrientes de esgoto doméstico utilizado por plantas ornamentais: *Hedychium coronarium*, *Heliconia psittacorum*, *Cyperus alternifolius* e**

Colocasia esculenta. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2011.

KNOWLES, P.R.; DOTRO, G.; NIVALA, J.; GARCÍA, J. Clogging in subsurface-flow treatment wetlands: occurrence and contributing factors. **Ecological Engineering**, n. 37, p. 99-112, 2011.

KNOWLES, P.R.; GRIFFIN, P.; DAVIES, P.A. Complementary methods to investigate the development of clogging within a horizontal subsurface flow tertiary treatment wetland. **Water Research**, v. 44, n. 1, p. 320-330, 2010.

LAUTENSCHLAGER, S.R. **Modelagem do desempenho de Wetlands construídas**. São Paulo. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

LEITÃO, T. E.; BARBOSA, A. E.; IKÄVALKO V.M.; MENEZES, J. T. M., ZAKHAROVA, T. V. **Avaliação e Gestão Ambiental das Águas de Escorrência de Estrada**. 2º Relatório, Relatório 205/02 – GIAS/DH, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 2002, 71p.

LEVENSPIEL, O. **Engenharia das Reações Químicas**. 3. ed. São Paulo: Editora Blücher, 2000.

LIMA, R. F. S.; **Potencialidades dos wetlands construídos empregados no pós-tratamento de esgotos: experiências brasileiras**. Florianópolis. Dissertação (Mestrado Profissional Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Florianópolis, 2016.

LOHMANN, G. **Caracterização de uma estação de tratamento de esgoto por zona de raízes utilizando variáveis abióticas e microbiológicas**. 2011. 93f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2011.

MATOS, M. P.; SPERLING, M. V.; MATOS, A. T.; PASSOS, R. G. Uso De Traçador Salino Para Avaliação Da Colmatação E Das Condições Hidrodinâmicas Em Sistemas Alagados Construídos De Escoamento Horizontal Subsuperficial. **Revista Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v 35, n.6, p. 1137-1148, nov. 2015.

MATTOS, T.T; LUCRÉCIO, V.N. **“Avaliação do Comportamento Hidrodinâmico de um Wetland Construído de Fluxo Horizontal”**. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Ambiental) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2012.

MAZZOLA, M.; ROSTON, D. M.; VALENTIM M. A. A. Uso de leitos cultivados de fluxo vertical por batelada no pós-tratamento de efluente de reator anaeróbio compartimentado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.9, n.2, p.276-283, 2005.

MELLO, D de. **Avaliação do uso de wetlands construídas no tratamento de esgoto sanitário** 2016. 164f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental (PPGCTA)) -, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

MENDONÇA, A. J. A. **Avaliação de um sistema descentralizado de tratamento de esgotos domésticos em escala real composto por tanque séptico e wetland construída híbrida**.

2015. 209 p. Dissertação (Mestrado em Saúde Pública) - Faculdade de Saúde Pública, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

METCALF; EDDY. **Wastewater engineering: treatment and reuse**. 4. ed. New York: Mc Graw Hill, 2003. 1848 p.

MICHAEL JR, J.H. Nutrients in salmon hatchery wastewater and its removal through the use of a wetland constructed to treat off-line settling pond effluent. **Aquaculture**, v.226, pp. 213-225, 2003.

MOURA, C.J.C. **Avaliação do efeito da evapotranspiração no rendimento de um leito de macrófitas de escoamento subsuperficial horizontal**. Dissertação- (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade da Beira Interior. Covilhã, 2013.

MORILLA, Felipe Coelho. **Resolução de Problema de Valor no Contorno Associado ao Projeto de Reatores de Fluxo Disperso Empregados no Tratamento de Efluentes**. 2011. 36 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Física) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2011.

NASCIMENTO, R.A. **Desempenho de reator anaeróbio de manta de lodo utilizando efluente líquidos de indústrias alimentícias**.1996, 112p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) -Universidade Estadual de Campinas, 1996.

NIVALA, J.; KNOWLES, P.; DOTRO, G.; GARCÍA, J.; WALLACE, S. Clogging in subsurface-flow treatment wetlands: measurement, modeling and management. **Water Research**, n. 46, p. 1625-1640, 2012.

OLIVEIRA, L. A. **O Sistema Aquífero Bauru na Região de Araguari/MG: parâmetros dimensionais e propostas de gestão**. Dissertação (Mestrado em Geologia). Universidade de Brasília. Instituto de Geociências. Brasília, 2002. 121 p.

OSWALD, W. J. “**Productivity of algae in sewage disposal**”. *Solar Energy*, 15(1), 107-117, 1973.

PAOLI, A. C. **Análise de desempenho e comportamento de wetlands horizontais de fluxo subsuperficial baseado em modelos hidráulicos e cinéticos**. 2010. 148p. Dissertação (Pós graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos – Universidade Federal de Minas Gerais, 2010.

PAOLI, A. C.; VON SPERLING, M. Evaluation of clogging in planted and unplanted horizontal subsurface flow constructed wetlands: solids accumulation and hydraulic conductivity reduction. **Water Science & Technology**, Oxford, v.67, n.6, p. 1345-1352, 2013.

PAOLI, A.C.; VON SPERLING, M. Avaliação das condições hidrodinâmicas de wetlands construídos de escoamento horizontal subsuperficial (Unidades plantada e não plantada). **Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais (GESTA)**, v. 1, n. 2, p. 19. 2010.

PASSOS, R.G. **Estudos e modelagem do comportamento hidrodinâmico de lagoas de polimento**. Tese (Doutorado em Saneamento Meio Ambiente e Recursos Hídricos). Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.

PEDESCOLL, A.; CORZO, A.; ÁLVAREZ, E.; GARCÍA, J.; PUIGAGUT, J. The effect of primary treatment and flow regime on clogging development in horizontal subsurface flow constructed wetlands: An experimental evaluation. **Water Research**, Amsterdam, v.45, p.3579- 3589, 2011.

PERSSON, J., SOMES, N. L. G., WONG, T. H. F. Hydraulics efficiency of constructed wetlands and ponds. **Water Science and Technology**, Oxford, v.40, n.3, p.291–300, 1999.

POÇAS, Critiane Dias. **Utilização da tecnologia de Wetlands para tratamento terciário: Controle de nutrientes**. 2015. 109 p. Dissertação (Pós-Graduação em Ambiente, Saúde e Sustentabilidade) - Faculdade de Saúde Pública, Universidade de São Paulo, SP, 2015.

PROSAB – Programa de Pesquisa em Saneamento Básico. **Nutrientes de esgoto sanitário: utilização e remoção**. Rio de Janeiro, 2009.

REED S.C.; CRITES R.W.; MIDDLEBROOKS E.J. **Natural systems for waste management and treatment**. 2ed. United States of America: McGraw-Hill, 1995.

RIBEIRO, João Paulo Lopes. **Modelação do Comportamento Hidráulico de Leitões de Macrófitas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Ambiente). Instituto Superior Técnico – Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2007.

RUBIM, Cristiane. **Tratamento de efluentes com Wetlands e jardins filtrantes construídos artificialmente**: Rubim. UFRJ. 2016.

SALATI, E. **Controle de qualidade de águas através de sistemas de wetlands construídos**. Rio de Janeiro: FBDS. 1998.

SALATI, E.; FILHO, E. S.; SALATI, E.F. **Utilização de sistemas de Wetlands construídas para tratamento de águas**. 23 f. Piracicaba, 2009.

SAMAE. Serviço Autônomo de Água e Esgoto - Caixas do Sul. **Apostila ajustador de hidômetros: Hidrômetros Volumétricos**. 2017. Disponível em: <<http://www.samaecaxias.com.br>>. Acesso em: 24 nov. 2018.

SANDRI, D.; MATSURA, E.E.; TESTEZLAF, R. Teor de nutrientes na alface irrigada com água residuária aplicada por sistemas de irrigação. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.26, n.1, p.45-57, 2006.

SANTOS, R. J. A. **Desempenho de leitões de macrófitas para o tratamento de efluentes**. 2016. 92 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2016.

SCARATTI, D.; Bolzon, A. L.; Ungericht, J.C.; Scaratti, G. Influência das condições hidroclimáticas no tratamento de esgoto sanitário por lagoas de estabilização de esgoto. **Evidência - Ciência e Biotecnologia**, [S.l.], v. 14, n. 2, p. 139-154, nov. 2014.

SEZERINO, Paulo H. **Potencialidade dos filtros plantados com macrófitas (constructed Wetland) no pós-tratamento de lagoas de estabilização sob condições de clima tropical**.

Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) -Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

SECCHI, J.; Konrad, F.O.; TONETTO, J. Avaliação do balanço hídrico e da eficiência de um alagado construído como alternativa de tratamento para efluente doméstico. **Ciência e Natura**, 2016.

SIQUEIRA, R. N. **Desenvolvimento e aperfeiçoamento de critérios de avaliação da eficiência hidráulica e do cálculo do coeficiente de mistura em unidade de tratamento de água e efluentes**. 1998. 126 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 1998.

SOUSA, J. T.; HAANDEL, A.C.; GUIMARÃES, A.V.A. Post-treatment of anaerobic effluents in constructed wetland systems. **Water Science and Technology**, v.44, n.4, p. 213-219, 2001.

SOUSA, José Tavares de et al. Utilização de wetland construído no pós-tratamento de esgotos domésticos pré-tratados em reator UASB. **Eng. Sanit. Ambient.** Rio de Janeiro , v. 9, n. 4, p. 285-290, Dec. 2004.

SPERLING, M. V. **Características da Qualidade do Esgoto: Parâmetros de Qualidade**. 4. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2014. cap. 2, p. 83. v. v.1.

SPERLING, M. V. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: Princípios básicos do tratamento de esgoto**. 2009. ed. Belo Horizonte: UFMG, 1996. 211 p. V 2.

STIEGEMEIER, Ana Mara. **Avaliação do sistema de Wetland construído no polimento do efluente da indústria frigorífica de aves**, 2014. Monografia (Curso de Engenharia Ambiental) – Centro Universitário UNIVATES, Lajeado, 2014.

TANNER, C. C. Plants for constructed wetland treatment systems – A comparison of the growth and nutrient uptake of eight emergent species. **Ecological Engineering**. v 7: 59-83. 1996.

TANNER, C.C. NUKIAS, J.P.S; UPSDELL, M.P. Substratum phosphorus accumulation during maturation of gravel-bed constructed. **Water Science and Technology**, v. 40, n.3, 147-154, 1999.

TEIXEIRA, E.C. Importância da Hidrodinâmica de Reatores na Otimização de Processos de Desinfecção de Águas de Abastecimento: Uma análise crítica. In: **18º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL**. Rio de Janeiro: ABES, 1995.

THACKSTON, E.L.; SHIELDS, F.D.; SCHOROEDER, P.R. Residence time distributions of shallow basins. **Journal of Environmental Engineering**, v. 113, n. 2, p. 219-223, 1987.

TOSCANI, Daniel Cruz. **Avaliação e Aplicação de Simulações Matemáticas para Definição de Regime Hidráulico e Constantes Cinéticas de Remoção de Matéria Orgânica em Reatores de Tratamento de Esgoto Sanitário**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental). Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2010.

USEPA – Unites States Enviromental Protection Agency. **Constructed wetlands treatment of municipal wastewater**. Environmental Agency Protection. 2000.

VILELA, Adriano Dutra. **Macrófitas do sistema de tratamento de efluentes sanitários do Complexo Portuário de Tubarão e seu potencial como fonte de nutrientes**. 2016. 95 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Ambientais) - Instituto Tecnológico Vale, Maranhão, 2016.

VYMAZAL, J.; KRÖPFELOVÁ, L. **Wastewater Treatment in Constructed Wetlands with Horizontal Sub-Surface Flow**; Springer: Dordrecht, 2008.

WALLACE, S. E KNIGHT, R., Small-Scale Constructed Wetland Treatment Systems:Feasibility, Design Criteria and O&M Requirements. **Water Environment Research Foundation e IWA Publishing**, London, United Kingdom, 2006.

WEBER, Conrado Folle. **Proposta de dimensionamento e implantação de wetlands construídos em sistema individual de tratamento de esgoto sanitário**. 2015. 70 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso Superior de Tecnologia em Processos Ambientais) -. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2014.

WENTZ, W. A. Ecological/environmental perspectives on the use of wetlands in water treatment. In Aquatic Plants for Water Treatment and Resource Recovery; Reddy, K. R., Smith, W. H., Eds.; **Magnolia Publishing**: Orlando, FL, 1987.

ZANELLA, Luciano. Plantas ornamentais no pós-tratamento de efluentes sanitários: **Wetlands-Construídos utilizando brita e bambu como suporte**, 2008. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

ZINATO M. C.; GUIMARÃES T. M., Márcia. Estudo sobre a utilização de “wetlands” construídas para tratamento de águas residuárias no brasil, In: **Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental**, VIII, 2017, Campo Grande/MS.Anais... Campo Grande MS: IBEAS – Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais, 2017. p. 1-9.