

**“UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

LUÍZA GERVÁZIO CHAVES

**DESEMPENHO DE UM DECANTADOR DE LEITO MÓVEL NA REMOÇÃO DE
SÓLIDOS FINOS DE ÁGUA SINTÉTICA**

Ilha Solteira
2023

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

LUÍZA GERVÁZIO CHAVES

**DESEMPENHO DE UM DECANTADOR DE LEITO MÓVEL NA
REMOÇÃO DE SÓLIDOS FINOS DE ÁGUA SINTÉTICA**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de Conhecimento: Recursos Hídricos e Tecnologias Ambientais.

Prof. Dr. Tsunao Matsumoto
Orientador

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

C512d Chaves, Luíza Gervázio.
Desempenho de um decantador de leito móvel na remoção de sólidos finos de água sintética / Luíza Gervázio Chaves. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2023
157 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Recursos Hídricos e Tecnologias Ambientais, 2023

Orientador: Tsunao Matsumoto
Inclui bibliografia

1. Decantação. 2. Meio suporte. 3. Partículas finas. 4. Sólidos totais. 5. Turbidez.

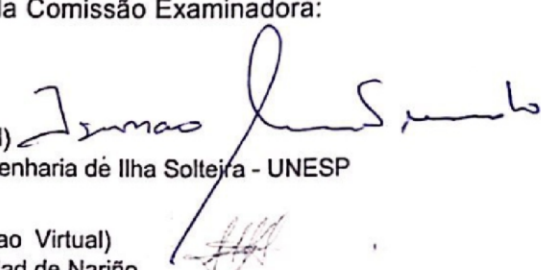
CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: DESEMPENHO DE UM DECANTADOR DE LEITO MÓVEL NA REMOÇÃO DE SÓLIDOS FINOS DE ÁGUA SINTÉTICA

AUTORA: LUIZA GERVAZIO CHAVES

ORIENTADOR: TSUNAO MATSUMOTO

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em Engenharia Civil, área: Recursos Hídricos e Tecnologias Ambientais pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. TSUNAO MATSUMOTO (Participação Virtual) 
Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

Prof. Dr. IVÁN ANDRÉS SÁNCHEZ ORTIZ (Participação Virtual) 
Departamento de Recursos Hidrobiológicos / Universidad de Nariño

Prof. Dr. JOÃO PAULO BASSIN (Participação Virtual) 
Programa de Engenharia Química - COPPE / Universidade Federal do Rio de Janeiro

Ilha Solteira, 24 de fevereiro de 2023

*Dedico esse trabalho aos
incentivadores das realizações
dos meus sonhos, meus pais
Aloísio e Cátia.*

AGRADECIMENTOS

Inicialmente gostaria de agradecer a Deus por me proporcionar perseverança durante toda a minha vida.

Um agradecimento especial aos meus pais Aloisio e Cátia pelo apoio e incentivo que serviram de alicerce para as minhas realizações. Também, aos meus irmãos Lucas e Davi pelo cuidado e apoio.

Sou grata também ao meu professor orientador Prof. Dr. Tsunao Matsumoto, pelo incentivo, confiança, amizade e valiosas contribuições dadas durante todo o processo.

Ao Guilherme Amorim pelo companheirismo, amizade e apoio incondicional. Por compreender e incentivar minha dedicação a essa pesquisa.

As minhas amigas Anielle, Gisele, Gabriela, Beatriz, Ana Beatriz, Geovana e Basia que dividiram além de moradia, companheirismo e amizade, tornando essa jornada mais fácil.

Ao Jefferson Cássio pela amizade, auxílio na pesquisa e no desenvolvimento do aparato experimental.

Aos amigos Bruna, Luana, Clara, Maria Isabel, Gabriela, Tais e Mateus, que mesmo distantes se preocuparam e torceram para o meu sucesso.

Um agradecimento especial a Andressa, Letícia, Marcos e Rossi pela amizade e auxílio no laboratório.

Gostaria de agradecer ao Matheus Vianna pela amizade, apoio incondicional e incentivo crucial para que essa jornada fosse iniciada. Aos meus amigos da pós-graduação pela amizade e por compartilhar os inúmeros desafios e descobertas.

Gostaria de agradecer aos técnicos do laboratório Natália e Gilberto (Departamento de Física e Química) pelo auxílio na execução desse projeto. Agradecer também ao Sr. Vicente e Sr. Augusto pela execução dos serviços de tornearia.

A todos os meus professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual “Júlio de Mesquita Filho”, especialmente aos Professores Dr. César Gustavo e Dr. ^a Liliane pelos ensinamentos durante o estágio docência.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

RESUMO

A entrada de diversos poluentes nos corpos d'água têm gerado cada vez mais debates acerca da otimização de processos de tratamentos de água. A dificuldade do tratamento é avaliada pelos poluentes presentes na água bruta ou no esgoto, sendo premissa na definição do sistema a ser adotado, que tenha melhor custo-benefício e que assegure a qualidade final da água tratada. Um dos principais problemas nas estações de tratamento de esgoto (ETE) são a entrada de partículas finas de areia e argila que adentram nas etapas subsequentes do tratamento, e frequentemente causam prejuízos ao processo. Dessa forma, essa pesquisa buscou avaliar a utilização de meio suporte variável em um decantador de fluxo ascendente para remoção destas partículas finas. O aparato experimental consistiu em um tanque de agitação de 2.000 L com um agitador de 184 W, um medidor de vazão tipo rotâmetro, uma bomba submersível de 368 W, sistema de tubulações da entrada, decantador com meio suporte variável e um reservatório de 2.000 L para coleta da água tratada. Na pesquisa foram utilizados dois tipos de água sintética com concentrações médias de sólidos totais (ST) de 276 mg/L e turbidez média de 13 NTU para água sintética do tipo I e concentração média de ST de 394 mg/L e turbidez média de 194 NTU para água sintética do tipo II. O decantador foi operado com cinco configurações de empacotamento de meio suporte: sem meio suporte, empacotamentos do leito, de 25%, 50% e 75% como leito móvel e 100% como leito fixo. Os parâmetros utilizados para avaliar o efeito da altura de empacotamento do meio suporte na remoção de partículas finas foram turbidez e ST. Os resultados de eficiência média de remoção da turbidez dos ensaios com a água sintética do tipo I foram de: 2,2% sem meio suporte, 24,3% no leito com 25% de empacotamento, com empacotamento de 50%, 75% e 100% do leito foram observadas eficiências médias de 19,3%, 15,6% e 27,1%, respectivamente. A eficiência média de remoção de turbidez da água sintética do tipo II para o leito sem meio suporte e com empacotamento do leito de 25%, 50%, 75% e 100% foram de 31,7%, 41,3%, 41,1%, 39,9% e 36,8%, respectivamente. Por outro lado, a eficiência média de remoção de ST da água sintética do tipo I apresentou 21,2% sem meio suporte, com empacotamento de 25%, 50%, 75% e 100% mostraram valores de 14,7%, 21,5%, 24,2% e 12,9%, respectivamente. Ademais, as amostras de sólidos totais da água sintética do tipo II apresentaram eficiência média de remoção ao longo dos ensaios foram: no leito sem meio suporte de 28,8%, enquanto que eficiências de 36,6%, 62,9%, 46,9% e 40,2% foram obtidas nos leitos com 25%, 50%, 75% e 100% de empacotamento, respectivamente. O decantador ensaiado apresentou remoção de ST e turbidez em todas as configurações de empacotamento do leito testados, sendo o melhor desempenho obtido em 50% de empacotamento.

Palavras-chave: meio suporte; partículas finas; sólidos totais; turbidez; decantador de leito móvel.

ABSTRACT

Input of various pollutants into water bodies has generated more and more debates about the optimization of treatment processes. The difficulty of the treatment is evaluated by the pollutants present in the raw water or sewage, being a premise in the definition of the system that has the best cost-benefit ratio and that ensures the final quality of the treated water. One of the main problems in sewage treatment plants is input of fine particles of sand and clay that pass to the subsequent stages of treatment, frequently cause damage to the process devices and efficiency. Thus, this research sought to evaluate the use of a variable support media in an up-flow settler to remove these fine particles. The experimental apparatus system consisted of a 2,000 L reservoir as agitation tank included a 184 W agitator, rotameter-type flow meter, and a 368 W submersible pump, inlet piping manifold, the moving bed settler with variable support media and sampling ports, in addition to a 2,000 L reservoir for storage treated water. In this research, tests were performed with two types of synthetic water with average concentrations of total solids (TS) of 276 mg/L and average turbidity of 13 NTU for type I synthetic water and average TS concentration of 394 mg/L and average turbidity of 194 NTU in synthetic water type II. The moving bed settler was operated with five packaging configurations: without media, and in different bed packaging, being 25%, 50% and 75% as a moving bed and 100% configured as a fixed bed. The parameters used to evaluate the effect of the packaging height of the support media on to removal of fine particles were turbidity and TS. The average turbidity removal efficiency results of the tests with type I synthetic water were 2.2% for without support media, for bed with packaging, with 25%, 50%, 75 % and 100% the average efficiencies were observed of 24.3%, 19.3%, 15.6% and 27.1%, respectively. The average efficiency of turbidity removal for type II synthetic water tests: without support media and bed packaging at 25%, 50%, 75% and 100% were observed of 31.7%, 41.3%, 41.1 %, 39.9% and 36.8%, respectively. On the other hand, the average of total solids removal efficiency for type I synthetic water was 21.2% without media, while bed packaging of 25%, 50%, 75% and 100% showed efficiencies of 14.7%, 21.5%, 24.2% and 12.9%, respectively. In addition, the samples of total solids for the type II synthetic water showed average removal efficiency were to the bed without media was 28.8%, while the efficiency of 36.6%, 62.9%, 46.9% and 40.2% were obtained with 25%, 50%, 75% and 100% bed packaging, respectively. The moving bed settler showed removal of TS and turbidity in all packaging configurations tested, getting the best performance obtained at 50% packaging.

Keywords: support media; fine particles; total solids; turbidity; moving bed settler.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa indicador de seca de água subterrânea a partir de dados do satélite GRACE-FO no mesmo período nos anos de 2004 e 2022	28
Figura 2 - Classificação e distribuição de constituintes de água e águas residuárias em função do tamanho das partículas	30
Figura 3 - Forças atuantes numa partícula sólida durante a sedimentação.....	37
Figura 4 - Corte longitudinal de um decantador retangular	40
Figura 5 - Corte transversal de um decantador circular	41
Figura 6 - Princípio de funcionamento de um decantador de alta taxa	42
Figura 7 - Mecanismos de filtração	43
Figura 8 - Esquema de reatores utilizados no tratamento de efluentes	44
Figura 9 - Configuração de reatores MBBR em sistema aeróbico e sistema anaeróbio.....	49
Figura 10 - Fluxograma das etapas da execução do trabalho.	51
Figura 11 - Ensaio para determinação da granulometria do solo.	53
Figura 12 – Esquema geral do aparato e procedimento experimental.....	55
Figura 13 - Meio suporte fluidizável	56
Figura 14 - Detalhes do aparato experimental	57
Figura 15 - Tanque de homogeneização utilizado para manutenção das partículas finas em suspensão.	58
Figura 16 - Pontos amostrais dos ensaios realizados.	61
Figura 17 - Gráfico tipo boxplot das concentrações de sólidos totais da Bacia do Peixe	65
Figura 18 - Gráfico tipo boxplot das concentrações de turbidez da Bacia do Peixe.....	66
Figura 19 - Média das concentrações de ST e Turbidez da Bacia do Peixe.....	66
Figura 20 - Granulometria do solo utilizado na preparação da água sintética tipo I e tipo II	67

Figura 21 - Valores de turbidez em cada ponto do aparato sem meio suporte para as amostras de água sintética tipo I	71
Figura 22 - Valores de turbidez em cada ponto do aparato com enchimento 25% de meio suporte para as amostras de água sintética tipo I.....	73
Figura 23 - Valores de turbidez em cada ponto do aparato com enchimento 50% de meio suporte para as amostras de água sintética tipo I	76
Figura 24 - Valores de turbidez em cada ponto do aparato com enchimento 75% de meio suporte para as amostras de água sintética tipo I.....	79
Figura 25 - Valores de turbidez em cada ponto do aparato com enchimento 100% de meio suporte para as amostras de água sintética tipo I.....	82
Figura 26 –Valores de turbidez em cada ponto do aparato sem meio suporte para as amostras de água sintética tipo II.	85
Figura 27 - Valores de turbidez em cada ponto do aparato com enchimento de leite 25% para as amostras de água sintética tipo II.....	88
Figura 28 -Valores de turbidez em cada ponto do aparato com enchimento de leite 50% para as amostras de água sintética tipo II.....	90
Figura 29 - Valores de turbidez em cada ponto do aparato com enchimento de leite 75% para as amostras de água sintética tipo II.....	93
Figura 30 - Valores de turbidez em cada ponto do aparato com enchimento de leite 100% para as amostras de água sintética tipo II.....	96
Figura 31 - Valores de sólidos totais em cada ponto do aparato sem meio suporte para as amostras de água sintética tipo I.....	100
Figura 32 - Valores de sólidos totais em cada ponto do aparato com enchimento em 25% de meio suporte para as amostras de água sintética tipo I.....	102
Figura 33 - Valores de sólidos totais em cada ponto do aparato com enchimento em 50% de meio suporte para as amostras de água sintética tipo I.....	105
Figura 34 - Valores de sólidos totais em cada ponto do aparato com enchimento em 75% de meio suporte para as amostras de água sintética tipo I.....	108
Figura 35 - Valores de sólidos totais em cada ponto do aparato com enchimento em 100% de meio suporte para as amostras de água sintética tipo I.....	110
Figura 36 - Valores de sólidos totais em cada ponto do aparato sem meio suporte para as amostras de água sintética tipo II.	113

Figura 37 - Valores de sólidos totais em cada ponto do aparato com enchimento de leite 25% para as amostras de água sintética tipo II.....	116
Figura 38 - Valores de sólidos totais em cada ponto do aparato com enchimento de leite 50% para as amostras de água sintética tipo II.....	119
Figura 39 - Valores de sólidos totais em cada ponto do aparato com enchimento de leite 75% para as amostras de água sintética tipo II.....	122
Figura 40 - Valores de sólidos totais em cada ponto do aparato com enchimento de leite 100% para as amostras de água sintética tipo II.....	125
Figura 41 - Eficiência de remoção de turbidez da água sintética tipo I no leite sem meio suporte.....	126
Figura 42 - Eficiência de remoção de turbidez da água sintética tipo I no leite com enchimento de 25% de meio suporte	127
Figura 43 - Eficiência de remoção de turbidez da água sintética tipo I no leite com enchimento de 50% de meio suporte	128
Figura 44 - Eficiência de remoção de turbidez da água sintética tipo I no leite com enchimento de 75% de meio suporte	128
Figura 45 - Eficiência de remoção de turbidez da água sintética tipo I no leite com enchimento de 100% de meio suporte	129
Figura 46 - Eficiência de remoção de turbidez entre diferentes enchimentos de leite da água sintética tipo I	130
Figura 47 - Eficiência de remoção de turbidez da água sintética tipo II no leite sem meio suporte.....	131
Figura 48 - Eficiência de remoção de turbidez da água sintética tipo II no leite com enchimento de 25 % de meio suporte	132
Figura 49 - Eficiência de remoção de turbidez da água sintética tipo II no leite com enchimento de 50 % de meio suporte	132
Figura 50 - Eficiência de remoção de turbidez da água sintética tipo II no leite com enchimento de 75 % de meio suporte	133
Figura 51 - Eficiência de remoção de turbidez da água sintética tipo II no leite com enchimento de 100 % de meio suporte	134
Figura 52 - Eficiência de remoção de turbidez entre diferentes enchimentos de leite da água sintética tipo II.....	135

Figura 53 - Eficiência de remoção de sólidos totais da água sintética tipo I no leito sem enchimento	137
Figura 54 - Eficiência de remoção de sólidos totais da água sintética tipo I no leito com enchimento de 25% de meio suporte	138
Figura 55 - Eficiência de remoção de sólidos totais da água sintética tipo I no leito com enchimento de 50% de meio suporte	138
Figura 56 - Eficiência de remoção de sólidos totais da água sintética tipo I no leito com enchimento de 75% de meio suporte	139
Figura 57 - Eficiência de remoção de sólidos totais da água sintética tipo I no leito com enchimento de 100% de meio suporte	140
Figura 58 - Eficiência de remoção de sólidos totais da água sintética tipo I com diferentes alturas de enchimento do leito	141
Figura 59 - Eficiência de remoção de sólidos totais da água sintética tipo II no leito sem meio suporte	142
Figura 60 - Eficiência de remoção de sólidos totais da água sintética tipo II no leito com 25 % de enchimento de meio suporte	143
Figura 61 - Eficiência de remoção de sólidos totais da água sintética tipo II no leito com 50 % de enchimento de meio suporte	143
Figura 62 - Eficiência de remoção de sólidos totais da água sintética tipo II no leito com 75 % de enchimento de meio suporte	144
Figura 63 - Eficiência de remoção de sólidos totais no leito da água sintética tipo II com 100 % de enchimento de meio suporte	145
Figura 64 - Eficiência de remoção de sólidos totais da água sintética tipo II entre diferentes enchimentos de leito	146

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Características físicas, químicas e biológicas de efluentes e suas respectivas fontes.....	31
Tabela 2- Relação e diferenças entre as partículas de areia limpa e partículas recobertos com elementos tensoativos.....	34
Tabela 3 - Características e velocidades mínimas de fluidização de diferentes tipos de materiais carreadores	47
Tabela 4 - Configurações de alguns meios suportes utilizados em sistemas MBBR	50
Tabela 5- Suscetibilidade à erosão no Estado de São Paulo (em % de área de UGRHI)	52
Tabela 6 – Composição típica de esgoto doméstico bruto	54
Tabela 7 – Composição da água sintética utilizada no experimento	54
Tabela 8 - Características do meio suporte utilizado.....	56
Tabela 9- Relações geométricas para dimensionamento de agitadores.....	60
Tabela 10 - Frequência e pontos analisados para a determinação da remoção das partículas finas pelo aparato experimental	62
Tabela 11 - Síntese do método, materiais e equipamentos utilizados nas análises laboratoriais	63
Tabela 12- Estatística descritiva das concentrações de sólidos totais da Bacia do Peixe	64
Tabela 13 - Estatística descritiva das concentrações de turbidez da Bacia do Peixe	65
Tabela 14 - Umidade higroscópica do solo	67
Tabela 15 - Estatística descritiva e teste de normalidade da turbidez das amostras de água sintética tipo I coletadas no aparato sem a inserção de meio suporte.	69
Tabela 16 - Resultados dos testes estatísticos de análise de variância das amostras de turbidez coletadas com leito sem de enchimento de meio suporte.....	69
Tabela 17 - Estatística descritiva e teste de normalidade da turbidez das amostras de água sintética tipo I coletadas no aparato com enchimento de 25% de meio suporte.....	72

Tabela 18 - Resultados dos testes estatísticos de análise de variância das amostras de turbidez coletadas com leite com enchimento de 25% de meio suporte	74
Tabela 19 - Estatística descritiva e teste de normalidade da turbidez das amostras de água sintética tipo I coletadas no aparato com enchimento de 50% de meio suporte.....	75
Tabela 20 - Resultados dos testes estatísticos de análise de variância das amostras de turbidez coletadas com leite com enchimento de 50% de meio suporte	77
Tabela 21 - Estatística descritiva e teste de normalidade da turbidez das amostras de água sintética tipo I coletadas no aparato com enchimento de 75% de meio suporte.....	78
Tabela 22 - Resultados dos testes estatísticos de análise de variância das amostras de turbidez coletadas com leite com enchimento de 75% de meio suporte	80
Tabela 23 - Estatística descritiva e teste de normalidade da turbidez das amostras de água sintética tipo I coletadas no aparato com enchimento de 100% de meio suporte.....	81
Tabela 24 - Resultados dos testes estatísticos de análise de variância das amostras de turbidez da água sintética tipo I coletadas com leite com enchimento de 100% de meio suporte	81
Tabela 25 - Estatística descritiva e teste de normalidade da turbidez das amostras de água sintética tipo II coletadas no aparato sem inserção de meio suporte.....	84
Tabela 26 - Resultados dos testes estatísticos de análise de variância das amostras de turbidez da água sintética tipo II coletadas com leite sem enchimento de meio suporte.....	84
Tabela 27 - Estatística descritiva e teste de normalidade da turbidez das amostras de água sintética tipo II coletadas no aparato com enchimento de leite 25% de meio suporte.....	87
Tabela 28 - Resultados dos testes estatísticos de análise de variância das amostras de turbidez da água sintética tipo II coletadas com enchimento de leite em 25% de meio suporte	87
Tabela 29 -Estatística descritiva e teste de normalidade da turbidez das amostras de água sintética tipo II coletadas no aparato com enchimento de leite 50% de meio suporte.....	89
Tabela 30 - Resultados dos testes estatísticos de análise de variância das amostras de turbidez da água sintética tipo II coletadas com enchimento de leite em 50% de meio suporte	91

Tabela 31 - Estatística descritiva e teste de normalidade da turbidez das amostras de água sintética tipo II coletadas no aparato com enchimento de leite 75% de meio suporte.....	92
Tabela 32 - Resultados dos testes estatísticos de análise de variância das amostras de turbidez da água sintética tipo II coletadas com enchimento de leite em 75% de meio suporte	94
Tabela 33 - Estatística descritiva e teste de normalidade da turbidez das amostras de água.....	95
Tabela 34 - Resultados dos testes estatísticos de análise de variância das amostras de turbidez da água sintética tipo II coletadas com enchimento de leite em 100% de meio suporte	97
Tabela 35 - Estatística descritiva e teste de normalidade de sólidos totais das amostras de água sintética tipo I coletadas no aparato sem inserção de meio suporte.....	99
Tabela 36 - Resultados dos testes estatísticos de análise de variância das amostras de ST da água sintética tipo I coletadas com leite sem meio suporte	99
Tabela 37 - Estatística descritiva e teste de normalidade de sólidos totais das amostras de água sintética tipo I coletadas no aparato com enchimento de 25% de meio suporte.....	101
Tabela 38 - Resultados dos testes estatísticos de análise de variância das amostras de ST da água sintética tipo I coletadas com enchimento de 25% de meio suporte.....	103
Tabela 39 - Estatística descritiva e teste de normalidade de sólidos totais das amostras de água sintética tipo I coletadas no aparato com enchimento de 50% de meio suporte	104
Tabela 40 - Resultados dos testes estatísticos de análise de variância das amostras de ST da água sintética tipo I coletadas com enchimento de 50% de meio suporte.....	104
Tabela 41 - Estatística descritiva e teste de normalidade de sólidos totais das amostras de água sintética tipo I coletadas no aparato com enchimento de 75% de meio suporte	107
Tabela 42 - Resultados dos testes estatísticos de análise de variância das amostras de ST da água sintética tipo I coletadas com enchimento de 75% de meio suporte.....	107

Tabela 43 - Estatística descritiva e teste de normalidade de sólidos totais das amostras de água sintética tipo I coletadas no aparato com enchimento de 100% de meio suporte	109
Tabela 44 - Resultados dos testes estatísticos de análise de variância das amostras de ST da água sintética tipo I coletadas com enchimento de 100% de meio suporte.....	111
Tabela 45 - Estatística descritiva e teste de normalidade de sólidos totais das amostras de água sintética tipo II coletadas no aparato sem inserção de meio suporte.....	112
Tabela 46 - Resultados dos testes estatísticos de análise de variância das amostras de ST da água sintética tipo II coletadas com leite sem enchimento em meio suporte.....	114
Tabela 47 - Estatística descritiva e teste de normalidade de sólidos totais das amostras de água sintética tipo II coletadas no aparato com enchimento de leite 25% de meio suporte.....	115
Tabela 48 - Resultados dos testes estatísticos de análise de variância das amostras de ST da água sintética tipo II com o aparato com 25% de enchimento de meio suporte.....	117
Tabela 49 - Estatística descritiva e teste de normalidade de sólidos totais das amostras de água sintética tipo II coletadas no aparato com enchimento de leite 50% de meio suporte.....	118
Tabela 50 - Resultados do teste estatístico de análise de variância das amostras de água sintética tipo II de ST coletadas com o aparato com 50% de enchimento de meio suporte	118
Tabela 51 - Estatística descritiva e teste de normalidade de sólidos totais das amostras de água sintética tipo II coletadas no aparato com enchimento de leite 75% de meio suporte.....	120
Tabela 52 - Resultados do teste estatístico de análise de variância das amostras de água sintética tipo II de ST coletadas com o aparato com 75% de enchimento de meio suporte	121
Tabela 53 - Estatística descritiva e teste de normalidade de sólidos totais das amostras de água sintética tipo II coletadas no aparato com enchimento de leite 100% de meio suporte.....	123

Tabela 54 - Resultados do teste estatístico Kruskal-Wallis das amostras de água sintética tipo II de sólidos totais coletadas com o aparato com 100% de enchimento de meio suporte	124
Tabela 55 - Eficiência de remoção de turbidez com diferentes alturas de enchimento do leito da água sintética tipo I	130
Tabela 56 - Eficiência de remoção de turbidez com diferentes alturas de enchimento do leito da água sintética tipo II.....	135
Tabela 57 - Eficiência de remoção de sólidos totais da água sintética tipo I com diferentes alturas de enchimento do leito	141
Tabela 58 - Eficiência de remoção de sólidos totais da água sintética tipo II com diferentes alturas de enchimento do leito	145

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
APHA	<i>American Public Health Association</i>
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
COBRAPE	Companhia Brasileira de Projetos e Empreendimentos
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DOP	Diocetil Ftalato
ETA	Estação de Tratamento de Água
ETE	Estação de Tratamento de Esgotos
FAO	<i>Food and Agriculture Organization of the United Nations</i>
FEIS	Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira
GRACE	<i>Gravity Recovery And Climate Experiment</i>
MBBR	<i>Moving-Bed Biofilm Reactor</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NBR	Norma Brasileira
NTU	Unidade de Turbidez Nefelométrica
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
OMS	Organização Mundial da Saúde
ONU	Organização das Nações Unidas
PBT	Polibutileno Tereftalato
PNDU	Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento
PEAD	Polietilenos de Alta Densidade
PVC	Policloreto de Vinila
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento.
SS	Sólidos Suspensos
SST	Sólidos Suspensos Totais
ST	Sólidos Totais
TDH	Tempo de Detenção Hidráulica
UGRHI	Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos
UNESP	Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”
UNICEF	<i>United Nations International Children's Emergency Fund</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentual
Δp_b	Queda de pressão no leito;
A_s	Área projetada da partícula na direção do movimento (m ²)
C_d	Coeficiente de descarga dos orifícios
D_h	Diâmetro hidráulico (m)
D_o	Diâmetro do orifício (m)
d_{ps}	Diâmetro da partícula (m)
D_t	Diâmetro da turbina (m)
ε_m	Índice de vazios do leito
F'_D	Força de arrasto no sistema (N)
F_D	Força de arrasto (N)
F_E	Empuxo (N)
$f_{(\varepsilon)}$	Fator de correção
F_G	Peso da partícula (N)
g	Aceleração da gravidade (m/s ²)
G	Gradiente de velocidade (s ⁻¹)
G_m	Gradiente médio de velocidade (s ⁻¹)
L_{mf}	Comprimento do leito na condição de fluidização mínima
n	Número de rotações por segundo da hélice
N_p	Número de potência
V_m	Velocidade média do escoamento (m/s)
V_{ps}	Volume da partícula (m ³)
V_s	Velocidade de sedimentação da partícula (m/s)
ρ	Massa específica da água (102 kgf.s ² /m ⁴)
P	Potência do agitador (W)
ρ_a	Massa específica da água (kg/m ³)
ρ_f	Massa específica do fluido (kg/m ³)
ρ_s	Massa específica da partícula (kg/m ³)
pH	Potencial Hidrogeniônico
Re	Número de Reynolds
S	Espaçamento entre os eixos dos orifícios adjacentes (m)

U	Velocidade média de passagem da água no orifício (m/s)
μ	Viscosidade absoluta da água (N.s/m ²)
uT	Unidade de turbidez
US\$	Dólar americano
ν	Viscosidade cinemática da água (m ² /s)
x	Distância percorrida pelos jatos até que haja interferência entre eles (m)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	24
2	OBJETIVOS	26
2.1	Objetivo geral.....	26
2.2	Objetivos específicos	26
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	27
3.1	Panorama geral da água	27
3.2	Características típicas das águas e águas residuárias	29
3.3	Sedimentos	32
3.4	Propriedades das partículas	33
3.5	Processos de tratamentos típicos nas estações de tratamento de água e esgoto.....	35
3.6	Decantação	36
3.6.1	Decantadores.....	39
3.7	Filtração	42
3.8	Reatores de leito móvel.....	43
3.8.1	Leito fluidizável	44
3.8.2	Reator de leito móvel com biofilme (MBBR)	47
4	MATERIAIS E MÉTODOS	51
4.1	Generalidades.....	51
4.2	Qualidade das águas de bacias hidrográficas – Bacia do Peixe (UGRHI 21).....	51
4.3	Caracterização da água sintética	52
4.4	Aparato experimental.....	55
4.4.1	Montagem e descrição geral das instalações	55
4.4.2	Premissas utilizadas para definição da montagem do aparato	59
4.5	Procedimento experimental	60
4.5.1	Ensaio preliminares	60
4.5.2	Realização dos ensaios e coleta das amostras.....	61

4.6	Análises realizadas.....	62
4.6.1	Frequência e método de análise	62
4.6.2	Análise dos resultados	63
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	64
5.1	Dados de concentração da bacia hidrográfica de referência para aporte de sólidos	64
5.2	Caracterização do solo utilizado na confecção da água sintética	67
5.3	Turbidez	68
5.3.1	Avaliação da turbidez: Água sintética tipo I.....	68
5.3.2	Avaliação da turbidez: Água sintética tipo II	83
5.4	Sólidos Totais.....	97
5.4.1	Avaliação dos Sólidos Totais: Água sintética tipo I.....	98
5.4.2	Avaliação dos Sólidos Totais: Água sintética tipo II.....	112
5.5	Eficiência de remoção de turbidez.....	126
5.5.1	Água sintética tipo I.....	126
5.5.2	Água sintética tipo II.....	131
5.6	Eficiência de remoção de sólidos totais	136
5.6.1	Água sintética tipo I.....	136
5.6.2	Água sintética tipo II.....	141
6	CONCLUSÕES	148
	REFERÊNCIAS	149

1 INTRODUÇÃO

A segurança hídrica, escassez da água, degradação ambiental e muitos outros tópicos são apresentados constantemente à população como uma preocupação sobre o futuro da água e das decisões necessárias para a recuperação e preservação dos aquíferos. Entender os riscos da poluição e escassez da água exige a compreensão da oferta e demanda, incluindo o envolvimento de outros setores acoplados à água e seu uso (RISING *et al.*, 2022). O óbvio é que a água é fundamental para o desenvolvimento de diversos setores, além de ser um bem indispensável para a manutenção da vida.

Pesquisas e avanços tecnológicos buscam constantemente apresentar soluções para os problemas de escassez e poluição da água para abastecimento humano. A água tratada deve apresentar boa qualidade final, usufruindo do processo de tratamento ideal para remoção dos poluentes encontrados na água analisada, oferecendo dessa forma um tratamento seguro destas águas (CALDERÓN-FRANCO *et al.*, 2021).

Ao longo do tempo, os recursos disponíveis apresentaram novas formas de tratamentos altamente capazes para remover diversas impurezas, como contaminantes emergentes encontrados nas águas superficiais e nos esgotos domésticos. As tecnologias apresentadas envolvem o uso de técnicas simples como: filtração, decantação, coagulação, até tratamentos mais avançados como: a ultrafiltração, osmose reversa, biorreatores de membranas, desinfecção e oxidação avançada, ozonização e luz ultravioleta, sendo alguns dos exemplos deste avanço (VON SPERLING, 2014; CALDERÓN-FRANCO *et al.*, 2021; SEWAK *et al.*, 2021).

Entretanto, a informação dos componentes presentes tanto na água bruta, quanto no esgoto é vital na escolha da tecnologia. Isso posto, algumas tecnologias podem desencadear ações danosas, como a liberação de trihalometanos (THM) em águas com elementos húmicos e cianotoxinas em tratamento de águas contaminadas por cianobactérias, por exemplo (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2017; SEWAK *et al.*, 2021).

Ademais, a purificação das águas brutas prevê a utilização de reagentes químicos para a remoção de partículas mais finas, gerando flocos que são removidos nas etapas de sedimentação e filtração. (GOMES *et al.*, 2022). Contudo, o lodo gerado nas estações de tratamento de água (ETA) é produzido em grande quantidade, acarretando altos custos para transporte e disposição adequada (GOMES *et al.*, 2022).

Em relação às estações de tratamento de esgotos (ETE), a ineficiência da remoção das partículas sólidas na fase de tratamento preliminar pode ocasionar prejuízos nos dispositivos subsequentes do tratamento (TCHOBANOGLIOUS *et al.*, 2016). Os danos envolvem a

deterioração de equipamentos da ETE, contaminação das tubulações e deficiência do processo de tratamento (TCHOBANOGLOUS *et al.*, 2016).

Devido a isso, sistemas eficientes e ambientalmente viáveis se tornaram necessários para a manutenção da qualidade das águas potáveis (SAIDULU; SRIVASTAVA; GUPTA, 2022). Sistemas por membranas e filtros convencionais são destaque devido ao seu desempenho e capacidade de não contaminação, alta capacidade de remoção de diversos poluentes e variabilidade de aplicações (SEWAK *et al.*, 2021; MANIKANDAN *et al.*, 2022). Além disso, a decantação de alta taxa é um processo unitário eficiente para remoção de turbidez e clarificação do efluente de águas residuárias, possui baixo impacto quando comparado aos outros sistemas de tratamento (REYES *et al.*, 2022).

Nesse contexto, a pesquisa teve o intuito de avaliar a utilização de um decantador de leito móvel na remoção de partículas finas em uma água sintética simulando a concentração de sólidos presente em água bruta e esgoto bruto. Foi analisada a capacidade de retenção de partículas finas por meio de barreira física gerada pela movimentação dos carreadores dentro do aparato experimental, verificando também a influência do percentual de empacotamento do leito na eficiência de remoção das partículas.

.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O objetivo desse trabalho foi avaliar o desempenho de um decantador de leito móvel na remoção de sólidos finos de uma água sintética preparada em laboratório com faixa típica concentração de turbidez em NTU e de sólidos totais (ST) em mg/L de água de uma bacia hidrográfica e de esgoto sanitário bruto.

2.2 Objetivos específicos

- Determinar a concentração de sólidos totais e turbidez típica de uma bacia hidrográfica e a granulometria do solo escolhido para confecção da água sintética;
- Verificar o desempenho da utilização do aparato experimental na remoção da turbidez e sólidos totais de uma água sintética;
- Determinar da remoção da turbidez e os sólidos totais na água sintética em função da concentração da água sintética e enchimento do leito;
- Determinar o melhor percentual de empacotamento do leito móvel (i.e.: 0%, 25%, 50%, 75% e 100%) para a remoção das partículas finas;
- Avaliar a aplicabilidade do decantador de leito móvel de fluxo ascendente em ETA e ETE como pré-tratamento para redução de partículas de areia nos processos de tratamento a jusante.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

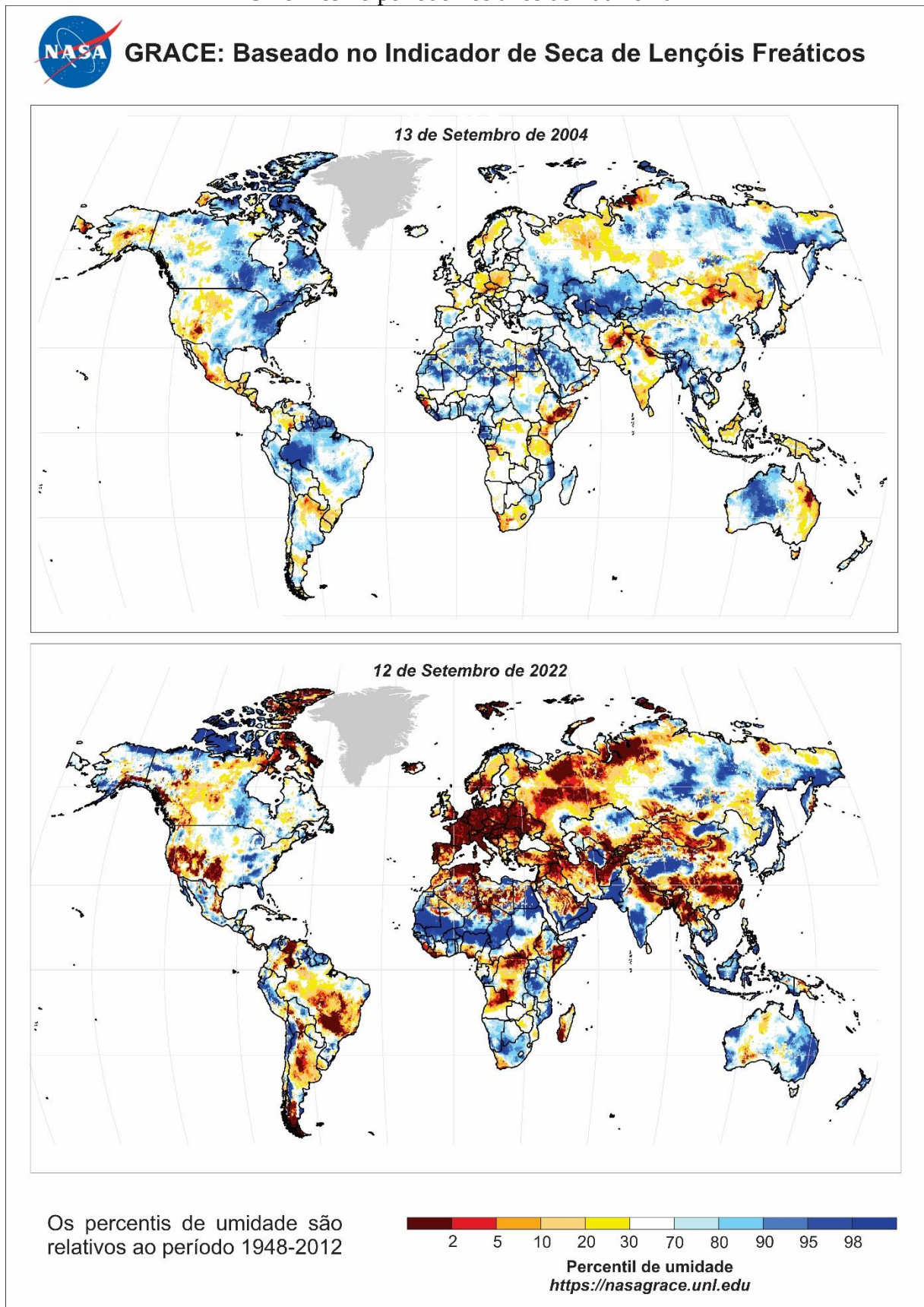
3.1 Panorama geral da água

Cursos hídricos foram importantes para o surgimento das primeiras cidades, sendo fonte de abastecimento de água potável e irrigação, como também transporte de pessoas e mercadorias. A indústria, agricultura e uso doméstico são apontados pela *Food and Agriculture Organization of the United Nations* – FAO (2021) como principais consumidores de água do planeta, sendo somente a agricultura responsável por 70% do uso da água em todo o mundo.

A água doce é distribuída díspar ao redor do planeta (LEÃO *et al.*, 2019). Devido a isso, países com baixas precipitações, como China, Ásia Central, Índia e outros, utilizam até 90% da disponibilidade hídrica regional para fins agrícolas. A FAO (2021) afirma ainda que os países que consomem acima de 25% de suas reservas hídricas podem ser considerados com estresse hídrico, enquanto 60% representam aproximação da falta de água e 75% graves problemas de escassez. Além disso, a diminuição dos aquíferos e das terras cultiváveis por conta da baixa irrigação (FAO; 2021) acarreta outros efeitos danosos à humanidade, tal como não suprimento da demanda mundial por alimentos. O monitoramento constante dos aquíferos, por meio de coletas periódicas de dados *in loco*, bem como a investigação por intermédio de dados espaciais são alguns dos artifícios que pesquisadores adotam para acompanhamento constante dos recursos hídricos. A Figura 1 apresenta o mapa indicador de seca de água subterrânea no mesmo período em 2004 e 2022, gerado a partir de dados do satélite GRACE (*Gravity Recovery And Climate Experiment*) da NASA (*National Aeronautics and Space Administration*).

Ademais, a qualidade da água também é uma condição para o suprimento das necessidades do desenvolvimento e saúde da humanidade, tornando assim o reabastecimento dos aquíferos pela precipitação e escoamento superficial insuficiente para as áreas com escassez de água (JONES *et al.*, 2021). Apesar da recarga gerenciada de aquíferos ser constantemente empregada em áreas com déficit hídrico, essa prática também vincula à recuperação de fontes contaminadas (ALAM *et al.*, 2021). De maneira geral, a gestão dos recursos hídricos compreende tanto as águas de abastecimento quanto as águas residuárias, estruturando métodos de gestão adequados como a reutilização da água e recuperação de recursos (SOTELO; SATOH, 2021).

Figura 1 - Mapa indicador de seca de água subterrânea a partir de dados do satélite GRACE-FO no mesmo período nos anos de 2004 e 2022



Fonte: Própria autora com base em dados da NASA GRACE (2022)

Em escala global, a produção de águas residuárias anual é em torno de 359 bilhões de m³ do qual aproximadamente 63% são coletados e 52 % são tratados (JONES *et al.*, 2021). Todavia, o ecossistema se regula às alterações ambientais, por meio de fenômenos físicos e biológicos, sendo definido por diversos fatores como as características dos poluentes recebidos e capacidade de assimilação do corpo hídrico (SILVA *et al.*, 2020). Entretanto, a autodepuração dos corpos d'água traz novamente o equilíbrio no meio aquático, mas em condições diferentes das iniciais e não totalmente purificada em termos de organismos patogênicos (VON SPERLING, 2014)

Anualmente, 829 mil pessoas morrem no mundo em decorrência a doenças relacionadas à falta de saneamento básico (OMS, 2019), 2 bilhões de pessoas carecem de saneamento básico e aproximadamente 1 a cada 3 pessoas não tem acesso a água potável (UNICEF, 2019). No Brasil, apenas 110,3 milhões de brasileiros possuem coleta de esgoto e somente 49,1 % do esgoto coletado é tratado (SNIS, 2019). Além dos benefícios na saúde e desenvolvimento da população, o reflexo de investimento em água potável e saneamento básico é de US\$ 5,00 de retorno a cada dólar investido, além de um ganho geral estimado em 1,5 % do produto interno bruto global (OMS, 2019).

Água potável, saneamento e vida na água estão inclusas como metas estabelecidas pela Organização das Nações Unidas (ONU) entre os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) para a promoção da melhoria da qualidade de vida global até 2030 (PDNU, 2021). Desse modo, alternativas eficientes para o tratamento de águas de abastecimento e águas residuárias são fundamentais para melhoria da saúde pública e do desenvolvimento mundial.

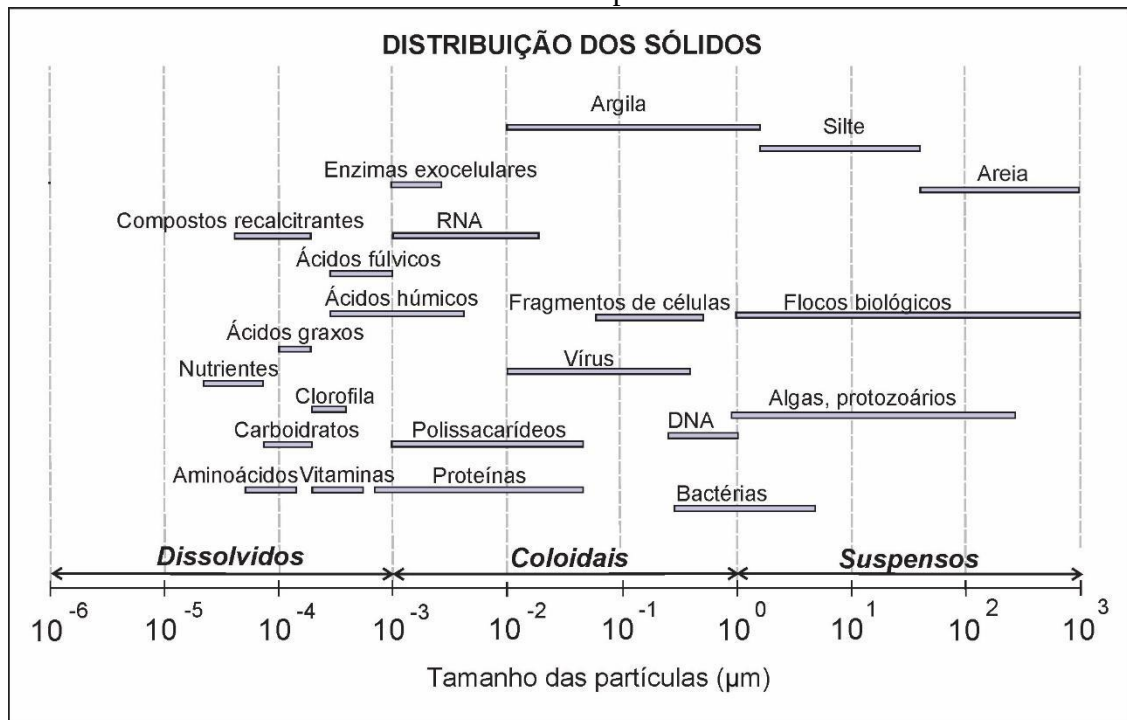
3.2 Características típicas das águas e águas residuárias

As características físico-químicas da água têm forte influência na geomorfologia, ecossistemas, no transporte de dejetos e desenvolvimento dos organismos (DODDS; WHILES, 2020). A densidade, capacidade térmica, calor de fusão, tensão superficial, viscosidade, estrutura química e propriedades coligativas da água a tornam intrínseca e estabelece sua interação com os demais elementos (STEWART, 2009). Tais atributos determinam, por exemplo, o comportamento da água como solvente e sua densidade em função da temperatura (DODDS; WHILES, 2020).

De maneira geral, as características físicas, químicas e biológicas indicam os constituintes presentes na água, como os sólidos que representam parcela expressiva dos contaminantes (VON SPERLING, 2014). Tratando-se exclusivamente de sólidos, a classificação simplificada pode ser retratada pelo seu tamanho (característica física) e pela

fração orgânica e inorgânica (característica química). A classificação e distribuição dos constituintes de água e águas residuárias em função do tamanho das partículas é apresentado na Figura 2.

Figura 2 - Classificação e distribuição de constituintes de água e águas residuárias em função do tamanho das partículas



Fonte: Elaborado pela autora com dados de Levine, Tchobanoglous e Asano (1985), ABNT (1995) e Von Sperling (2014)

A variedade e concentração dos contaminantes nas águas alteram em função de diversas condições (Tabela 1). A composição e caracterização dos efluentes são muito complexas e inconstantes, pois a contaminação dos aquíferos provêm em sua maioria do despejo de águas residuárias, abrangendo diversas fontes como doméstica, agrícola, hospitalar e industrial (TITCHOU *et al.*, 2021). Devido a isso, a remoção desses contaminantes é realizada por meio de processos unitários físicos, químicos e biológicos em diversas combinações possíveis e em função das características e necessidades do tratamento (TCHOBANOGLIOUS *et al.*, 2016).

Os processos unitários físicos consistem na utilização de forças físicas como gravidade e atração de corpos, alguns dos processos mais utilizados em tratamentos de água são adsorção, peneiramento, mistura, floculação, sedimentação e filtração (TCHOBANOGLIOUS *et al.*, 2016).

Tabela 1- Características físicas, químicas e biológicas de efluentes e suas respectivas fontes

Característica	Fonte
Cor	Esgoto doméstico ou industrial, decomposição natural de material orgânico
Odor	Esgoto em decomposição, esgoto industrial
Sólidos	Abastecimento de água doméstico, esgoto industrial, erosão do solo, vazões externas/infiltração
Temperatura	Esgoto doméstico e industrial
Carboidratos	Esgoto doméstico, comercial e industrial
Compostos orgânicos voláteis	Esgoto doméstico, comercial e industrial
Fenóis	Esgoto industrial
Gorduras, óleos e graxas	Esgoto doméstico, comercial e industrial
Outros	Decomposição natural de materiais orgânicos
Pesticidas	Esgoto agrícola
Poluentes prioritários	Esgoto doméstico, comercial e industrial
Proteínas	Esgoto doméstico, comercial e industrial
Surfactantes	Esgoto doméstico, comercial e industrial
Alcalinidade	Esgoto doméstico, abastecimento de água doméstico, infiltração de água subterrânea
Cloretos	Esgoto doméstico, abastecimento de água doméstico, infiltração de água subterrânea
Enxofre	Abastecimento de água doméstico, esgoto doméstico, comercial e industrial
Fósforo	Esgoto doméstico, comercial e industrial, escoamento superficial natural
Metais pesados	Esgoto industrial
Nitrogênio	Esgoto doméstico e agrícola
pH	Esgoto doméstico, abastecimento de água doméstico, infiltração de água subterrânea
Poluentes prioritários	Esgoto doméstico, comercial e industrial
Potássio	Esgoto doméstico, comercial e industrial
Metano	Decomposição de esgoto doméstico
Oxigênio	Abastecimento de água doméstico, infiltração de água superficial
Sulfeto de hidrogênio	Decomposição de esgoto doméstico
Animais	Cursos de água abertos e estações de tratamento
Helmintos (vermes)	Esgoto doméstico
Plantas	Cursos de água abertos e estações de tratamento
Protista (Arqueobactéria e Eubactéria)	Esgoto doméstico, infiltração de água superficial e estações de tratamento
Vírus	Esgoto doméstico

Fonte: Adaptado de Tchobanoglous *et al.*, (2016)

Os processos químicos são conhecidos pela remoção de poluentes por meio de compostos químicos ou reações químicas (precipitação, transferência de gases, desinfecção e adsorção), enquanto que os processos unitários biológicos são utilizados para remoção de substâncias orgânicas biodegradáveis, coloidais ou dissolvidas, nitrogênio e fósforo por meio da atuação biológica (TCHOBANOGLIOUS *et al.*, 2016).

3.3 Sedimentos

A deterioração dos corpos d'água pela entrada de sedimentos e seus compostos afeta o ecossistema e a qualidade da água (REMUND *et al.*, 2021). Grande quantidade de sedimentos transportados nos cursos d'água são produtos de processos erosivos que ocorrem devido às ações naturais (chuva, cobertura vegetal, relevo e tipo de solo) e/ou antrópicas (uso e ocupação do solo, desmatamento e mineração) (ALMEIDA FILHO; HELLMEISTER JÚNIOR, 2019).

Os processos de assoreamentos em corpos d'água são resultado do acréscimo de sedimentos transportados e podem contribuir em inundações em virtude da redução nas dimensões da calha do rio (ALMEIDA FILHO; HELLMEISTER JÚNIOR, 2019).

Segundo Collins *et al.* (2009) os campos agrícolas são responsáveis por 76% da introdução de sedimentos nos cursos d'água na Inglaterra e País de Gales. Em seu estudo, Hepp e Zessner (2019) avaliaram a bacia agrícola do rio Pram, no estado austríaco de Alta Áustria e constataram que estruturas de drenagens localizadas em áreas de alta declividade e não pavimentadas podem intensificar o lançamento de partículas poluentes em águas superficiais.

Além da erosão das áreas agrícolas, a produção de sedimentos ocorre também devido a ação do intemperismo de rochas, deslizamento de terras e erosão fluvial, pelos quais as partículas são transportadas ao longo do fluxo d'água e depositadas nas planícies, lagos e reservatórios (SCHLEISS *et al.*, 2016). O acréscimo de volume de água escoada devido a impermeabilidade das bacias urbanas, também compromete a qualidade dos corpos d'água pelo transporte de sedimentos e poluentes associados às superfícies impermeáveis (SASIDHARAN *et al.*, 2021).

Dado que a dissipação da luz ocorre pela presença de partículas suspensas na água, a medição da turbidez é uma das ferramentas de análise de transporte de partículas nos cursos hídricos (RÜGNER *et al.*, 2014). Os sólidos suspensos totais (SST) podem ser quantificados por meio de ajuste das medições de turbidez para bacia hidrográfica analisada, visto que a quantidade de SST depende das características das partículas e da cor da água (RÜGNER *et al.*, 2014; JIANG *et al.*, 2021). A turbidez medida em Unidade de Turbidez Nefelométrica (NTU) correspondeu de 1 a 2 mg/L de SST no estudo de Rügner *et al.* (2013) que analisou a bacia

hidrográfica superior ao Rio Neckar (afluentes Ammer, Goldersbach, Steinlach, Körsch) e ainda as sub-bacias do rio Bode no leste da Alemanha.

Ademais, os avanços tecnológicos do sensoriamento remoto por satélite possibilitam também o monitoramento eficiente da qualidade da água em altas resoluções temporais e espaciais utilizando algoritmos para estimar com precisão a concentração de SST (JIANG *et al.*, 2021).

3.4 Propriedades das partículas

A caracterização das partículas presentes tanto na água quanto no esgoto é fundamental para determinação das necessidades de tratamento de cada efluente, valendo-se não apenas de parâmetros não específicos como Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e Sólidos Suspensos (SS), mas também o tamanho da partícula (TCHOBANOGLIOUS, 1995).

Levine, Tchobanoglous e Asano (1985) afirmam que a especificação do tamanho e distribuição da partícula do efluente é importante para a determinação de aspectos relevantes, tais como taxa de sedimentação, transferência de massa, adsorção e reações bioquímicas.

Sabe-se que as partículas em suspensão na água são responsáveis pela turbidez e os principais componentes causadores são argila, silte, areia fina e microrganismos, entretanto, mesmo que o turbidímetro seja comum às ETAs, esse equipamento não determina a variação do tamanho e proporção das partículas presentes no efluente, pois isso requer um aparelho mais sofisticado e específico (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2017).

Geralmente, no corpo hídrico os organismos patogênicos se agregam a partículas responsáveis pela turbidez, pois usufruem desses elementos como meio e proteção (VIANNA, 2014). Ademais, a areia e/ou partículas sólidas nas estações de tratamento de esgoto possui particularidades, uma vez que esse termo abrange, além da areia, cascalho, cinza, borra de café e demais sólidos pesados e, também, o contato da areia com a matéria orgânica e elementos tensoativos, isto altera suas dimensões, a velocidade de sedimentação e a flotabilidade da areia sedimentada (TCHOBANOGLIOUS *et al.*, 2016).

A Tabela 2 ilustra as diferenças entre a partícula de areia limpa e a partícula de areia recoberta com compostos tensoativos. Pode-se observar que os agentes tensoativos se aderem às partículas limpas de areia sedimentadas, reduzindo a velocidade de sedimentação das mesmas, dessa forma, transformando-as em partículas mais leves que previsto em projeto dos dispositivos de remoção (TCHOBANOGLIOUS *et al.*, 2016).

O volume de areia que deve ser extraído depende das características da areia do esgoto transportado à estação de tratamento e do nível de remoção necessário para evitar danos

mecânicos à estação e às etapas de tratamento do efluente a jusante (TCHOBANOGLIOUS *et al.*, 2016; KUMAR; HONG, 2022). Procedimentos mais antigos foram projetados para partículas limpas de até 0,225 mm de diâmetro, enquanto os procedimentos de alta eficiência são planejados para remoção de partículas com diâmetro equivalente de areia na faixa de 0,075 a 0,150 mm (TCHOBANOGLIOUS *et al.*, 2016).

Tabela 2- Relação e diferenças entre as partículas de areia limpa e partículas recobertas com elementos tensoativos

Descrição	Ilustração
Partículas de areia limpas: • Velocidade de sedimentação depende das dimensões da partícula da areia.	
Partículas de areia recoberta de agentes tenso-ativos: • Nas partículas de areia recobertas por agentes tensoativos a velocidade de sedimentação independe de suas dimensões.	
Equivalência entre o diâmetro das partículas de areia limpa e da areia recoberta de agentes tenso-ativos: • Partículas de areia limpa e de areia recoberta com agentes tenso-ativos com mesmo diâmetro físico possuem diferentes velocidades de sedimentação; • Grande parte dos projetos prevê depósito de partículas limpas até 0,255 mm; • Presença de partículas de areia nos tratamentos secundários; • Dimensão equivalente é a dimensão de areia limpa que corresponde a velocidade de sedimentação das partículas recobertas.	

Fonte: Adaptado de Tchobanoglous *et al.*, (2016)

A ineficiência no processo de remoção de areia pode acarretar numa demanda excessiva de manutenção e aumento nos custos de operação, além da redução da qualidade do tratamento

do efluente. Além disso, o dimensionamento da remoção de areia deve prever o acréscimo de vazão em períodos chuvosos (TCHOBANOGLIOUS *et al.*, 2016).

As argilas, por sua vez, são formadas essencialmente por argilominerais e demais elementos como por exemplo quartzo e calcita (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2017). A estrutura da argila é decorrente do tipo de argilomineral e suas camadas são unidas pela ação de pontes de hidrogênio ou forças de Van der Waals (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2017).

Segundo Wang *et al.* (2018) as partículas de argila possuem medidas similares às bactérias e são determinadas como partículas coloidais (Figura 2), entretanto os estudos acerca da facilidade do movimento bacteriano em razão das partículas minerais são complexos. Alguns estudos apontam, por exemplo, a capacidade de argilominerais facilitarem ou dificultarem o transporte de bactérias no solo (CHEN, 2012) e da interação entre *Escherichia coli* e partículas de solo (principalmente a partículas menores que 2 μm) em escoamento em um solo saturado (MUIRHEAD; COLLINS; BREMER, 2006). Entretanto, Wang *et al.* (2018) não concluíram se os patógenos possuem preferência por partículas de argila ou areia em relação ao transporte em escoamentos por precipitações.

Além de bactérias e vírus, a argila pode também facilitar o transporte de poluentes como metais pesados. Isso ocorre, pois, as argilas são abundantes e tendem a produzir aglomerados das partículas coloidais (WON *et al.*, 2021). Embora seja relatado que as argilas se aglomeram em quatro formas e o tamanho dos aglomerados depende do pH e da força iônica, sendo o segundo o principal agente de agrupamento, o resultado do efeito da aglomeração no movimento das partículas de argila em meios porosos ainda é pouco conhecido (PALOMINO; SANTAMARINA, 2005; ZBIK; SMART; MORRIS, 2008; WON *et al.*, 2021)

A eficiência da retenção no meio de areia é maior quanto maior o tamanho do floco ou aglomerado, ademais o entupimento dos meios porosos ocasionados pela retenção significativa de argila pode aumentar a perda de carga de filtros (WON *et al.*, 2021).

3.5 Processos de tratamentos típicos nas estações de tratamento de água e esgoto

Nas ETAs o tipo de tratamento deve ser determinado em função da qualidade da água bruta. Geralmente os tipos de tratamentos podem ser classificados como: tratamento com simples desinfecção, tratamento simplificado, tratamento convencional e tratamento avançado. Por exemplo no tratamento convencional são incluídos no processo de clarificação da água bruta: a coagulação, floculação, decantação, filtração (areia e antracito) e desinfecção. Desta

forma, dependendo da qualidade final desejada podem-se utilizar tratamentos avançados como: flotação por ar dissolvido, ultrafiltração, osmose reversa, filtração em membranas. (TANG; HADIBARATA, 2021)

Por convenção nas ETEs, o tratamento consiste em quatro etapas: preliminar, primário, secundário e terciário. Os processos físico-químicos são utilizados nas duas primeiras etapas e concomitantemente utilizados com o tratamento biológico no tratamento secundário, por fim, poluentes específicos são removidos no tratamento terciário (TANG; HADIBARATA, 2021).

A principal diferença entre água bruta e água residuária consiste na maior proporção de matéria orgânica presente nos efluentes domésticos e industriais (TANG; HADIBARATA, 2021).

As águas possuem propriedades físicas, químicas e biológicas, nas quais as propriedades físicas da água incluem características importantes como sólidos totais, tamanho e distribuição de partículas, turbidez, condutividade, cor, transmitância e temperatura (TCHOBANOGLIOUS *et al.*, 2016). As características físicas podem ser fundamentais na escolha da operação e tecnologia de tratamento da água. Os processos físicos que separam mecanicamente partículas sólidas de líquidos mais comuns são decantação, prensagem, filtração e a centrifugação (VON SPERLING, 2014; DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2017).

3.6 Decantação

Uma das formas clássicas de tratamentos de água é a decantação. Trata-se de um procedimento que reduz as partículas em suspensão na água por meio da sedimentação das partículas no interior de um recipiente (VIANNA, 2014). A decantação é utilizada para remoção de sólidos grosseiros, sendo em alguns casos precedida de tratamentos químicos, de modo a desestabilizar as partículas para que essas se aglutinem e sedimentem (VIANNA, 2014).

A sedimentação por se tratar de um fenômeno físico natural é uma técnica antiga e tem sido aperfeiçoada ao longo dos anos. Entretanto, os primeiros estudos teóricos para a aplicação da sedimentação para clarificação da água surgiram apenas no início do século XX (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2017). O processo de decantação é um dos principais agentes na remoção de areia, flocos biológicos e químicos, sólidos suspensos e consequentemente redução da turbidez (OLIVEIRA *et al.*, 2021).

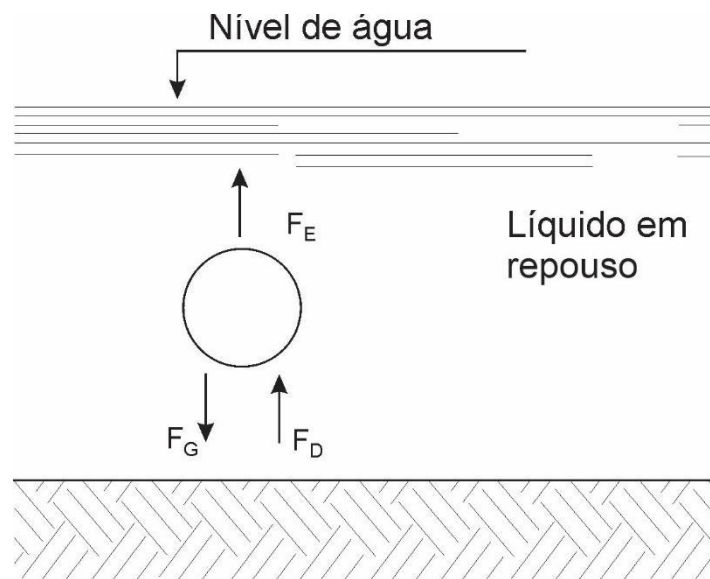
Devido a simplicidade e baixo custo, a sedimentação por gravidade é um processo que pode ser aperfeiçoado com a utilização de produtos químicos e/ou outras tecnologias (LIU *et al.*, 2021). Ademais, o intuito principal da decantação é a clarificação do efluente, como também, gerar lodo com concentração de sólidos que simplifiquem o transporte e tratamento

(TCHOBANOGLIOUS *et al.*, 2016). A separação por decantação, em relação ao contato entre partículas e a concentração, pode ocorrer de quatro formas, sendo elas, partícula discreta, floculenta, retardada ou zonal e compressão (TCHOBANOGLIOUS *et al.*, 2016).

A sedimentação que ocorre pela gravidade em um campo com aceleração constante e com baixa concentração de partículas em suspensão na qual não ocorre interação significativa entre partículas vizinhas, é conhecida como sedimentação de partículas discretas (Figura 3). A sedimentação de partículas discretas ocorre geralmente nos processos que envolvem remoção de areia das estações de tratamento (TCHOBANOGLIOUS *et al.*, 2016).

A teoria da sedimentação das partículas discretas fundamenta-se na ocorrência da aceleração gravitacional da partícula em um líquido em repouso, na qual as forças de deformação e resistência viscosa do líquido são igualadas ao peso da partícula (Figura 3). A partir desse momento a velocidade passa a ser constante e denominada de velocidade de sedimentação (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2017).

Figura 3 - Forças atuantes numa partícula sólida durante a sedimentação



Fonte: Di Bernado; Dantas; Voltan (2017).

O peso da partícula (F_G) e o empuxo (F_E) são dados respectivamente pelas Equações 1 e 2.

$$F_G = \rho_s g V_{ps} \quad \text{EQ.01}$$

$$F_E = \rho_a g V_{ps} \quad \text{EQ.02}$$

Nas quais:

F_G = peso da partícula (N);

F_E = empuxo (N);

ρ_s = massa específica da partícula (kg/m³);

ρ_a = massa específica da água (kg/m³);

g = aceleração da gravidade (m/s²);

V_{ps} = volume da partícula (m³).

A força de arrasto genericamente proposta por Newton (Equação 3) considera constante o coeficiente de arrasto (C_D) quando há turbulência significativa no entorno da partícula. Entretanto, nas conjunturas que essa condição não ocorre, o coeficiente C_D altera-se em relação ao número de Reynolds que é expresso pela Equação 4 (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2017).

$$F_D = C_D A_s \rho_a \frac{V_s^2}{2} \quad \text{EQ.03}$$

$$Re = \frac{\rho_a V_s d_{ps}}{\mu} \quad \text{EQ.04}$$

Nas quais:

F_D = força de arrasto (N);

A_s = área projetada da partícula na direção do movimento (m²);

V_s = velocidade de sedimentação da partícula (m/s);

d_{ps} = diâmetro da partícula (m);

C_D = coeficiente de descarga;

Re = número de Reynolds;

μ = viscosidade absoluta da água (N.s/m²).

A velocidade de sedimentação em regimes de alta taxa o Re é inferior a 2×10^3 e que C_D deixa de ser constante, então assume-se a Equação 5 para determinação da força de arrasto e velocidade de sedimentação expressa pela Equação de Stokes (Equação 6).

$$F_D = 3 \pi \mu d_{ps} V_s \quad \text{EQ.05}$$

$$V_s = \frac{g(\rho_s - \rho_a)d^3 p_s}{18\mu} \quad \text{EQ.06}$$

A sedimentação floculenta, por sua vez, trata-se das situações em que ocorre aglomeração das partículas, ocorrendo alteração do seu diâmetro original. Por consequência, a velocidade de sedimentação inicialmente observada, torna-se maior. Pela equação de Stokes, para esses casos se tem que a velocidade aumenta proporcionalmente o quadrado do tamanho das partículas. Além disso, outra diferença é que os principais parâmetros para a sedimentação de partículas floculentas são a área superficial e a taxa de escoamento superficial, diferente das partículas discretas cuja profundidade e do tempo médio de detenção são os fatores mais significativos (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2017).

3.6.1 Decantadores

Os decantadores são dispositivos de tratamento de água que utiliza o princípio da sedimentação para a separação sólido-líquido. Em estações de tratamento de água, esses dispositivos destinam-se à remoção de partículas floculentas decorrentes da fase anterior, a floculação (VIANNA, 2014). Além disso, os decantadores atuam também em processos biológicos na remoção do resíduo gerado em tanque de aeração do efluente, clarificando e promovendo a recirculação do lodo nessa etapa (TCHOBANOGLIOUS *et al.*, 2016).

Como a velocidade de operação de decantadores é um dos principais aspectos para o bom desempenho do dispositivo, a NBR 12216 determina que a velocidade de sedimentação dos decantadores deve ser obtida pelo produto do fator k (variando de 0,5 a 0,8 e determinado pela capacidade da estação de tratamento) e a velocidade de sedimentação por meio de ensaios laboratoriais (ABNT, 1992; VIANNA, 2014).

Os decantadores mais utilizados no Brasil podem ser divididos em dois grupos, os decantadores clássicos e os decantadores tubulares (de alta taxa), sendo os clássicos normalmente classificados como de seção retangular ou circular e os decantadores de alta taxa como de fluxo ascendente ou fluxo horizontal (VIANNA, 2014).

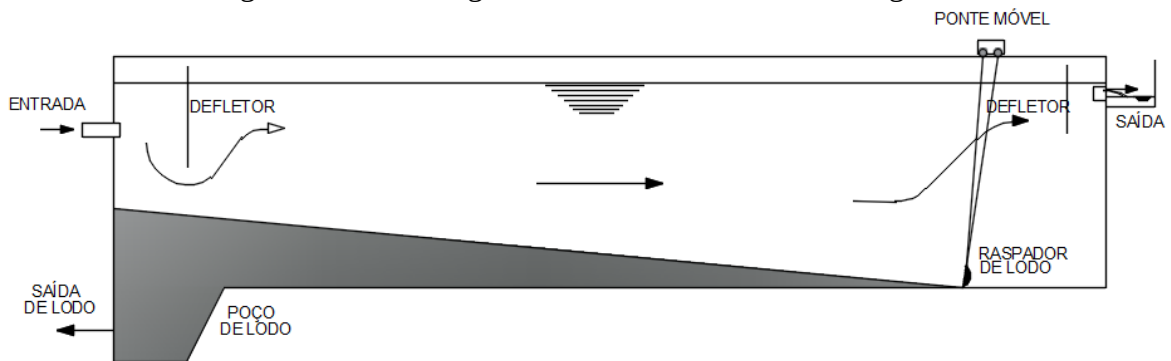
3.6.1.1 Decantador retangular

Dentre os decantadores clássicos, o decantador com seção retangular é o mais numeroso em relação as demais configurações (VIANNA, 2014). A distribuição da vazão do efluente nessa configuração é crítica, exigindo que seja realizada por meio de cortinas distribuidoras.

A partir disso, o efluente percorre a extensão do decantador numa velocidade pequena até a saída. Nesse processo, a velocidade de entrada do efluente no decantador, como também o elevado número de Reynolds, torna o regime de escoamento dessa configuração como turbulento (VIANNA, 2014; TCHOBANOGLOUS *et al.*, 2016).

O lodo gerado no processo de sedimentação é geralmente raspado por meio de um par de correntes no qual são colocados raspadores direcionados aos canais transversais ou poços de sólidos (TCHOBANOGLOUS *et al.*, 2016). A raspagem do lodo também pode ser executada pelo mecanismo apresentado na Figura 4, em que a ponte móvel desloca-se em ambos sentidos e as lâminas podem ser suspensas acima do lodo para o deslocamento contrário à raspagem (TCHOBANOGLOUS *et al.*, 2016).

Figura 4 - Corte longitudinal de um decantador retangular



Fonte: Própria autora

3.6.1.2 Decantador circular

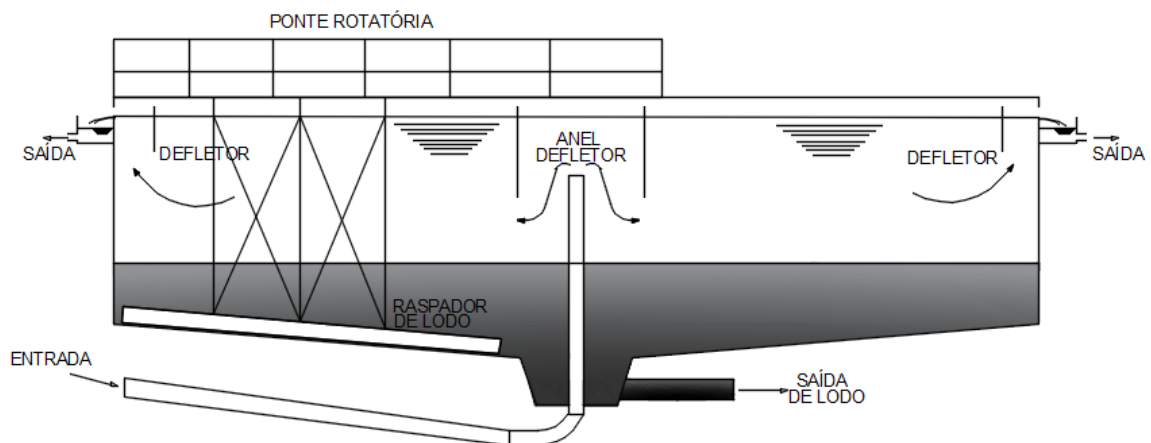
A principal diferença entre os decantadores de seção retangular e de seção circular, além do formato, é a capacidade de formação de mantos de lodo que aumentam a remoção de resíduos (VIANNA, 2014). Assim como nos decantadores retangulares, as velocidades de escoamento devem ser calculadas de modo que não ocorra arraste ou ascensão do material sedimentado.

Os tanques de formato circular possuem escoamento radial e a água bruta ou esgoto são inseridos no tanque de forma central ou periférica, sendo a alimentação central a mais usual. Da mesma forma, a distribuição do fluido é homogeneizada e dissipadores de energia utilizados nesse processo (TCHOBANOGLOUS *et al.*, 2016).

A remoção de sólidos nesse modelo é realizada também por raspadores, como apresentando na Figura 5. O lodo é direcionado ao poço através dos raspadores que são suportados por vigas e podem ser ancorados em passeios, além disso, os raspadores possuem a inclinação do próprio decantador. (TCHOBANOGLOUS *et al.*, 2016).

Os decantadores de manto de lodo são aqueles cuja a entrada da água é realizada na zona de lodo. Nesses casos, a taxa de escoamento é geralmente superior as adotadas nos decantadores de escoamento horizontal e a formação do manto de lodo exige uma turbidez da água bruta superior a 50 (uT). Além disso, o desempenho depende da manutenção do manto de lodo em uma espessura de 1 a 3 metros com teor de sólidos entre 2 e 10% e taxa de escoamento entre 50 a 100 m³/m²/d (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2017).

Figura 5 - Corte transversal de um decantador circular



Fonte: Própria autora.

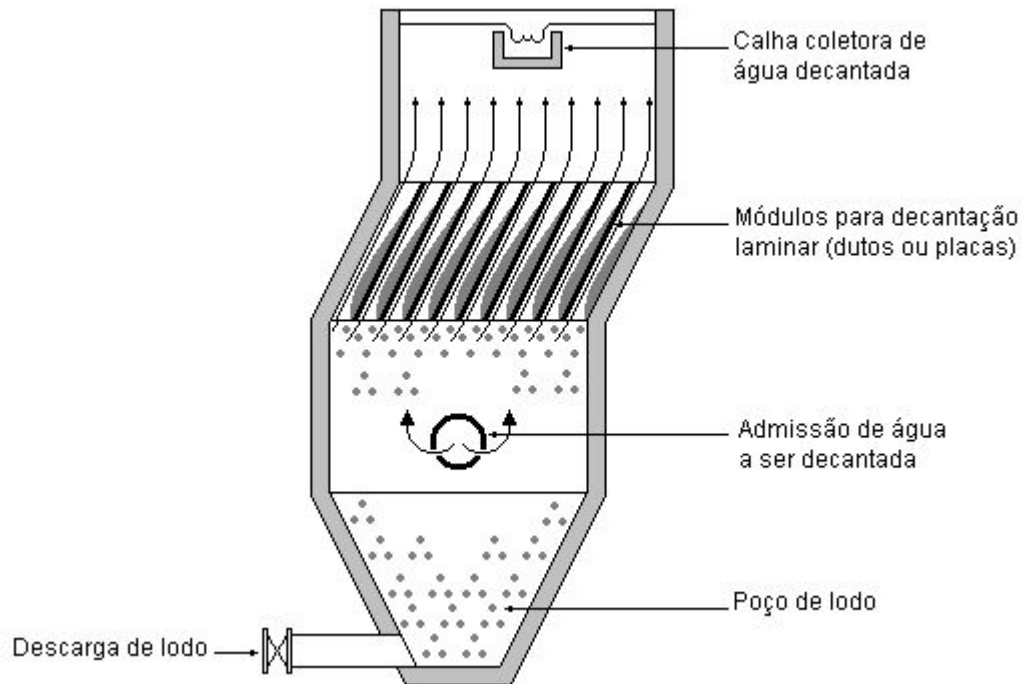
3.6.1.3 Decantador de alta taxa

O decantador de alta taxa é uma tecnologia que utiliza módulos dispostos de forma oblíqua para a sedimentação da água (VIANNA, 2014). Essa configuração foi elaborada a partir da teoria de Osborne Reynolds, pois a inserção dos módulos ocasiona um maior perímetro molhado, reduzindo o número de Reynolds e tornando o regime de escoamento em de alta taxa (VIANNA, 2014).

Nessa configuração, a sedimentação ocorre quando a água ao passar entre as placas, sedimenta. As placas são dispostas em inclinações superiores a 50 graus afim de garantir sua autolimpeza (VIANNA, 2014). A Figura 6 apresenta a configuração e o princípio de funcionamento de um decantador de alta taxa.

Inicialmente, os flocos menores ficam retidos nas placas, à medida que demais flocos escoam entre os dutos, os flocos menores se aglutinam até atingirem peso suficiente para sedimentarem até o poço de lodo (VIANNA, 2014). Os módulos são placas plásticas leves e de fácil instalação. Esses dispositivos podem ser utilizados em estações que há interesse de aumentar a capacidade de tratamento sem a necessidade de construção de novos decantadores (VIANNA, 2014).

Figura 6 - Princípio de funcionamento de um decantador de alta taxa



Fonte: Vianna (2014).

A principal desvantagem da utilização de decantadores de alta taxa nas estações é ocasionada pela dificuldade de manutenção e/ou troca dos módulos desse dispositivo.

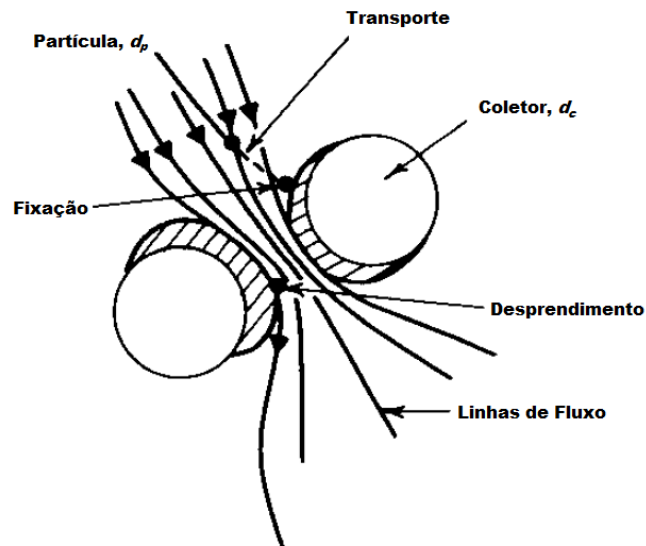
3.7 Filtração

O processo de filtração consiste em reter mecanicamente partículas sólidas do líquido através de um leito poroso. A classificação dos filtros depende de diversos aspectos, dos quais a força propulsora, material constituinte do meio filtrante, função, detalhes construtivos e regime de operação (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2017).

Existem relatos documentados que o emprego de filtros de areia, cascalho, planta e tecido para remoção de sedimentos são utilizados desde o século XV a.C no Egito, Grécia e Sul da Ásia e em recente descoberta, arqueólogos constataram o uso de zeólita em um reservatório situado em Tikal que operou aproximadamente entre 200 a. C e 1100 d. C, tornando-se o exemplo mais antigo de purificação de água no Ocidente (TANKERSLEY *et al.*, 2020).

Durante a filtração, alguns mecanismos complexos são responsáveis pela remoção das partículas. A Figura 7 apresenta de forma simplificada os mecanismos da filtração, pela qual é possível observar que o transporte, aderência (fixação) e desprendimento são os principais responsáveis pelo processo (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2017).

Figura 7 - Mecanismos de filtração



Fonte: Adaptado de Amirtharajah (1988)

Os filtros desempenham uma troca complexa entre a eficiência e a taxa de filtração na passagem do fluido pelo meio filtrante, o que torna o meio filtrante mais suscetível a obstruções em processos contendo afluentes com maior concentração de sedimentos (KUMAR *et al.*, 2021).

A taxa de filtração e desempenho de purificação dos filtros são produtos da profundidade do leito, tamanho da partícula da areia e a carga de sedimentos. Os sucessivos ciclos de filtragem reduzem a eficiência hidráulica mesmo que haja relatos de melhoria da eficiência com o entupimento dos meios filtrantes (COUSTOMER; BARRAUD, 2007; KUMAR *et al.*, 2021).

3.8 Reatores de leito móvel

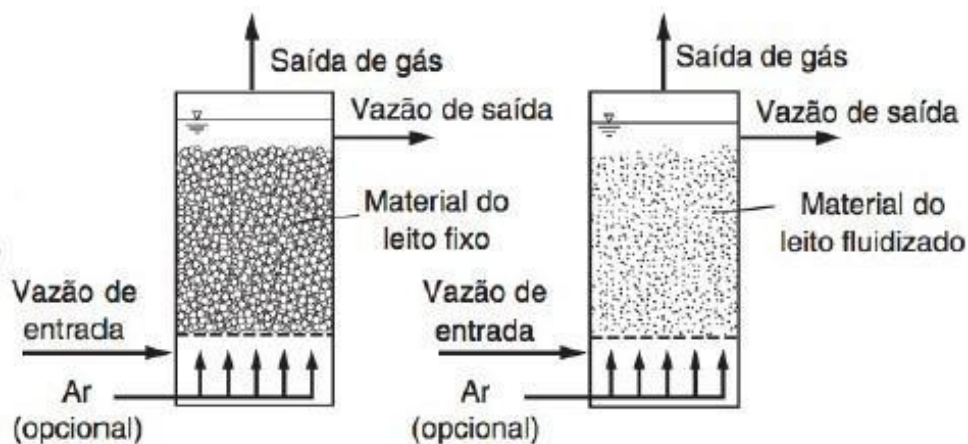
Os reatores de leito móveis são dispositivos cilíndricos usualmente utilizados em tratamento secundário de efluentes. Geralmente, envolvem separações multifásicas de componentes líquidos, sólidos e gasosos (KYRIAKIDIS; VIEIRA; ROCHA, 2015). Esses reatores também são empregados na indústria química, pois são capazes de executar várias reações químicas.

O aspecto principal dessa configuração, baseia-se na capacidade de movimentação do material sólido do leito devido à velocidade de passagem do fluido (TCHOBANOGLIOUS *et al.*, 2016). Algumas das técnicas de tratamentos que empregam essa configuração são os reatores de leito fluidizável, os reatores de biofilme de leito móvel (MBBR), além de diversas configurações de meio suporte que são empregados aos sistemas de leito móvel.

3.8.1 Leito fluidizável

Reatores de leito fluidizados constantemente são utilizados em indústrias de modos diversos, bem como no tratamento de águas residuárias (YEHUDA; KALMAN, 2020). Tal equipamento é conhecido pela operação, que ocorre na mistura bifásica de fluido e sólido, no qual a parcela sólida é fluidizada por um fluxo de circulação ascendente ou descendente (ÖZKAYA *et al.*, 2019). Semelhante ao reator de leito fixo em diversos elementos, a distinção do reator de leito fluidizado situa-se no espalhamento do material de enchimento ao longo do leito incitado pelo movimento ascensional do fluido (Figura 8) (TCHOBANOGLIOUS *et al.*, 2016).

Figura 8- Esquema de reatores utilizados no tratamento de efluentes: reator de leito fixo com vazão ascendente (esquerda); reator de leito expandido de vazão ascendente (direita)



Fonte: Adaptado de Tchobanoglous *et al.*, (2016)

A fluotabilidade do meio suporte ocorre quando as forças de arrasto e gravitacionais se igualam, dessa forma os sólidos são suspensos e então a mistura sólido-líquido procede semelhante a um fluido. Isso ocorre, pois, o aumento da taxa de fluxo no reator deriva a queda de pressão Δp , e quando a queda de pressão se iguala ao peso do leito, as partículas começam a se dispersar caracterizando a velocidade mínima de fluidização. À medida que a velocidade vai aumentando, ocorre a expansão do leito e por consequência a diminuição da densidade e aumento dos vazios do leito (SHARMA; MOHAPATRA; GHOSH, 2021). Portanto, inúmeras variáveis são responsáveis pelo desempenho de um reator de leito fluidizado.

A operação desse equipamento pode ser sob alimentação contínua ou intermitente (TCHOBANOGLIOUS *et al.*, 2016). Materiais granulares de origem mineral e também grãos de argila calcinada, xisto expandido, materiais arenosos, pozolana, carvão ativado, cerâmica e

plásticos são usualmente utilizados como meio suporte em reatores de leito fluidizável em ETE (MARTINS, 2003; TCHOBANOGLIOUS *et al.*, 2016).

Devido à complexidade e a gama de processos que utilizam esse sistema, é importante analisar o comportamento do leito ao uso solicitado (YEHUDA; KALMAN, 2020). O interesse do uso dessa tecnologia fortaleceu a partir de 1990, tornando-se influente no tratamento biológico de águas residuárias e em muitas aplicações da engenharia ambiental (MALLIKARJUNA; DASH, 2020).

A ampliação do uso de meio suporte com materiais sintéticos, cujo peso específico varia entre 0,03 e 0,9 g/cm³, provocou a inserção de novas técnicas com meio flutuante ou estruturado (não granular) (MARTINS, 2003). A utilização de materiais poliméricos granulares traz vantagens como menor demanda energética para fluidização devido a sua leveza, facilidade de adesão bacteriana favorecendo o crescimento do biofilme, área superficial satisfatória para colonização, características físicas conservadas no crescimento bacteriano, baixo custo, utilização de espaços reduzidos e menor tempo de detenção hidráulica (MARTINS, 2003; MALLIKARJUNA; DASH, 2020).

Segundo Gebara (2006) o tamanho, distribuição do leito e a relação entre a densidade do fluido e do sólido são aspectos que determinam a forma que acontece a fluidização. Devido a isso, é importante caracterizar o leito e determinar a velocidade mínima de fluidização.

A porosidade do leito ou índice de vazios é a razão entre o volume de vazios no leito e o volume do leito. Diversos mecanismos influenciam na porosidade do leito, tais quais a composição do meio suporte, a força de atrito entre as partículas e ao empacotamento do leito, que é uma estrutura formada por partículas sólidas fixas no interior de um leito cujo líquido escoar (FERREIRA *et al.*, 2021).

A Equação 7 apresenta o cálculo para a determinação do índice de vazios do leito.

$$\varepsilon_m = \frac{\text{Volume de Vazios}}{\text{Volume Total}} \quad \text{EQ.07}$$

Na qual:

ε_m = índice de vazios do leito.

O cálculo de velocidade de fluidização mínima para leitos de sistema sólido-gases é apresentado na Equação 8.

$$\frac{\Delta p_b}{L_{mf}} = (1 - \varepsilon_{mf})(\rho_s - \rho_f)g \quad \text{EQ.08}$$

Na qual:

$\Delta p_b = P_2 - P_1$ é a queda de pressão no leito (N/m²);

L_{mf} = comprimento do leito na condição de fluidização mínima (m);

ρ_f = massa específica do fluido (kg/m³).

Em tratamentos biológicos de efluentes domésticos em reatores de leito fluidizado, a análise do crescimento do biofilme e a espessura e a porosidade do meio são importantes para determinação da biomassa no leito (GEBARA, 2006).

Segundo Gebara (2006) a caracterização dos sistemas fluidizados tem sido investigada por relações experimentais e teóricas como, por exemplo, o índice de expansão do leito relacionado à velocidade de sedimentação das biopartículas. Para isso, entende-se a relação teórica de uma partícula isolada (Equação 9) e depois baseado no entendimento que a porosidade do reator é importante para a determinação da força de arrasto, calcula-se a relação para esse sistema (Equação 10) (GEBARA, 2006). A Tabela 2 apresenta características e velocidades mínimas de fluidização para diferentes tipos de carreadores.

$$F_D = \frac{\pi d_p^3}{6} (\rho_s - \rho_f) g \quad \text{EQ.09}$$

$$F'_D = f(\varepsilon) F_D \quad \text{EQ.10}$$

Nas quais:

F'_D = força de arrasto no sistema (N);

$f(\varepsilon)$ = fator de correção.

Segundo Gebara (2006) alguns fatores podem interferir na concentração de biomassa em reatores de leito fluidizado em tratamentos biológicos, sendo eles:

- Velocidade do fluxo;
- Tamanho das partículas;
- Espessura do biofilme;
- Teor de umidade de biofilme;
- Geometria e vazão dos injetores de ar.

Tabela 3 - Características e velocidades mínimas de fluidização de diferentes tipos de materiais carreadores

Material suporte	Massa específica da partícula (g/cm ³)	Tamanho (mm)	v_{mf} (cm/s)	Referência
PVC ¹	1,310 a 1,380	2,90 a 3,9	0,83 a 2,13	Riedel e Gimenes (1995)
Areia	2,65	0,25 a 0,85	1	Silva (1995)
Antracito	1,637 a 1,705	0,59 a 2,40	0,15 a 1,05	Wiecheteck (1996)
Biolite	1,48	0,359	0,08	Caldeón <i>et al.</i> (1996)
Kaolin	1,841	0,377	0,12	
Pozzolana	1,988	0,387	0,15	
Poliestireno	1,14	2,33	0,49	
PVC	1,297	3,36	1,36	Bergamasco (1996)
PVC + DOP ²	1,205	4,68	1,49	
Poliamida	1,114	1,91	0,67	Mendonça <i>et al.</i> (2000)
PBT ³	1,443	1,87	1,19	
CAG	1,795	2,09	1,53	

¹ PVC = cloreto de polivinil; ² PVC + DOP = cloreto de polivinil tratado com DOP (Rhodia) e ³ PBT = polibutireno tereftalato

Fonte: Mendonça (2004) *apud* Gebara (2006)

3.8.2 Reator de leito móvel com biofilme (MBBR)

A utilização do meio suporte em leitos móveis surgiu a partir da necessidade de melhorar a estabilidade hidráulica dos reatores de leitos fluidizados, além de aumentar a capacidade volumétrica das estações norueguesas (RUSTEN *et al.*; 1998). Essa técnica demonstrou vantagens sobre outras tecnologias fundamentadas em biofilme, como aumento da capacidade e desempenho na estação de tratamento com baixo custo adicional, diminuição do entupimento e dispensabilidade da retrolavagem, além de resistência do biofilme às variações das características do efluente (RUSTEN *et al.*, 1998; DI BIASE *et al.*, 2019).

Vários aspectos englobam o funcionamento dessa tecnologia, uma trata-se da disponibilidade de meio para crescimento do biofilme fornecido pela superfície do material flutuante. Outro aspecto, refere-se à dependência de movimento constante para o transporte de resíduos para o biofilme anexado, como também, operar uma força de cisalhamento impedindo o crescimento exagerado do biofilme (RUSTEN *et al.*, 1998; MAHTO; DAS, 2022).

O reator de biofilme de leito móvel ou *Moving-Bed Biofilm Reactor* (MBBR) trata-se de uma tecnologia estabelecida a partir dos processos de lodos ativados e reatores de leitos fluidizados, pela qual o reator de biofilme é constantemente operado e misturado. Os carreadores possuem baixa densidade e são movimentados pelo fluxo da água dentro do reator (RUSTEN *et al.*, 1998; CHEN; SUN; CHUNG, 2008).

A eficiência do reator de leito móvel com meio suporte resulta de várias circunstâncias, como a taxa de enchimento - razão entre volume de enchimento e volume do reator, por convenção deve ser menor que 70% - como também, tipo e a quantidade dos carreadores (AYGUN; NAS; BERKTAY, 2008; WANG *et al.*, 2021; MAHTO; DAS, 2022). Segundo Ødegaard (2000) a razão de enchimento do reator deve ser inferior a 70 % para que haja boa movimentação dos dispositivos.

Os critérios utilizados para o projeto, no entanto não são bem definidos, por exemplo, pela controvérsia da eficiência em relação a proporção do enchimento (WANG *et al.*, 2021). Entretanto, a desigualdade dos valores de eficiência entre pesquisas, podem ser justificadas pelas diferentes características hidráulicas do reator (WANG; WEN; QIAN, 2005; WANG *et al.*, 2021).

Reatores com menores taxas de enchimento geram menor cisalhamento hidráulico e dificultam a transferência de massa entre nutriente e microrganismos, o que pode tanto favorecer o crescimento de microrganismos quanto diminuir a atividade do biofilme (WANG *et al.*, 2021). Contudo, em leitos cuja taxa de enchimento é muito alta e o meio suporte não circula livremente, ocorre uma redução tanto na transferência de massa de oxigênio, como também na eficiência de remoção dos contaminantes (JING; FENG; LI, 2009; WANG *et al.*, 2021).

Chen, Sun e Chung (2007) utilizaram águas residuárias de pesticidas em seu experimento em escala de laboratório, observaram que taxas de enchimento entre 10 % a 20 % formavam biofilmes mais espessos no meio suporte, entretanto, quando o volume dos carreadores estava entre 40 % a 50 % os biofilmes se tornaram mais finos, lisos e densos, devido a colisão e abrasão das partículas.

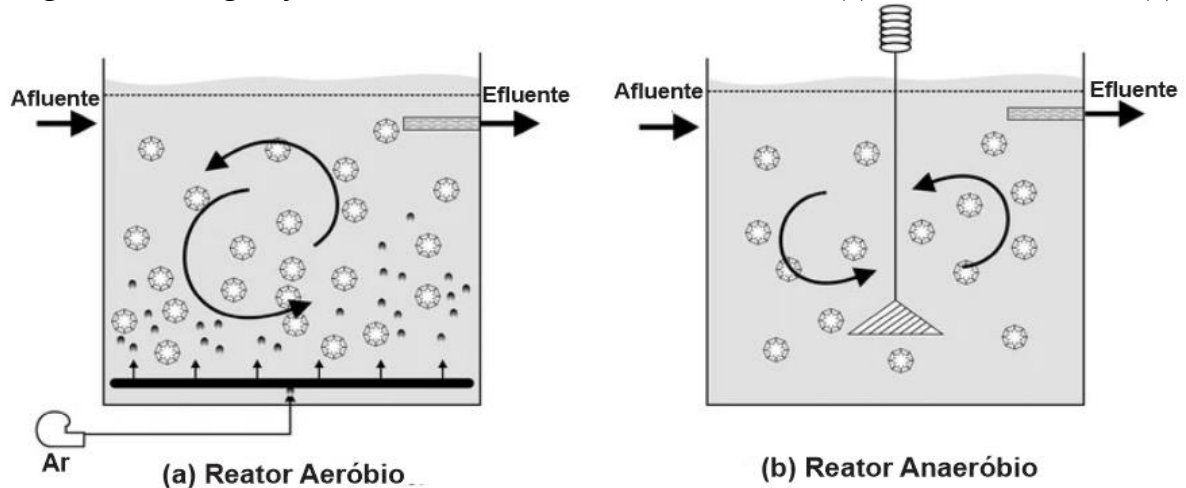
A principal diferença entre o MBBR e os demais sistemas que utilizam biofilme é a utilização de todo volume do reator para o crescimento da película de microrganismos, sem necessidade de retorno do lodo e com uma baixa perda de carga (ØDEGAARD; RUSTEN; WESTRUM, 1994; RUSTEN *et al.*, 1998; ØDEGAARD, 2000; AYGUN; NAS; BERKTAY, 2008).

A eficiência do processo depende da disponibilidade de área superficial para o crescimento do biofilme e o processo pode operar em dois sistemas: aeróbio ou anaeróbio (GUPTA *et al.*, 2022). A Figura 9 apresenta a configuração de reatores MBBR em sistemas operados com a inserção de ar e sistemas que são agitados mecanicamente.

No sistema aeróbio, a inserção de oxigênio no reator torna-se relativamente custosa, pois a aeração também é responsável pela movimentação do meio suporte. O sistema anaeróbio,

entretanto, prevê a utilização de um agitador mecânico para manutenção dos carreadores em movimento (GUPTA *et al.*, 2022).

Figura 9 - Configuração de reatores MBBR em sistema aeróbio (a) e sistema anaeróbio (b).



Fonte: Barwal e Chaudhary (2014)

3.8.2.1 Meio suporte

Devido à facilidade dos microrganismos se anexarem a um suporte sólido suspenso, o meio suporte é conhecido como mídia biológica ou biomídia em sistemas de tratamentos biológicos. O meio suporte é usualmente fabricado em polietilenos de alta densidade (PEAD) e de formatos distintos que garantam a fixação do biofilme viabilizando processos de transporte e conversões da matéria orgânica (ØDEGAARD; RUSTEN; WESTRUM, 1994; ØDEGAARD, 2000; AYGUN; NAS; BERKTAY, 2008). A Tabela 5 apresenta alguns formatos de suportes disponíveis no mercado e suas configurações.

Jing, Feng e Li (2009) demonstraram por meio de seu estudo o aumento na transferência de oxigênio com até 40 % do enchimento do leito. Segundo Dias *et al.* (2018) a força de cisalhamento entre as bolhas de ar - sistemas aeróbicos – e o carreadores geram pequenas bolhas e consequentemente a área interfacial gás-líquido aumenta, além disso, a dispersão de bolhas dentro do leito eleva o tempo de retenção das bolhas no interior do leito.

As características do meio suporte também podem influenciar as vias do fluxo e na velocidade dentro do leito (RUSTEN *et al.*, 1998; AYGUN; NAS; BERKTAY, 2008; DIAS *et al.*, 2018). Em seu estudo Dias *et al.* (2018) avaliaram o impacto de cinco meios de transportes diferentes na transferência de oxigênio de um sistema MBBR com e sem biofilme. Os autores constataram que no sistema com água limpa, a transferência geral de oxigênio aumentou em 23 % a 45 % e a eficiência hidráulica melhorou em 41 % a 53 % em relação à configuração sem meio suporte (DIAS *et al.*, 2018). Ainda, ao analisar o desempenho do meio suporte em

sistemas com o biofilme, Dias *et al.* (2018) perceberam que o uso de carreadores esféricos aumentou a eficiência hidráulica em 89 %, 93 % e 100 %, enquanto os carreadores cilíndricos demonstraram uma redução da eficiência hidráulica para 63 % e 74 %. Os autores não constatarem a correlação entre a área de superfície protegida e a eficiência hidráulica e a eficiência de transferência de oxigênio. Portanto, o tamanho e a forma do meio suporte podem influenciar no desempenho e consumo de energia do sistema (AYGUN; NAS; BERKTAY, 2008; DIAS *et al.*, 2018).

Tabela 4 - Configurações de alguns meios suportes utilizados em sistemas MBBR

Fotografia	Tipo de meio suporte	Fabricante	Área superficial (m ² / m ³)
	K1	AnoxKaldnes	500
	K2	AnoxKaldnes	350
	K3	AnoxKaldnes	500
	<i>BiofilmChip M</i>	AnoxKaldnes	1400
	<i>BiofilmChip P</i>	AnoxKaldnes	990
	F3	AnoxKaldnes	1300
	AGAR	AGAR	192
	BWT15	BioWater	828

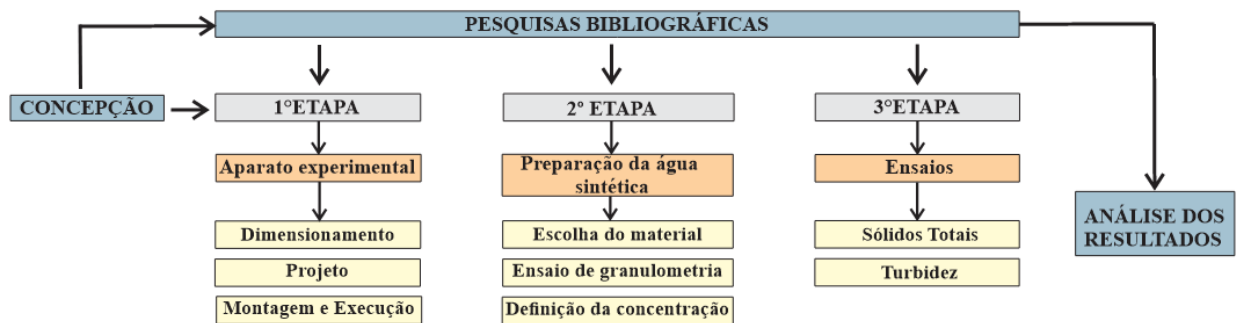
Fonte: Adaptado de Almada (2012)

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Generalidades

Esse trabalho foi executado em etapas conforme o fluxograma apresentando pela Figura 10.

Figura 10- Fluxograma das etapas da execução do trabalho.



Fonte: Própria autora.

4.2 Qualidade das águas de bacias hidrográficas – Bacia do Peixe (UGRHI 21)

Como o intuito desse trabalho se destina à retenção de partículas finas em água e efluentes, foram selecionadas concentrações de partículas finas usualmente encontradas em pontos de captação de água, esgoto bruto e lodo de esgoto.

Os pontos de captação de água possuem características próprias da bacia hidrográfica a que pertencem. Sabendo disso, a partir de informações da CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo em relação à criticidade à erosão no Estado de São Paulo foi selecionada a Bacia hidrográfica da Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHI) 21 – Peixe, devido ao seu alto índice de suscetibilidade à erosão (Tabela 5), para determinação de faixa de valores típicos de sólidos totais (ST) para a confecção da água sintética.

Dessa forma, as concentrações de sólidos totais da Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos - Bacia do Peixe (UGRHI-21) foram obtidas a partir de relatórios de monitoramentos bimestral da CETESB.

Os dados de sólidos totais e turbidez coletados referentes a amostras de cinco pontos ao longo da bacia foram organizados, obtidos seus valores de N, máximo, mínimo, mediana, média aritmética, 1º quartil e 3º quartil. A partir disso, foram gerados gráficos *boxplot* pelo Excel para melhor visualização dos valores obtidos. Gráficos apresentam a média da concentração de sólidos totais e turbidez na Bacia do Peixe (UGRHI – 21).

Tabela 5- Suscetibilidade à erosão no Estado de São Paulo (em % de área de UGRHI)

UGRHI	Alta	Média	Baixa
1 - Mantiqueira	94,2	5,6	0,2
2 - Paraíba do Sul	61,4	21,3	17,3
3 - Litoral Norte	84,2	0	15,8
4 - Pardo	46,1	9,8	44
5 - Piracicaba / Capivari/ Jundiaí	45,5	14,5	40
6 - Alto Tietê	45,3	8	46,7
7 - Baixada Santista	38	0	62
8 - Sapucaí / Grande	12,9	5,4	81,7
9 - Mogi-Guaçu	25,2	31,2	43,6
10 - Tietê / Sorocaba	25,1	24,5	50,4
11 - Ribeira de Iguape / Litoral Sul	63	5,9	31,1
12 - Baixo Pardo / Grande	7,7	41,3	51
13 - Tietê / Jacaré	16,4	57,9	25,6
14 - Alto Paranapanema	26,4	20,6	52,9
15 - Turvo / Grande	52,6	35,7	11,8
16 - Tietê / Batalha	77	17,1	5,9
17 - Médio Paranapanema	35,5	31,4	33,1
18 - São José dos Dourados	78,7	16,7	4,6
19 - Baixo Tietê	50,2	43,3	6,5
20 - Aguapeí	84,5	11,1	4,4
21 - Peixe	84,6	12,4	3,1
22 - Pontal do Paranapanema	56,5	33,4	10,1
Estado de São Paulo	47,8	22,9	29,3

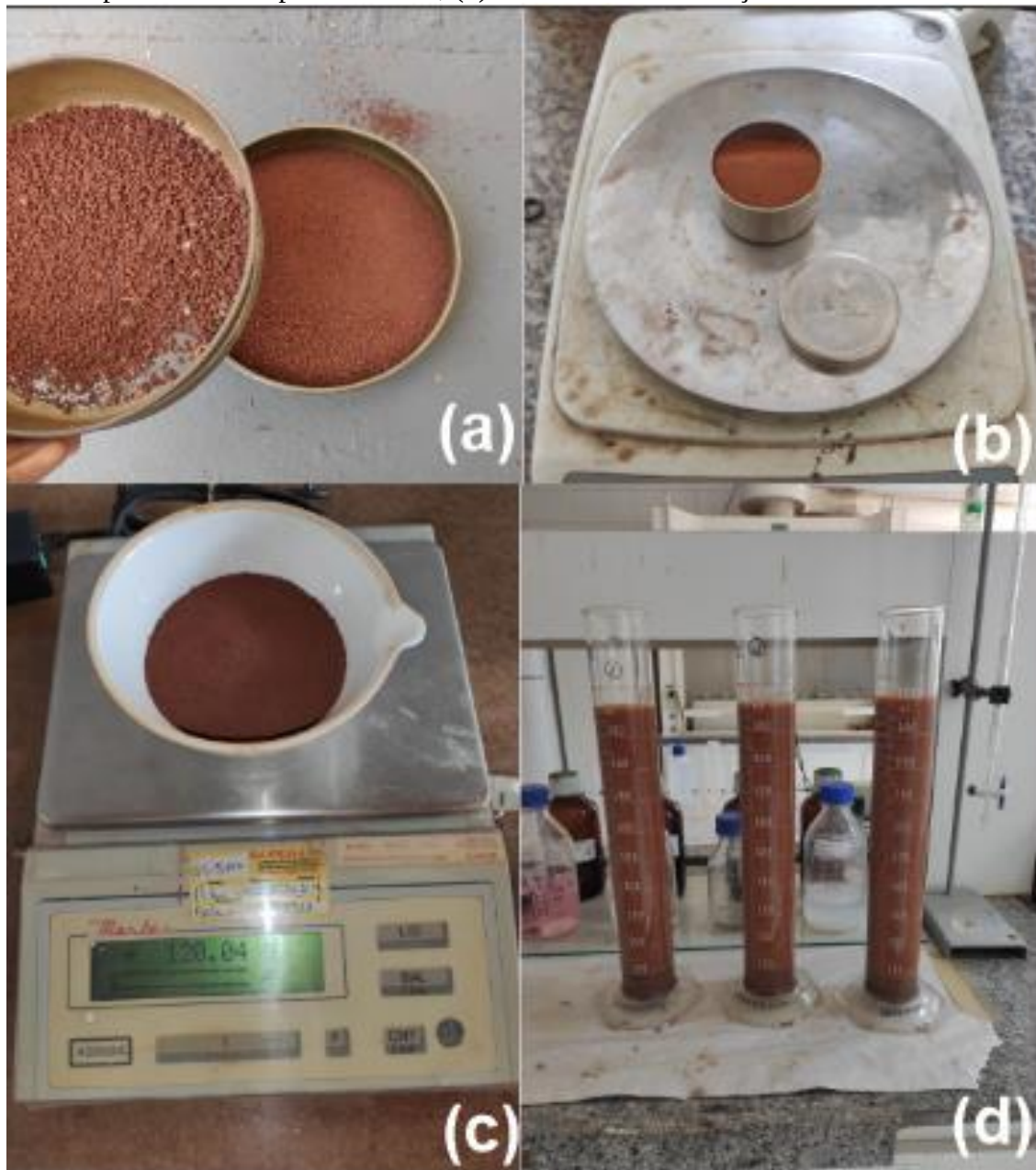
Fonte: (COBRAPE, 2020)

4.3 Caracterização da água sintética

A água sintética utilizada para o estudo foi produzida no Laboratório de Saneamento da FEIS-UNESP. O material selecionado para confecção da água sintética foi um solo regional devido à variabilidade granulométrica das partículas de areia, argila e silte. O solo classificado como Argissolo Vermelho Amarelo Eutrófico foi coletado no município de Jales – SP. Foi realizado o ensaio de granulometria do solo conforme a ABNT NBR 6457 “Amostras de solo – Preparação para análises de compactação e ensaios de caracterização” e ABNT NBR 7181 “Solo – Análise granulométrica” para determinação da quantidade de solo que seria dissolvida em água.

Como o intuito do trabalho foi analisar o desempenho do aparato na remoção de partículas finas, para a limitação do tamanho dos grãos o solo foi peneirado em malha de 2 mm (Figura 11 (a)). Além do peneiramento, foi separada uma amostra para secagem em estufa em 105 °C por 24 horas para determinação da umidade (Figura 11 (b)), outra amostra com massa em torno de 120 gramas foi separada para lavagem, secagem e peneiramento em jogo de malhas (Figura 11 (c)), por fim, foi separada a amostra para determinação da sedimentação das partículas (Figura 11 (d)).

Figura 11 - Ensaio para determinação da granulometria do solo. (a) Peneiramento do solo em malha 2 mm; (b) Pesagem da amostra para determinação da umidade higroscópica; (c) Pesagem da amostra para ensaio de peneiramento; (d) Ensaio de sedimentação



Fonte: Própria autora.

Para a determinação da massa de solo a ser inserida para concentração de sólidos tipicamente encontrados nos efluentes domésticos, foi utilizada a Tabela 6 que apresenta a composição típica de esgoto doméstico bruto. Além disso, foi utilizada a concentração média de sólidos totais da UGRHI 21- Bacia do Peixe localizada na região de Presidente Prudente – SP.

Com base na curva granulométrica do solo e considerando a porcentagem referente à fração do silte e areia fina obtidos nos ensaios, foram calculadas as massas de solo que, em condições ideais, misturadas com a água, apresentariam valores de concentração de sólidos totais similares ao das concentrações selecionadas. Portanto, foram utilizadas as massas de 1,9 kg do solo selecionado para a água sintética tipo I para simular uma concentração de sólidos totais próxima aos valores de ST da bacia hidrográfica selecionada e 10 kg de solo para fabricação da água sintética tipo II com uma concentração típica baixa de ST encontrado em esgotos domésticos (Tabela 7).

Tabela 6 – Composição típica de esgoto doméstico bruto

Constituinte	Unidade	Concentração		
		Baixa	Média	Alta
Sólidos Totais (ST)	mg/L	537	806	1612
Sólidos Dissolvidos Totais (SDT)	mg/L	374	560	1121
Fixos	mg/L	224	336	672
Voláteis	mg/L	150	225	449
Sólidos Suspensos Totais (SST)	mg/L	130	195	389
Fixos	mg/L	23	43	86
Voláteis	mg/L	101	152	304
Sólidos Sedimentáveis	mg/L	8	12	23

Fonte: Adaptado de Tchobanoglous *et al.* (2016).

Sendo assim, o solo foi misturado com 1.500 L de água obtida pela rede de água fria do Laboratório de Saneamento da FEIS/UNESP no tanque de homogeneização que consistia num reservatório de polietileno de 2.000 L com agitador mecânico, bomba submersível e medidor de vazão.

Tabela 7 – Composição da água sintética utilizada no experimento

Descrição	Massa de solo (kg)	Volume de água (L)	Potência do agitador (Watts)
Água sintética tipo I	1,90	1.500	184
Água sintética tipo II	10,00	1.500	184

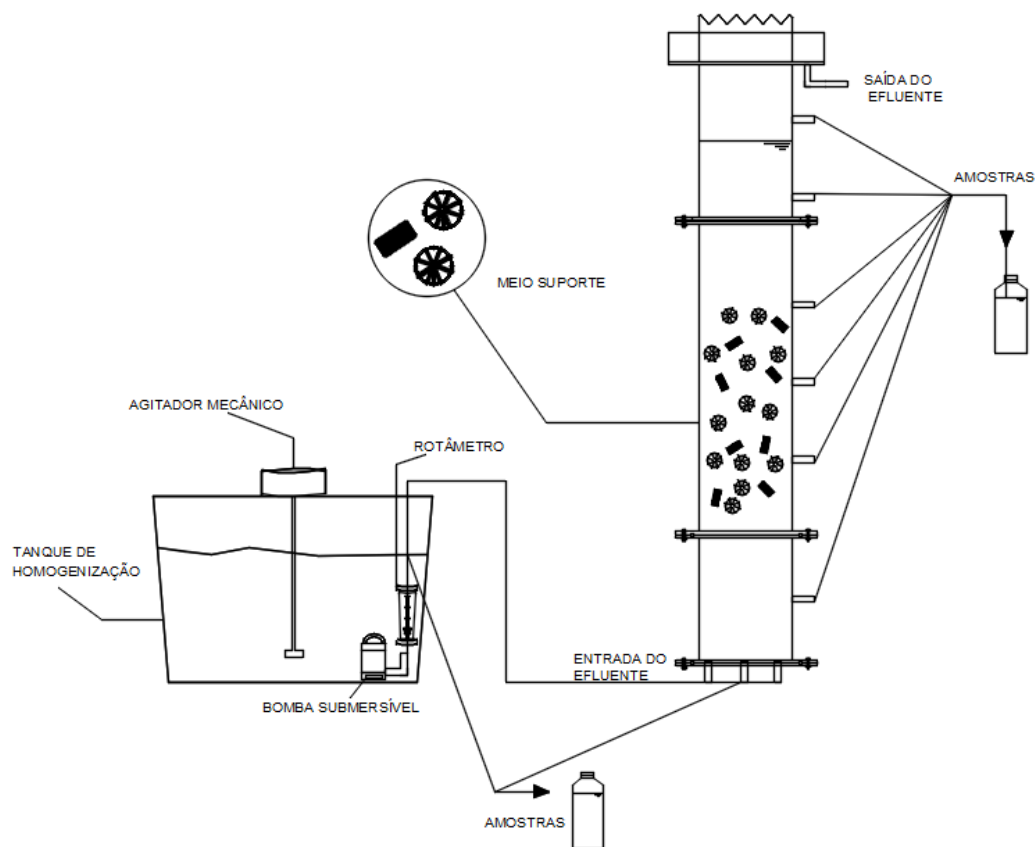
Fonte: Própria autora.

4.4 Aparato experimental

O aparato experimental foi composto por um tanque de homogeneização de afluente sintético, tubulação de entrada distribuidora e um reator de fluxo ascendente com meio suporte fluidizável operando sob diferentes alturas de leito. Foram dispostos registros ao longo do equipamento para a coleta de amostras. A ilustração geral do procedimento experimental está apresentada na Figura 12.

O aparato foi montado e operado no laboratório de Saneamento da Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (FEIS/UNESP), campus de Ilha Solteira –SP.

Figura 12 – Esquema geral do aparato e procedimento experimental



Fonte: Própria autora

4.4.1 Montagem e descrição geral das instalações

Para a investigação experimental da retenção de sólidos finos em diferentes fatores de enchimento de meio suporte, foi construído um aparato com diâmetro de 0,3 m e altura total de 2,10 m, construído com tubo de PVC rígido e 3 pares de flanges com diâmetro de 455 mm e

um flange de 500 mm fabricadas em placa de PVC de 10 mm. Os flanges estão compreendidos na altura de 0,4 m, 1,40 m e 1,90 m, respectivamente, fixadas por 12 (doze) parafusos de aço inox equidistantes e vedadas por um cordão de borracha nitrílica tipo *O-ring* de diâmetro 9 mm.

Os pares de flanges posicionados na altura 0,4 m e 1,40 m do aparato fixam uma tela em aço inox com espessura de chapa de 1,5 mm e diâmetro de furo de 21 mm. O objetivo da tela foi reter o meio suporte para que o contato do fluido fosse posterior à distância de interferência entre os jatos de entrada distribuída. Os jatos de entrada distribuída servem para uniformizar o fluxo de alimentação da água sintética e foram dimensionados em quatro entradas de flange adaptador PVC 13 mm.

O meio suporte (Figura 13) composto por polipropileno no formato cilíndrico de ranhura externa e raios internos, com altura de 15 mm e diâmetro de 30 mm, com peso de 192 kg/m³ e área superficial total de 680 e 520 m²/m³ de área superficial protegida, as características do produto estão apresentadas no Tabela 8. O meio suporte ficou disposto entre as telas de aço inox (1,0 m) em diferentes porcentagens de empacotamento durante os ensaios.

Figura 13 - Meio suporte fluidizável



Fonte: Própria autora

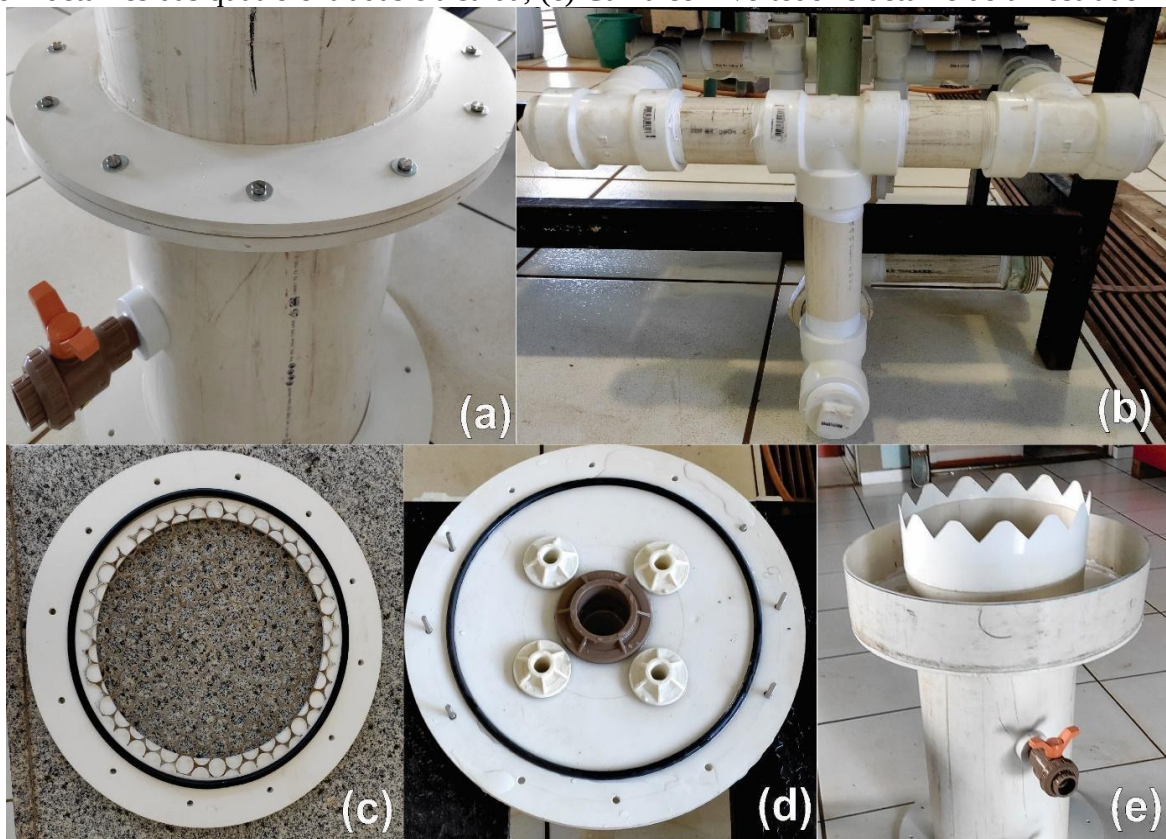
Tabela 8 - Características do meio suporte utilizado

Material	Altura / Diâmetro	Formato	Quantidade de peças por m ³	Peso por m ³	Área superficial total	Área superficial protegida
Polipropileno	15 mm x 30 mm	Cilíndrico com ranhura externa	60000	192kg	680 m ² /m ³	520 m ² /m ³

Fonte: ALTAMAR SISTEMAS AQUÁTICOS

Foram dispostos 6 (seis) registros de esfera soldáveis de 32 mm instalados na altura de 0,2 m, 0,45 m, 0,70 m, 0,95 m, 1,25 m e 1,50 m, respectivamente, ao longo da altura do decantador para a coleta de amostras. Os vertedores triangulares foram fabricados com uma placa de PVC de 1 mm colados em 0,08 m de tubo de PVC de 300 mm, fixados no flange de 500 mm de diâmetro para a coleta do líquido tratado. O coletor foi feito com 0,2 m de tubo de PVC rígido de 500 mm, o qual foi fixado junto o flange. O coletor possuía no flange de 500 mm quatro furos de 25,4 mm, dos quais 2 foram isolados com plug de PVC roscável e os outros dois compreendem tubos de saída PVC roscável de 25,4 mm que lançava o fluido para o tanque de descarte. Um registro esfera metálico de 50,8 mm foi conectado a um tubo de PVC de 50,8 mm e um flange no centro da base do reator para descarga. A Figura 14 mostra os detalhes da montagem do aparato experimental.

Figura 14 - Detalhes do aparato experimental: (a) Disposição dos parafusos no flange; (b) Tubulação de entrada do aparato; (c) Flange com a tela de aço inox e cordão O'ring; (d) Flange com detalhes das quatro entradas e a saída; (e) Calha com vertedor e detalhe do amostrador



Fonte: Própria autora.

O tanque de homogeneização compreendeu um reservatório de polietileno de 2.000 L, disposto de uma bomba submersível rotor aberto de 368 Watt, seguida de um medidor de vazão e um agitador de 184 Watt (Figura 15). O sistema de entrada do afluente foi dimensionado a fim de dividir o fluxo em quatro partes, priorizando conexões que facilitavam a montagem e

manutenção do mesmo. A vazão de operação medida durante os ensaios pelo medidor de vazão tipo rotâmetro foi na faixa de 0,67 a 1,0 L/s. O volume do decantador de leito móvel, aparato experimental, analisado foi 0,071 m³ e o tempo de detenção hidráulica (TDH) da operação variou entre 70,8 s a 106,2 s.

O agitador operou sobre gradiente de velocidade de 856,47 s⁻¹ a 494,48 s⁻¹ devido a diferença do volume do tanque ao longo do tempo de ensaio. O agitador era composto por uma haste de 0,5 m e uma hélice com altura de 0,02 m e 0,10 m de diâmetro. A distância entre a hélice e o fundo do tanque era de 0,10 m.

Figura 15 - Tanque de homogeneização utilizado para manutenção das partículas finas em suspensão.



Fonte: Própria autora.

4.4.2 Premissas utilizadas para definição da montagem do aparato

4.4.2.1 Distância de interferência dos jatos de entrada

Para a determinação da altura que estaria disposto o meio suporte, a fim de uniformizar o fluxo de entrada do fluido, o modelo de Camp (1961) foi empregado, conforme a Equação 11.

$$G = \frac{D}{S} \sqrt{\frac{\pi U^3}{8 C_d^2 \nu x}} \quad \text{EQ.11}$$

G = gradiente de velocidade (s^{-1});

D = diâmetro do orifício (m);

S = espaçamento entre os eixos dos orifícios adjacentes (m);

U = velocidade média de passagem da água no orifício (m/s);

C_d = coeficiente de descarga dos orifícios;

ν = viscosidade cinemática da água (m^2/s);

x = distância percorrida pelos jatos até que haja interferência entre eles (m).

4.4.2.2 Agitador

Para a determinação da configuração do conjunto do agitador, foi calculado o número de potência (Equação 12), número de Reynolds (Equação 13) e o gradiente de velocidade da bomba (Equação 14). O motor utilizado é modelo KM-10 da marca Kohlbach S.A. e possui 1720 rpm, potência 184 Watt e fator de segurança de 1,10.

$$N_p = \frac{P}{n^3 \rho D^5} \quad \text{EQ.12}$$

$$Re = \frac{n \rho D^2}{\mu} \quad \text{EQ.13}$$

Nas quais:

N_p = número de potência;

Re = número de Reynolds;

A_s = área projetada da partícula na direção do movimento (m^2);

n = número de rotações por segundo da hélice;

D = diâmetro da turbina (m);

ρ = massa específica da água (102 kgf.s²/m⁴)

P = potência do agitador (W).

μ = viscosidade absoluta da água (10⁻⁴ kgf.s/m²).

$$G_m = \sqrt{\frac{P}{\mu V}} \quad \text{EQ.14}$$

Nas quais:

G_m = gradiente de velocidade (s⁻¹);

V = volume (m³);

P = potência do agitador (W).

Para valores de Reynolds superiores a 10000, o número de potência permanece constante e igual a cinco (VIANNA, 2014).

As relações geométricas usuais para dimensionamento de tanques de agitação são expressas na Tabela 9. Onde H representa a altura do líquido, b a altura da hélice, h a distância entre a hélice e o fundo do tanque, e a largura da chicana, D o diâmetro ou comprimento da hélice, B a largura da pá da hélice e o L o diâmetro ou comprimento do tanque.

Tabela 9- Relações geométricas para dimensionamento de agitadores

Relações geométricas da turbina		
$2,7 \leq L/D \leq 3,3$	$2,7 \leq H/D \leq 3,9$	$0,75 \leq h/D \leq 1,3$
$B = D/4$	$b = D/4$	$e/D = 0,10$

Fonte: Adaptado de Vianna (2014)

4.5 Procedimento experimental

Os ensaios realizados tiveram como principal objetivo analisar o comportamento do aparato em relação a remoção de sólidos e turbidez da água sintética.

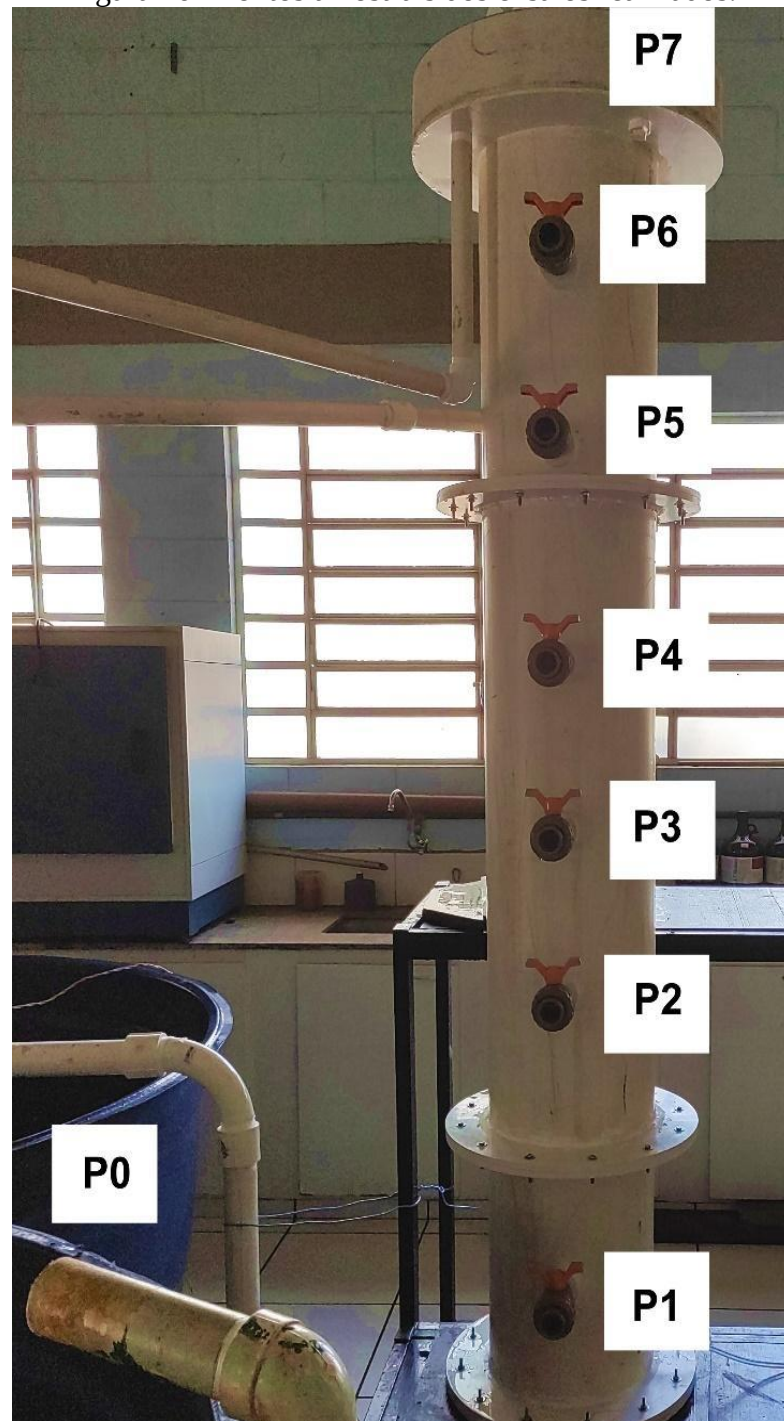
4.5.1 Ensaios preliminares

Para avaliar o desempenho do aparato após a montagem, o sistema foi operado sob fluxo contínuo em regime de recirculação durante cinco horas e as amostras foram coletadas em um frasco de polietileno de 500 mL no taque e na saída do vertedor a cada 30 minutos dentro de um período de cinco horas. O efluente utilizado para esse procedimento foi a própria água suja proveniente da limpeza dos reservatórios que estavam empoeirados devido à disposição ao ar livre de ambos. O intuito inicial era avaliar se o aparato daria indícios de remoção das partículas presentes no tanque e por isso foram realizadas análises de turbidez e sólidos totais.

4.5.2 Realização dos ensaios e coleta das amostras

Os pontos foram nomeados conforme apresenta a Figura 16, e selecionados dessa forma a fim de entender o fluxo das partículas ao longo do aparato. Para uma melhor compreensão e confiabilidade dos resultados, para cada concentração, os ensaios foram repetidos 3 vezes para todos os pontos e 6 vezes para os pontos P0, P1 e P7.

Figura 16 - Pontos amostrais dos ensaios realizados.



Fonte: Própria autora

Os flanges situados entre P1 e P5 tinham distância de 1 metro entre elas e as telas em aço inox que funcionaram como barreira física para o meio suporte. O decantador de leito móvel operou em cinco diferentes configurações, sendo os primeiros ensaios realizados com o leito sem mídia. A segunda configuração consistia em 0,25 metros de mídia dentro do leito, correspondente a 25% de empacotamento do leito. A terceira e quarta configuração consistiam em 0,50 m e 0,75 m de meio suporte no leito, respectivamente, equivalente a 50% e 75% de empacotamento. A quinta configuração, equivalente a 100% de empacotamento do leito, com 1 metro de meio suporte no seu interior. A última configuração também corresponde a situação onde o meio suporte não teve movimentação em seu interior, tornando-o leito fixo. A desmontagem era realizada através dos parafusos nos flanges.

Para a determinação do tempo de ensaio, foi observada a vazão de operação da bomba submersível e o tempo médio de esvaziamento do tanque em fluxo contínuo. O tanque operou com volume médio de 1.500 L, com a vazão de operação entre 0,67 a 1,0 L/s e de acordo com essas observações, foi determinado o tempo de execução do ensaio em 12 minutos.

Com a determinação do tempo de ensaio, foram tomados períodos entre as coletas, isto posto, foram utilizadas garrafas de polietileno de 0,5 L para a coleta de amostras a cada 4 minutos em cada um dos pontos selecionados (i.e., 0 min, 4 min, 8 min e 12 min) para análise de parâmetros físicos de qualidade da amostra no laboratório. No fim do ensaio era aberta a válvula de descarga, a fim de retirar as partículas que ficaram depositadas na base do reator.

4.6 Análises realizadas

4.6.1 Frequência e método de análise

A frequência das análises realizadas é apresentada na Tabela 10. Os parâmetros avaliados foram: turbidez (NTU) e ST (mg/L).

Tabela 10 - Frequência e pontos analisados para a determinação da remoção das partículas finas pelo aparato experimental

Ponto	Parâmetro	Turbidez	Sólidos Totais
P0, P1, P7	Análise	X	X
	Frequência	4 min	4 min
	Repetições	6	6
P2, P3, P4, P5, P6	Análise	X	X
	Frequência	4 min	4 min
	Repetições	3	3

Fonte: Própria autora.

A metodologia *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2017) foi empregada para análise das amostras. A Tabela 11 apresenta a descrição do método e os materiais e equipamentos utilizados.

Tabela 11 - Síntese do método, materiais e equipamentos utilizados nas análises laboratoriais

Parâmetro	Método	Precisão	Materiais e Equipamentos Utilizados
Turbidez	Nefelométrico	0,01	- Turbidímetro Hach 2100AN - Cubeta
Sólidos Totais	Gravimétrico	1,0	- Cápsula de secagem de porcelana Chiarotti 115 mL - Balança analítica SHIMADZU AY220 - Banho Maria QUIMIS Q334-28 - Capela para exaustão de Gases Marconi MA956/10 - Estufa Fanem 315 SE - Dessecador Pyrex 300mm - Mufla

Fonte: Própria autora.

4.6.2 Análise dos resultados

Os dados da concentração de água sintética tipo I e tipo II foram analisados de forma descritiva com cálculos de médias, medianas, mínimos, máximos e desvio padrão por meio do software *Jamovi*. Os resultados foram plotados em forma de gráficos gerados no *Excel* e no *Jamovi*.

O *SigmaPlot* foi utilizado para execução do teste de Shapiro-Wilk no qual foi avaliada a distribuição dos dados amostrais foi semelhante à distribuição normal. O teste paramétrico ANOVA One-Way e o teste complementar de Tukey também foram utilizados para analisar a significância da variabilidade das diferenças de tratamentos empregados nesse estudo. Para as amostras não paramétricas, foi empregado o teste Kruskal-Wallis e o teste complementar de Dunn.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Dados de concentração da bacia hidrográfica de referência para aporte de sólidos

As Tabelas 12 e 13 apresenta a estatística descritiva dos dados de turbidez e ST referentes as amostras de cinco pontos ao longo da bacia, obtidos seus valores de N, máximo, mínimo, mediana, média aritmética, 1º quartil e 3º quartil. A partir dos resultados, foram gerados diagramas tipo *boxplot* (Figuras 17 e 18) por meio do Excel para melhor visualização dos valores obtidos. A Figura 19 mostra a média da concentração de sólidos totais e turbidez ao longo de cinco pontos de amostragem da CETESB na Bacia do Peixe (UGRHI – 21) entre os anos de 2015 a 2019.

Os dados apresentados na Tabela 12 mostram maior concentração de sólidos totais nas amostras coletadas nos meses de fevereiro com média de $274,3 \pm 137$ mg/L, seguidas das amostras coletadas nos meses de dezembro com média de $232,4 \pm 82$ mg/L. A menor concentração de sólidos presentes foi de $145,7 \pm 36$ mg/L nas amostras coletadas são referentes aos meses de junho.

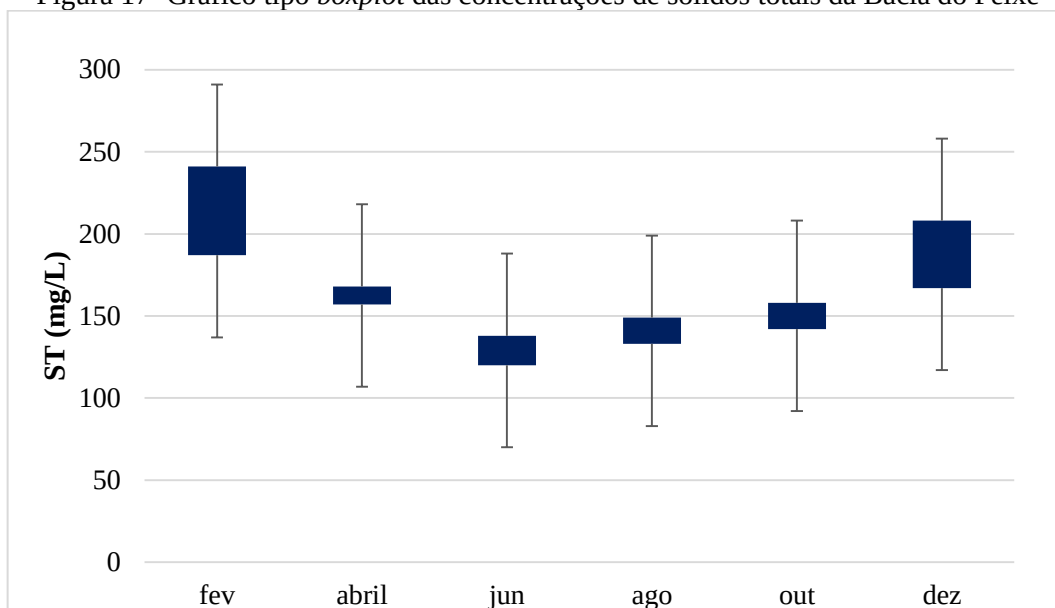
Tabela 12- Estatística descritiva das concentrações de sólidos totais da Bacia do Peixe

	Fevereiro	Abril	Junho	Agosto	Outubro	Dezembro
N	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0
Mínimo	125,0	128,0	99,0	108,0	99,0	135,0
Máximo	732,0	298,0	261,0	542,0	314,0	433,0
Média	274,3	178,8	145,7	173,3	174,8	232,4
Mediana	241,0	168,0	138,0	149,0	158,0	208,0

Fonte: Própria autora com base em dados da CETESB (2020).

Devido à alta suscetibilidade de erosão da Bacia do Peixe, as maiores concentrações de sólidos totais encontrados no período chuvoso são justificadas pelo carreamento das partículas decorrente das chuvas. As partículas são produto da erosão do solo e do intemperismo das rochas, além disso, a impermeabilidade das bacias urbanas aumenta o volume de água escoada e consequentemente o carreamento de partículas (SCHLEISS *et al.*, 2016; COBRAPE 2020; SASIDHARAN *et al.*, 2021).

A curva apresentada na Figura 17 mostra a concentração de sólidos totais ao longo do ano, em que os períodos chuvosos apresentam os maiores valores em relação as amostras coletadas nos meses de período de estiagem. Os valores de mediana variaram entre 149 mg/L a 241 mg/L.

Figura 17- Gráfico tipo *boxplot* das concentrações de sólidos totais da Bacia do Peixe

Fonte: Própria autora com base em dados da CETESB (2020).

Em relação aos dados de turbidez (Tabela 13), a maior média de turbidez foi obtida também nas amostras dos meses de fevereiro com média $147,7 \pm 164$ NTU, em sequência das amostras dos meses de dezembro com média $89,9 \pm 86$ NTU. A menor média de valores de turbidez foi obtida nas amostras dos meses de junho $26,1 \pm 18$. Semelhantemente aos resultados de sólidos totais, as amostras de turbidez apresentaram respostas ao período chuvoso, com maiores valores nos meses de fevereiro e dezembro e menores valores no período de seca.

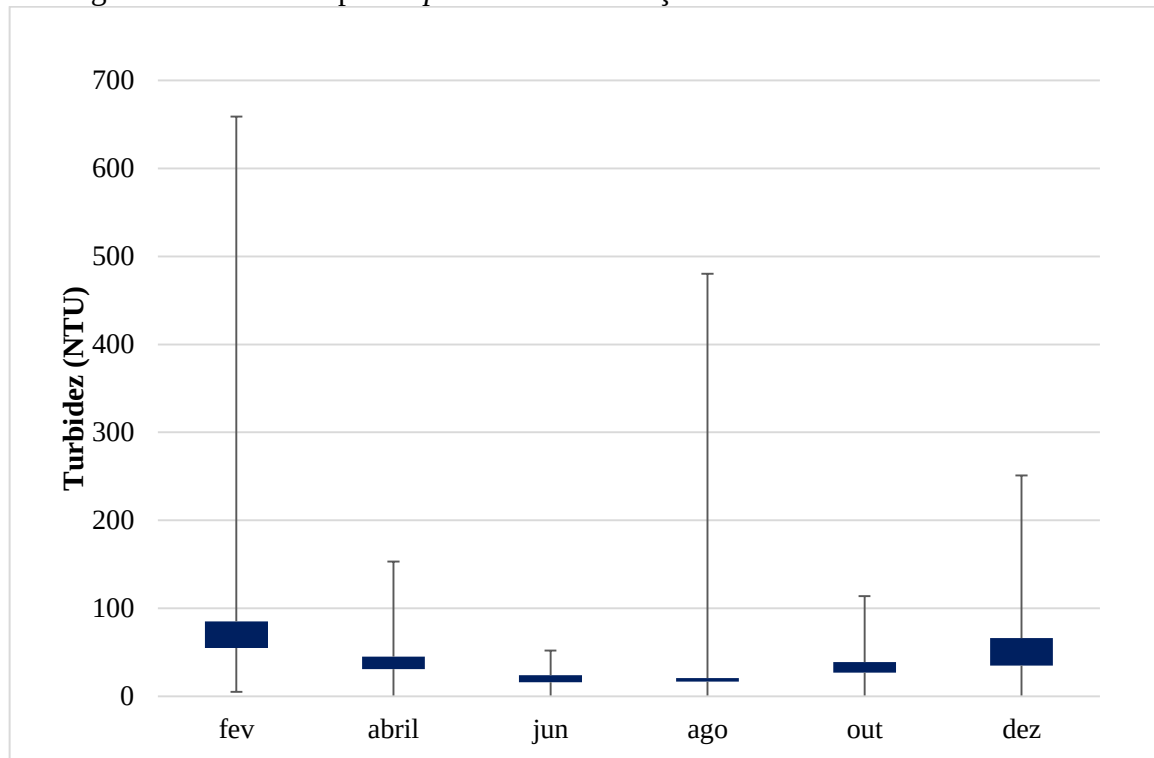
Tabela 13 - Estatística descritiva das concentrações de turbidez da Bacia do Peixe

	Fevereiro	Abril	Junho	Agosto	Outubro	Dezembro
N	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0
Mínimo	1,3	1,1	1,6	1,3	1,4	1,1
Máximo	737,0	169,0	64,0	490,0	132,0	300,0
Média	147,7	47,1	26,1	53,4	46,5	89,9
Mediana	85,0	45,0	24,0	20,5	39,0	66,0

Fonte: Própria autora com base em dados da CETESB (2020).

A Figura 18 apresenta o gráfico tipo *boxplot* com comportamento semelhante ao de sólidos totais. Entretanto, a maior dispersão dos valores máximos e mínimos mostrou limites superiores maiores do gráfico de turbidez em relação ao gráfico *boxplot* de sólidos totais.

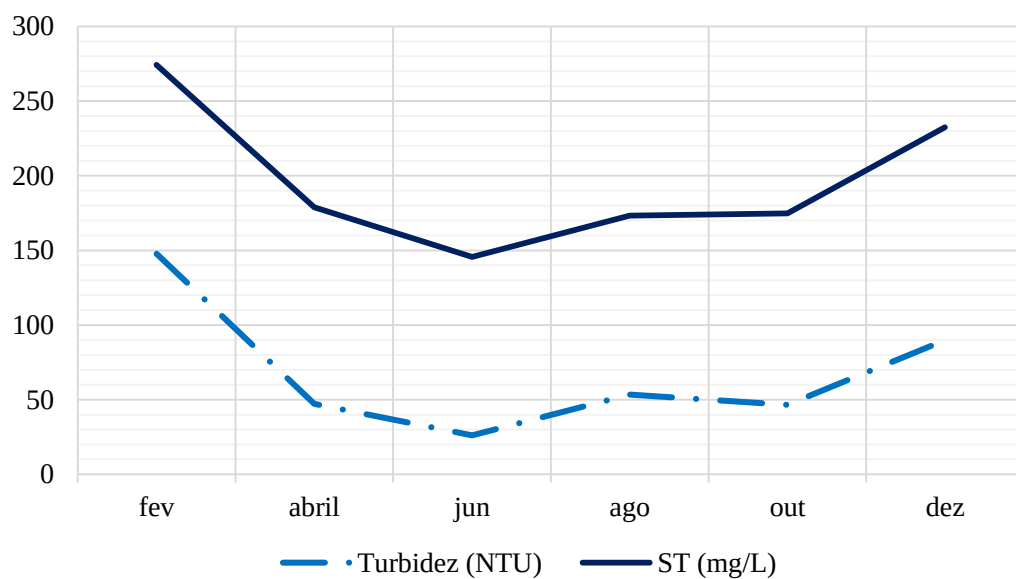
Figura 18 - Gráfico tipo *boxplot* das concentrações de turbidez da Bacia do Peixe



Fonte: Própria autora com base em dados da CETESB (2020)

Os valores médios de concentração de sólidos totais (mg/L) e turbidez (NTU) apontados na Figura 19, foram tomados como premissas para elaboração da água sintética tipo I. Entretanto, devido à alta variação anual dos parâmetros analisados, a água sintética tipo II também pode corresponder aos dados coletados da UGRHI 21.

Figura 19 - Média das concentrações de ST e Turbidez da Bacia do Peixe

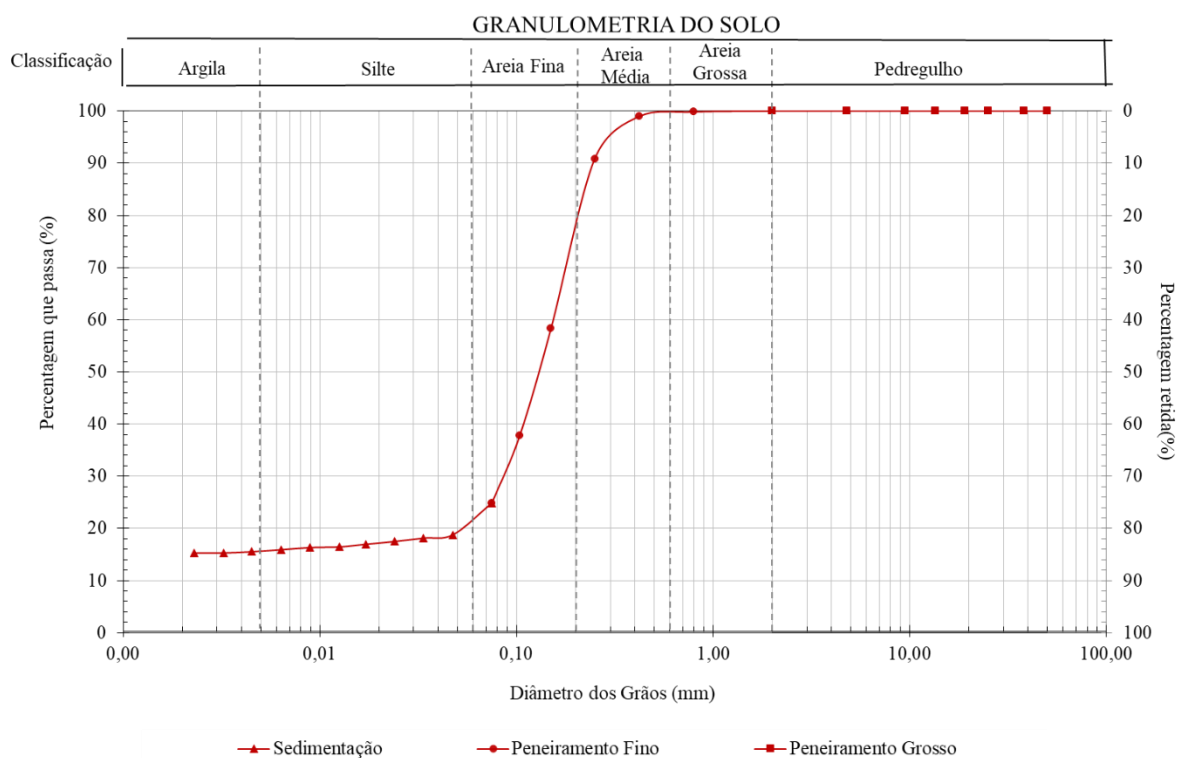


Fonte: Própria autora com base em dados da CETESB (2020).

5.2 Caracterização do solo utilizado na confecção da água sintética

A granulometria do solo utilizado para confecção da água sintética está apresentada na Figura 20 e foi utilizada como base de decisão na quantidade necessária de solo que foi acrescido à água no tanque de homogeneização. As frações de solo caracterizadas pelo ensaio de granulometria e sedimentação apresentam 59,7% de areia (58,7% areia fina e 1,0% de areia média), 14,4% de argila e 9,3% de silte.

Figura 20 - Granulometria do solo utilizado na preparação da água sintética tipo I e tipo II



Fonte: Própria autora.

A umidade higroscópica do solo ensaiado é apresentada na Tabela 14.

Tabela 14 - Umidade higroscópica do solo

Variável	N	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão
Massa úmida (g)	6	31,16	37,35	34,34	2,47
Massa seca (g)	6	31,08	37,22	34,2	2,45
Umidade (%)	6	0,26	0,620	0,41	0,16

Fonte: Própria autora

5.3 Turbidez

A turbidez é um parâmetro físico relacionado a interferência da passagem de luz ocasionada pelas partículas em suspensão (VIANNA, 2014). Portanto, os ensaios de turbidez foram empregados para determinar a retenção das partículas finas no decantador de leito móvel. Os resultados apresentados foram classificados pela composição do líquido ensaiado e pelo empacotamento do leito móvel (i.e.: 0%, 25%, 50%, 75% e 100%). A água sintética tipo I era composta de 1.500 L de água e 1,9 kg do solo selecionado e a água sintética tipo II por 1.500 L de água e 10 kg do solo selecionado.

5.3.1 Avaliação da turbidez: Água sintética tipo I

5.3.1.1 Leito sem meio suporte

A análise estatística realizada com os dados coletados das amostras da água sintética tipo I quando o aparato experimental estava sem meio suporte no leito é apresentada na Tabela 15.

Os valores mínimo e máximo encontrados nessa configuração para o ponto de entrada (P0) foi 4,84 NTU e 16,10 NTU, respectivamente. Enquanto que, o ponto de saída (P7) apresentou valor mínimo de 5,39 NTU e máximo de 15,50 NTU.

As amostras coletadas na operação de 0, 4 e 8 minutos foram submetidas ao teste de normalidade (Shapiro-Wilk) e apresentaram p-valor $> 0,05$. Entretanto, as amostras coletadas em 12 minutos que apresentaram p-valor $< 0,05$ e, portanto, não são normalmente distribuídas.

As amostras que apresentaram distribuição normal foram submetidas ao ANOVA que constatou que nas amostras coletadas em 0 minutos não houve diferença estatística significativa entre os pontos. Por outro lado, as amostras coletadas em 4 e 8 minutos apresentaram p-valor $< 0,05$. Consequentemente, houve diferenças estatísticas e foram submetidos ao teste de Tukey, as amostras apresentaram diferenças estatísticas apenas entre os grupos P0 e P1 na operação de 8 minutos.

Os dados da operação em 12 minutos, foram submetidos ao teste de Kruskal-Wallis, entretanto não houve diferenças significativas entre os pontos. Tais resultados estão expressos na Tabela 16.

Tabela 15 - Estatística descritiva e teste de normalidade da turbidez das amostras de água sintética tipo I coletadas no aparato sem a inserção de meio suporte.

Tempo de Ensaio	Ponto	N	Média	Mediana	Desvio-padrão	Mínimo	Máximo	Shapiro-Wilk	
								W	p
0 min	P0	6	9,62	9,89	3,18	4,84	13,68	0,987	0,979
	P1	6	7,98	8,25	2,68	3,98	11,40	0,985	0,972
	P2	3	7,62	7,20	1,62	6,25	9,41	0,950	0,568
	P3	3	7,67	8,75	2,03	5,32	8,93	0,787	0,085
	P4	3	5,74	7,15	2,58	2,77	7,31	0,776	0,059
	P5	3	7,25	6,83	0,83	6,71	8,20	0,810	0,139
	P6	3	6,80	6,38	1,65	5,40	8,61	0,952	0,578
4 min	P7	6	9,14	9,16	3,65	5,39	13,80	0,854	0,170
	P0	6	9,43	8,75	1,78	7,78	12,30	0,880	0,268
	P1	6	6,79	6,54	1,22	5,35	9,05	0,828	0,102
	P2	3	6,62	5,57	1,82	5,56	8,72	0,752	0,005
	P3	3	7,13	6,84	1,62	5,68	8,87	0,976	0,702
	P4	3	6,47	5,45	1,90	5,31	8,66	0,781	0,071
	P5	3	6,43	5,80	1,42	5,43	8,05	0,854	0,250
8 min	P6	3	6,96	6,81	0,77	6,28	7,80	0,970	0,670
	P7	6	10,18	9,28	3,34	6,68	15,50	0,920	0,509
	P0	6	10,74	11,08	2,96	6,47	14,90	0,990	0,989
	P1	6	6,12	6,12	1,83	4,04	8,88	0,949	0,731
	P2	3	6,97	7,14	0,72	6,18	7,58	0,956	0,597
	P3	3	6,26	5,73	1,33	5,28	7,77	0,880	0,325
	P4	3	6,30	5,91	1,26	5,28	7,71	0,928	0,482
12 min	P5	3	6,92	6,98	1,12	5,77	8,01	0,998	0,911
	P6	3	7,09	7,72	1,48	5,40	8,16	0,866	0,284
	P7	6	9,31	8,79	2,92	5,69	13,60	0,962	0,837
	P0	6	9,02	7,59	3,61	6,71	16,10	0,714	0,009
	P1	6	6,12	5,68	1,65	4,18	8,50	0,929	0,572
	P2	3	5,96	5,15	2,01	4,47	8,25	0,880	0,324
	P3	3	7,00	6,93	1,64	5,39	8,67	0,999	0,933
	P4	3	7,34	6,41	2,27	5,69	9,93	0,873	0,304
	P5	3	6,57	6,10	1,26	5,62	8,00	0,894	0,366
	P6	3	6,55	5,58	2,06	5,15	8,91	0,835	0,200
	P7	6	9,17	8,00	3,27	6,13	14,00	0,871	0,231

Fonte: Própria autora

Tabela 16 - Resultados dos testes estatísticos de análise de variância das amostras de turbidez coletadas com leito sem enchimento de meio suporte

Tempo de operação	Distribuição das amostras	Análise de variância	H	p-valor	Teste de comparação múltipla	Diferenças entre pontos
0 min	Normal	ANOVA	-	0,544	-	-
4 min	Normal	ANOVA	-	0,038	Tukey	-
8 min	Normal	ANOVA	-	0,017	Tukey	P0 e P1
12 min	Não-normal	Kruskal-Wallis	8,816	0,266	-	-

Fonte: Própria autora.

Segundo Von Sperling (2014) a turbidez é um parâmetro físico caracterizado pela interferência da passagem da luz na água. Além disso, a turbidez representa a presença de sólidos suspensos, que geralmente ocorre por intermédio de partículas de areia e argila que servem de abrigo a microrganismos.

Quando a turbidez chega a 500 NTU a água é praticamente opaca. Os tratamentos de água geralmente exigem que águas brutas com turbidez superior a 50 NTU sejam antecedidas de coagulação química ou pré-filtro (VON SPERLING; 2014). Esperava-se que o aparato apresentasse resultados positivos mesmo sem a presença do meio suporte, pois a trajetória ascendente da água decantaria as partículas mais pesadas devido a sedimentação, o que pode ser observado sutilmente nos dados apresentados na Tabela 15. A comparação detalhada da eficiência do decantador é apresentada no tópico pertinente a eficiência de remoção de turbidez.

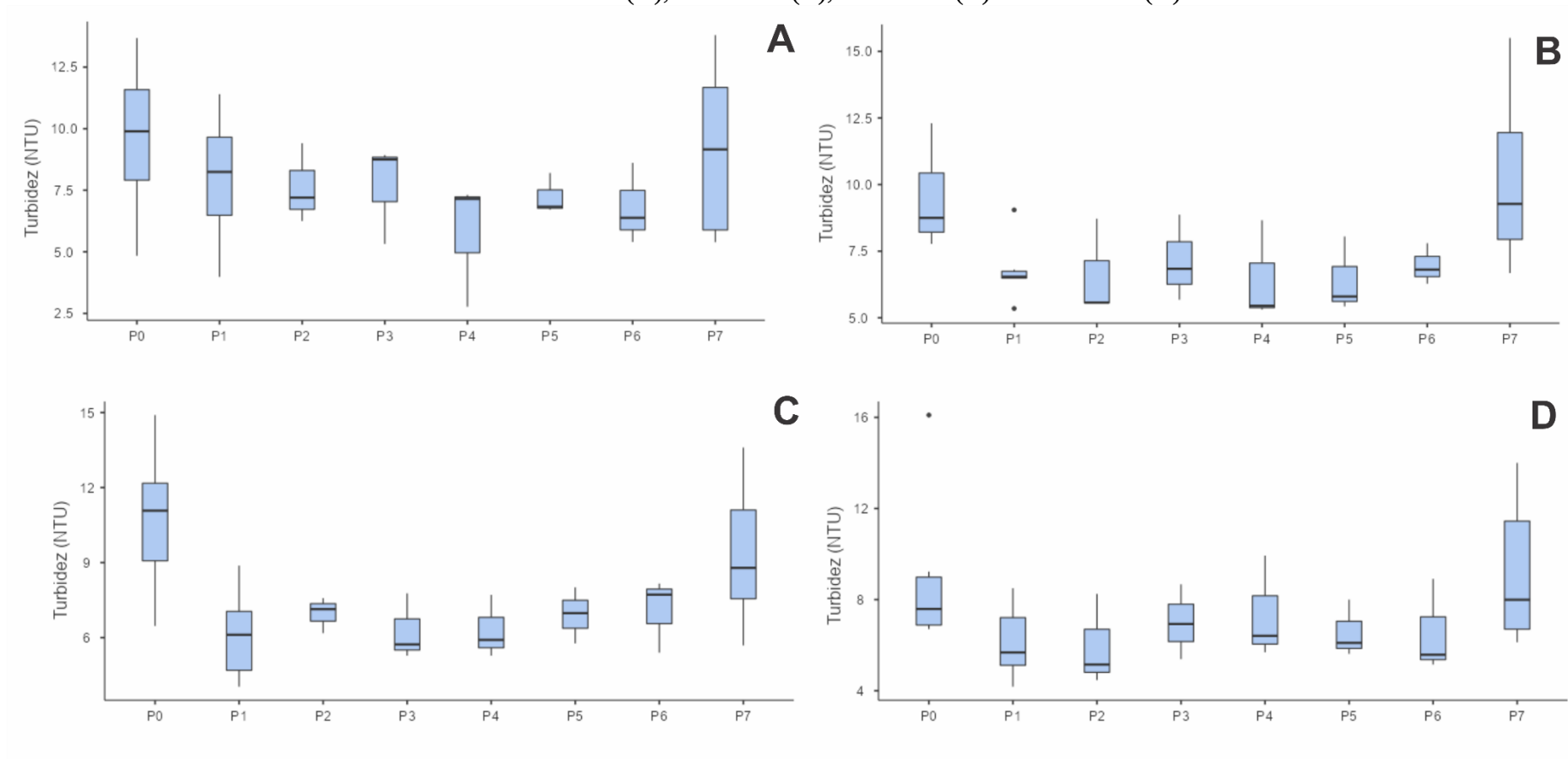
O gráfico de caixas *boxplot* (Figura 21) apresenta a distribuição das amostras ao logo dos grupos P0, P1, P2, P3, P4, P5, P6 e P7, na de operação de 0 minutos (A), 4 minutos (B), 8 minutos (C), e por fim 12 minutos (D).

As medianas das amostras de turbidez no leito sem a inserção de meio suporte mostram o comportamento das partículas no decantador. Os pontos com os maiores valores de medianas e maiores dispersões analisadas são P0 e P7, sendo os resultados de P7 decorrentes da passagem livre das partículas no leito, pois além das grelhas de aço inox, não havia barreiras físicas.

A Figura 21 (B) e Figura 21 (D) e a Tabela 15 mostram valores de turbidez em P7 sutilmente superiores aos de entrada (P0), comportamento decorrente da saída de partículas que possivelmente ficaram retidas nas grelhas e/ou depositadas no leito durante a operação.

Ao longo desse estudo, foram apresentados os resultados dos testes estatísticos para cada altura de enchimento do leito, entretanto foi possível observar que os resultados estatísticos indicados não foram satisfatórios. Todavia, como o intuito era investigar o comportamento do leito em diferentes situações, o estudo mostra apenas tendências de comportamento desenvolvidos e não resultados estatisticamente conclusivos. Para uma investigação mais assertiva, será necessário a repetição dos ensaios ou de um ensaio com um N definido a partir da margem de erro esperada. Valores de quartis e *outliers* significativos são mostrados em gráficos tipo *boxplot* com número amostral igual ou superior a 20.

Figura 21 - Valores de turbidez em cada ponto do aparato sem meio suporte para as amostras de água sintética tipo I coletadas no tempo de ensaio de 0 minutos (A), 4 minutos (B), 8 minutos (C) e 12 minutos (D).



Fonte: Própria autora

5.3.1.2 Leito com 25% de enchimento

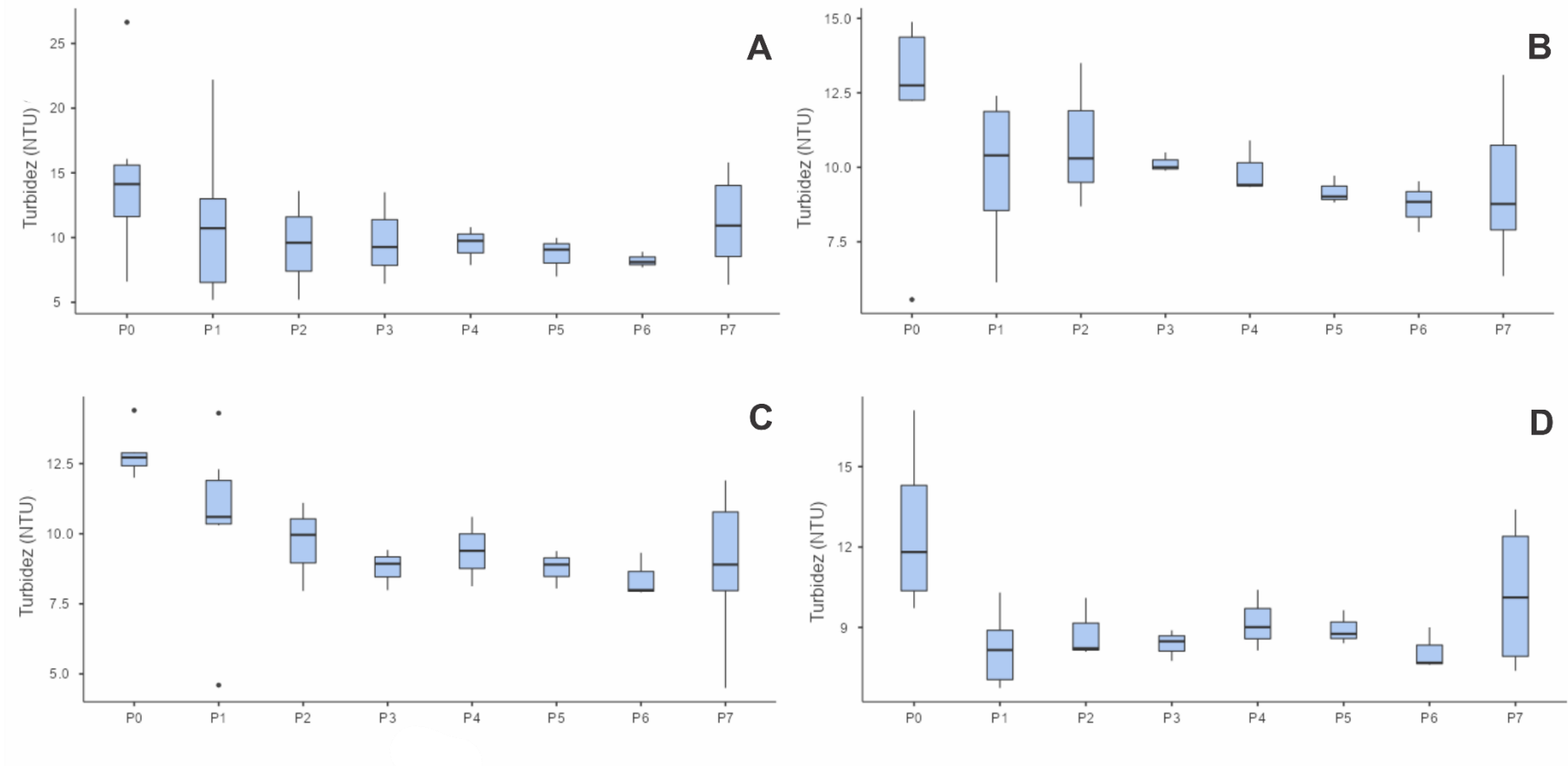
A estatística descritiva das amostras coletadas na configuração do aparato com o leito com 25% de enchimento está apresentada na Tabela 17. Com exceção das amostras coletadas na operação em 12 minutos, o teste de normalidade mostrou que a maioria das amostras não teve distribuição normal. A Figura 22 retrata o gráfico tipo *boxplot* com medianas, valores mínimos e máximos, percentis 25% e 75% e *outliers* referente aos dados apresentados na Tabela 17.

Tabela 17 - Estatística descritiva e teste de normalidade da turbidez das amostras de água sintética tipo I coletadas no aparato com enchimento de 25% de meio suporte.

Tempo de Ensaio	Ponto	N	Média	Mediana	Desvio-padrão	Mínimo	Máximo	Shapiro-Wilk	
								W	p
0 min	P0	6	14,73	14,13	6,72	6,60	26,64	0,914	0,465
	P1	6	11,29	10,72	6,28	5,19	22,20	0,903	0,393
	P2	3	9,47	9,60	4,20	5,21	13,60	0,999	0,949
	P3	3	9,74	9,27	3,55	6,44	13,50	0,987	0,782
	P4	3	9,48	9,75	1,48	7,88	10,80	0,974	0,693
	P5	3	8,68	9,07	1,53	7,00	9,98	0,952	0,578
	P6	3	8,24	8,11	0,61	7,70	8,90	0,968	0,655
	P7	6	11,14	10,93	3,76	6,37	15,80	0,93	0,578
4 min	P0	6	12,16	12,75	3,43	5,56	14,88	0,781	0,04
	P1	6	9,94	10,40	2,46	6,14	12,40	0,915	0,469
	P2	3	10,83	10,30	2,45	8,69	13,50	0,965	0,64
	P3	3	10,13	10,00	0,33	9,89	10,50	0,88	0,325
	P4	3	9,88	9,41	0,88	9,34	10,90	0,784	0,076
	P5	3	9,19	9,02	0,47	8,82	9,72	0,907	0,407
	P6	3	8,73	8,84	0,86	7,83	9,53	0,988	0,793
	P7	6	9,33	8,77	2,46	6,35	13,10	0,963	0,844
8 min	P0	6	12,85	12,72	0,83	12,00	14,40	0,858	0,184
	P1	6	10,45	10,60	3,24	4,60	14,30	0,884	0,288
	P2	3	9,67	9,96	1,59	7,96	11,10	0,976	0,7
	P3	3	8,78	8,93	0,73	7,99	9,42	0,968	0,657
	P4	3	9,37	9,39	1,24	8,13	10,60	1	0,978
	P5	3	8,78	8,90	0,67	8,05	9,38	0,975	0,696
	P6	3	8,41	7,99	0,79	7,91	9,32	0,792	0,097
	P7	6	8,88	8,90	2,67	4,50	11,90	0,941	0,67
12 min	P0	6	12,58	11,81	2,91	9,72	17,10	0,911	0,446
	P1	6	8,20	8,15	1,37	6,74	10,30	0,938	0,647
	P2	3	8,80	8,22	1,13	8,09	10,10	0,798	0,110
	P3	3	8,37	8,48	0,58	7,75	8,89	0,974	0,693
	P4	3	9,18	9,01	1,14	8,14	10,40	0,983	0,748
	P5	3	8,94	8,76	0,63	8,41	9,64	0,942	0,534
	P6	3	8,10	7,68	0,78	7,61	9,00	0,788	0,085
	P7	6	10,23	10,11	2,62	7,38	13,40	0,892	0,331

Fonte: Própria autora

Figura 22 - Valores de turbidez em cada ponto do aparato com enchimento 25% de meio suporte para as amostras de água sintética tipo I coletadas no tempo de ensaio de 0 minutos (A), 4 minutos (B), 8 minutos (C) e 12 minutos (D).



Fonte: Própria autora

O teste de Kruskal-Wallis para as amostras de 0 e 4 minutos não apresentou diferenças estatísticas entre os grupos. Por sua vez, as amostras da operação de 8 minutos apresentaram p-valor 0,019 e submetidas ao teste de Dunn foi observado diferenças estatísticas entre os grupos de P0 e P6. Os resultados das análises de variância estão apresentados na Tabela 18.

O valor máximo das amostras coletadas na entrada do sistema (P0) foi 26,64 NTU e na saída 15,80 NTU. O valor mínimo de turbidez apresentado foi de 5,56 NTU no P0 e 4,50 NTU no P7.

Os pontos P0, P1, P2, P3, P4, P5, P6 e P7 estão expressos na Figura 22 (A) apresenta o gráfico referente as amostras coletadas em 0 minutos de operação, Figura 22 (B) representas os dados de 4 minutos de ensaio, Figura 22 (C) e Figura 22 (D) os dados estatísticos das amostras coletadas em 8 e 12 minutos, respectivamente.

As medianas apresentadas na Tabela 17 e também no gráfico *boxplot* mostram que houve uma redução da concentração de turbidez ao decorrer do leito. Essa redução em parte é causada pela dificuldade de passagem imposta pelo meio suporte no leito e também pela ocorrência da decantação após o choque entre a partícula e o carreador.

Tabela 18 - Resultados dos testes estatísticos de análise de variância das amostras de turbidez coletadas com leito com enchimento de 25% de meio suporte

Tempo de operação	Distribuição das amostras	Análise de variância	H	p-valor	Teste de comparação múltipla	Diferenças entre pontos
0 min	Não-normal	Kruskal-Wallis	5,854	0,577	-	-
4 min	Não-normal	Kruskal-Wallis	7,264	0,402	-	-
8 min	Não-normal	Kruskal-Wallis	16,999	0,019	Dunn	P0 e P6
12 min	Normal	ANOVA	-	0,160	-	-

Fonte: Própria autora

5.3.1.3 Leito com 50% de enchimento

A Tabela 19 apresenta a estatística descritiva, bem como o teste de normalidade das amostras coletadas no aparato experimental com enchimento de 50% de meio suporte. Dentre os pontos analisados, o valor mínimo de turbidez na entrada do sistema (P0) foi 8,39 NTU, enquanto o valor mínimo constatado na saída do sistema (P7) foi 7,20 NTU. Em relação ao valor amostral máximo de turbidez foi 27,60 NTU e 23,60 NTU em P0 e P7, respectivamente.

Tabela 19 - Estatística descritiva e teste de normalidade da turbidez das amostras de água sintética tipo I coletadas no aparato com enchimento de 50% de meio suporte.

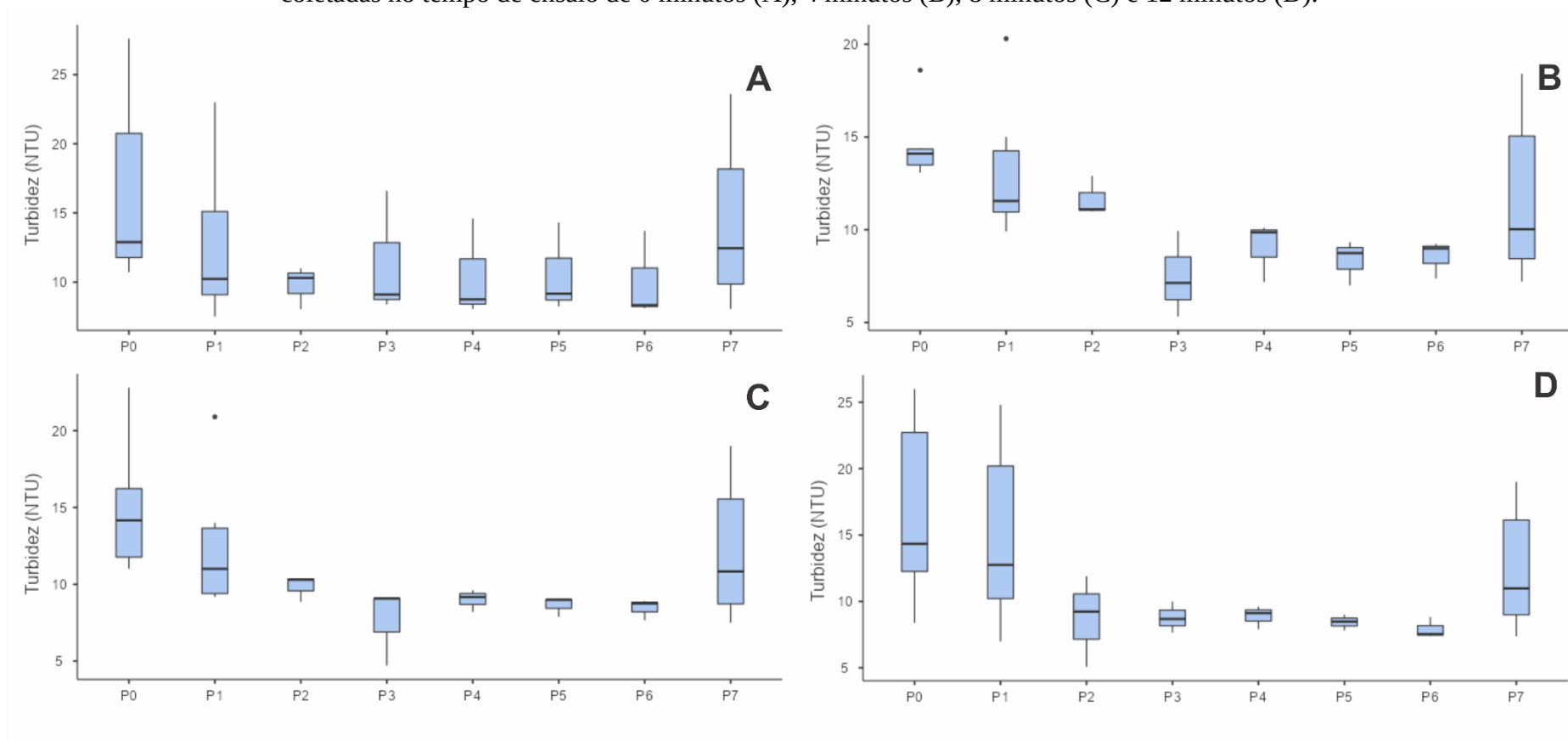
Tempo de Ensaio	Ponto	N	Média	Mediana	Desvio-padrão	Mínimo	Máximo	Shapiro-Wilk	
								W	p
0 min	P0	6	16,48	12,89	7,13	10,72	27,60	0,794	0,052
	P1	6	12,73	10,23	5,91	7,51	23,00	0,852	0,163
	P2	3	9,78	10,30	1,55	8,04	11,00	0,915	0,436
	P3	3	11,36	9,10	4,55	8,38	16,60	0,815	0,151
	P4	3	10,47	8,75	3,59	8,06	14,60	0,828	0,184
	P5	3	10,57	9,16	3,27	8,24	14,30	0,861	0,27
	P6	3	10,05	8,33	3,16	8,12	13,70	0,778	0,063
4 min	P7	6	14,27	12,45	6,20	8,06	23,60	0,893	0,336
	P0	6	14,60	14,10	2,03	13,08	18,60	0,730	0,013
	P1	6	13,20	11,55	3,89	9,91	20,30	0,828	0,103
	P2	3	11,67	11,10	1,07	11,00	12,90	0,789	0,089
	P3	3	7,46	7,13	2,32	5,32	9,93	0,985	0,764
	P4	3	9,05	9,86	1,62	7,18	10,10	0,811	0,142
	P5	3	8,36	8,74	1,21	7,00	9,33	0,925	0,470
8 min	P6	3	8,53	8,99	1,01	7,37	9,23	0,845	0,227
	P7	6	11,71	10,02	4,62	7,20	18,40	0,875	0,247
	P0	6	15,00	14,16	4,39	11,02	22,80	0,886	0,298
	P1	6	12,58	11,00	4,54	9,18	20,90	0,806	0,066
	P2	3	9,85	10,30	0,87	8,85	10,40	0,798	0,11
	P3	3	7,63	9,07	2,53	4,71	9,12	0,759	0,019
	P4	3	9,00	9,17	0,73	8,20	9,62	0,957	0,602
12 min	P5	3	8,63	8,99	0,65	7,88	9,03	0,776	0,059
	P6	3	8,44	8,75	0,68	7,66	8,91	0,844	0,225
	P7	6	12,22	10,84	4,69	7,50	19,00	0,895	0,345
	P0	6	16,69	14,34	7,35	8,39	26,00	0,859	0,187
	P1	6	14,89	12,75	7,14	6,99	24,80	0,903	0,395
	P2	3	8,73	9,23	3,44	5,07	11,90	0,984	0,761
	P3	3	8,78	8,68	1,18	7,65	10,00	0,995	0,864
	P4	3	8,88	9,12	0,87	7,91	9,60	0,941	0,533
	P5	3	8,43	8,48	0,59	7,82	9,00	0,995	0,869
	P6	3	7,92	7,53	0,78	7,42	8,82	0,809	0,135
	P7	6	12,42	10,98	4,79	7,38	19,00	0,895	0,345

Fonte: Própria autora

A maioria das amostras apresentaram distribuição não-normal e foram submetidas ao teste de Kruskal-Wallis (Tabela 20). Todavia, as amostras coletadas em 12 minutos de operação foram submetidas ao ANOVA, porém apresentou p-valor de 0,106 mostrando que não houve diferenças estatística nesse conjunto de amostras.

A Figura 23 retrata gráfico tipo *boxplot* com medianas, valores mínimos e máximos, percentis 25% e 75% e *outliers* referente aos dados apresentados na Tabela 19.

Figura 23 - Valores de turbidez em cada ponto do aparato com enchimento 50% de meio suporte para as amostras de água sintética tipo I coletadas no tempo de ensaio de 0 minutos (A), 4 minutos (B), 8 minutos (C) e 12 minutos (D).



Fonte: Própria autora

Os pontos P0, P1, P2, P3, P4, P5, P6 e P7 estão expressos por meio do gráfico tipo *boxplot*, sendo a Figura 23 (A) apresenta o gráfico referente as amostras coletadas em 0 minutos de operação, Figura 23 (B) representa os dados de 4 minutos de ensaio, Figura 23 (C) os dados referentes a 8 minutos e, por fim, Figura 23 (D) os dados estatísticos da amostras coletadas em 12 minutos.

Em relação aos dados de turbidez obtidos no aparato com 50% de empacotamento, os aspectos ao longo do leito apresentados pela Figura 23 e pela Tabela 19 mostram que houve um declínio mais significativo dos valores de turbidez se comparados ao leito sem meio suporte. Entretanto, as amostras no ponto P7 manifestaram maiores dispersões dos dados, que pode ser decorrente de um erro amostral ou da passagem e acúmulo de partículas na calha.

Tabela 20 - Resultados dos testes estatísticos de análise de variância das amostras de turbidez coletadas com leito com enchimento de 50% de meio suporte

Tempo de operação	Distribuição das amostras	Análise de variância	H	p-valor	Teste de comparação múltipla	Diferenças entre pontos
0 min	Não-normal	Kruskal- Wallis	5,968	0,544	-	-
4 min	Não-normal	Kruskal- Wallis	18,279	0,011	Dunn	-
8 min	Não-normal	Kruskal- Wallis	16,362	0,022	Dunn	-
12 min	Normal	ANOVA	-	0,106	-	-

Fonte: Própria autora

5.3.1.4 Leito com 75% de enchimento

O resultado da estatística descritiva, bem como do teste de normalidade Shapiro-Wilk das amostras coletadas no leito com 75% de enchimento em meio suporte é mostrado na Tabela 21. Os pontos P0 e P7 apresentaram os valores máximos 16,32 NTU e 14,80 NTU, respectivamente. Na sequência a tabela apresenta 7,16 NTU para P0 e 6,68 NTU para P7 como valores mínimos ao longo do ensaio.

As amostras coletadas em 0 minutos apresentaram distribuição não-normal, devido a isso, foram submetidas a análise de variância pelo método Kruskal-Wallis como mostra a Tabela 22. Entretanto, os dados das amostras decorrentes da operação de 4, 8 e 12 minutos apresentaram distribuição normal e aplicados à análise de variância pelo ANOVA, porém apenas as amostras de 12 minutos de operação apresentaram diferenças estatísticas, e consequentemente submetidas ao teste Tukey, que apresentou diferenças entre sete conjuntos de pontos. O gráfico *boxplot* apresenta medianas, outliers, 1º e 3º quartis, além de valores máximos e mínimos. A Figura 24 apresenta o gráfico referente as amostras coletadas em 0 minutos, 4 minutos, 8 minutos e em 12 minutos.

Tabela 21 - Estatística descritiva e teste de normalidade da turbidez das amostras de água sintética tipo I coletadas no aparato com enchimento de 75% de meio suporte

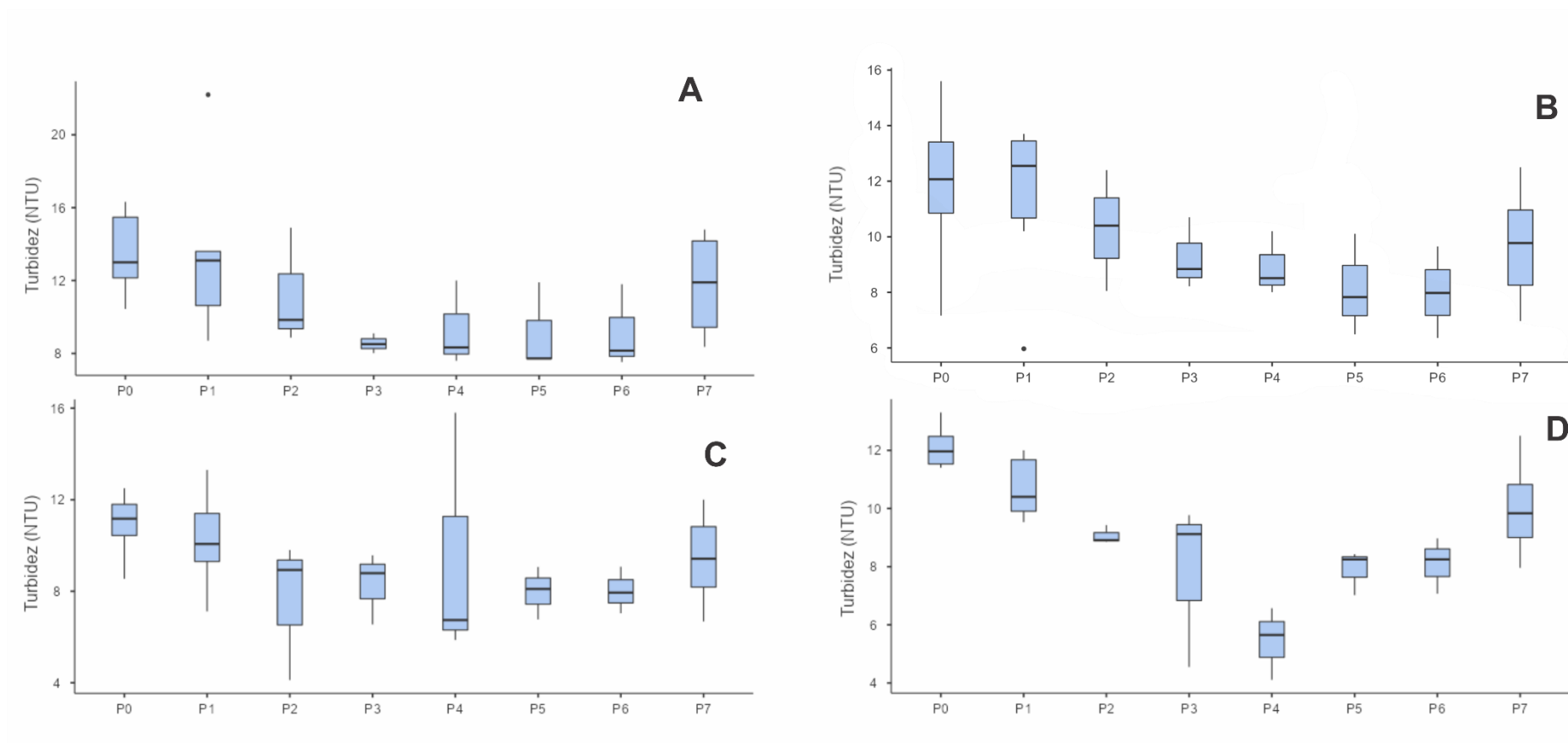
Tempo de Ensaio	Ponto	N	Média	Mediana	Desvio-padrão	Mínimo	Máximo	Shapiro-Wilk	
								W	p
0 min	P0	6	13,49	13,00	2,35	10,44	16,32	0,913	0,454
	P1	6	13,45	13,10	4,73	8,70	22,20	0,855	0,174
	P2	3	11,20	9,84	3,24	8,87	14,90	0,867	0,287
	P3	3	8,54	8,51	0,54	8,02	9,10	0,997	0,898
	P4	3	9,31	8,33	2,36	7,60	12,00	0,87	0,297
	P5	3	9,11	7,72	2,41	7,72	11,90	0,750	<,001
	P6	3	9,16	8,15	2,31	7,53	11,80	0,856	0,257
	P7	6	11,75	11,90	2,80	8,36	14,80	0,891	0,321
4 min	P0	6	11,87	12,07	2,89	7,16	15,60	0,974	0,918
	P1	6	11,43	12,55	2,97	5,97	13,70	0,817	0,084
	P2	3	10,28	10,40	2,18	8,05	12,40	0,998	0,911
	P3	3	9,25	8,84	1,29	8,22	10,70	0,923	0,463
	P4	3	8,91	8,51	1,15	8,01	10,20	0,91	0,419
	P5	3	8,14	7,83	1,83	6,49	10,11	0,978	0,716
	P6	3	8,00	7,98	1,65	6,36	9,65	1,000	0,983
	P7	6	9,69	9,77	2,07	6,97	12,50	0,970	0,892
8 min	P0	6	10,93	11,17	1,41	8,54	12,50	0,936	0,631
	P1	6	10,24	10,07	2,14	7,12	13,30	0,982	0,961
	P2	3	7,62	8,93	3,06	4,12	9,80	0,862	0,272
	P3	3	8,30	8,79	1,57	6,55	9,57	0,928	0,48
	P4	3	9,47	6,74	5,50	5,87	15,80	0,815	0,151
	P5	3	7,98	8,10	1,15	6,77	9,06	0,991	0,822
	P6	3	8,02	7,94	1,02	7,04	9,07	0,996	0,875
	P7	6	9,43	9,42	1,99	6,68	12,00	0,98	0,953
12 min	P0	6	12,11	11,96	0,74	11,40	13,30	0,918	0,490
	P1	6	10,70	10,40	1,08	9,53	12,00	0,864	0,202
	P2	3	9,07	8,91	0,32	8,86	9,43	0,815	0,151
	P3	3	7,81	9,12	2,85	4,55	9,77	0,842	0,219
	P4	3	5,44	5,65	1,24	4,11	6,57	0,979	0,724
	P5	3	7,90	8,25	0,77	7,02	8,43	0,844	0,225
	P6	3	8,10	8,25	0,96	7,07	8,97	0,981	0,735
	P7	6	10,00	9,84	1,62	7,96	12,50	0,983	0,967

Fonte: Própria autora.

O gráfico tipo *boxplot* exibe as medianas dos pontos observados, no qual, o P4 e P5 apresentam os menores valores. Entretanto, a Figura 24 (B) e 24 (C) mostra uma alta dispersão para esses mesmos pontos. O valor máximo em 4 minutos no ponto P5 correspondeu a 10,11 NTU o que justifica a dispersão em relação a mediana 6,49 NTU, esse resultado pode ser em decorrência de um erro amostral ou produto de acúmulo no ponto de saída. Em relação a P4, o valor máximo obtido em 8 minutos foi 15,80 NTU em relação a mediana 6,74 NTU.

O gráfico tipo *boxplot* apresenta também menores valores de turbidez nos pontos compreendidos entre o meio suporte.

Figura 24- Valores de turbidez em cada ponto do aparato com enchimento 75% de meio suporte para as amostras de água sintética tipo I coletadas no tempo de ensaio de 0 minutos (A), 4 minutos (B), 8 minutos (C) e 12 minutos (D).



Fonte: Própria autora

Tabela 22- Resultados dos testes estatísticos de análise de variância das amostras de turbidez coletadas com leito com enchimento de 75% de meio suporte

Tempo de operação	Distribuição das amostras	Análise de variância	H	p-valor	Teste de comparação múltipla	Diferenças entre pontos
0 min	Normal	Kruskal-Wallis	14,105	0,049	-	-
4 min	Normal	ANOVA	-	0,173	-	-
8 min	Normal	ANOVA	-	0,401	-	-
12 min	Normal	ANOVA	-	<0,001	Tukey	P0 e P4; P0 e P3; P0 e P5; P0 e P6 ; P1 e P4; P7 e P4; P2 e P4

Fonte: Própria autora.

Em sequência, a saída do decantador mostrou valores de turbidez superiores ao obtidos no mesmo tempo de operação dentro do aparato, o que pode ser justificado pelo fato das partículas retidas no leito não conseguirem decantar através do meio suporte e estarem sendo carregadas pelo movimento ascendente da água ou por um acúmulo de partículas na calha e tubulação de saída.

5.3.1.5 Leito com 100% de enchimento

As amostras coletadas nos ensaios com enchimento de meio suporte de 100% do leito apresentaram estatística descritiva e resultado do teste de normalidade conforme apresentado na Tabela 23. Os valores mínimos nos pontos de entrada (P0) e saída (P7) foram 7,25 NTU e 6,88 NTU, respectivamente. Enquanto isso, os valores máximos encontrados nos pontos P0 e P7 ao longo do ensaio com o leito totalmente preenchido foi de 22,40 NTU e 15,60 NTU, respectivamente.

Com exceção da operação em 8 minutos de ensaio, nessa configuração a maioria das amostras exibiram distribuição normal. O conjunto amostral ao ser submetido a análise de variância não apresentou diferenças estatísticas entre os pontos amostrais, conforme apresentado na Tabela 24.

Os pontos P0, P1, P2, P3, P4, P5, P6 e P7 estão expressos no gráfico *boxplot*, no qual a Figura 25 apresenta o gráfico referente as amostras coletadas em 0, 4, 8 e 12 minutos.

Em relação aos dados apresentados no gráfico tipo *boxplot* a maior dispersão ocorre nos pontos P0, P1, P2 e P7. Diferente do que ocorre no leito com 75% de empacotamento, os resultados mostram um declínio de partículas finas ao longo dos pontos. Os pontos com maiores medianas após P0 são P1 e P2, a concentração elevada nesses dois pontos provavelmente decorre da dificuldade de passagem das partículas no leito fixo.

Tabela 23- Estatística descritiva e teste de normalidade da turbidez das amostras de água sintética tipo I coletadas no aparato com enchimento de 100% de meio suporte

Tempo de Ensaio	Ponto	N	Média	Mediana	Desvio-padrão	Mínimo	Máximo	Shapiro-Wilk	
								W	p
0 min	P0	6	16,63	16,68	4,89	9,94	22,40	0,952	0,757
	P1	6	14,63	13,90	4,94	8,28	22,30	0,983	0,967
	P2	3	19,03	20,70	3,69	14,80	21,60	0,847	0,233
	P3	3	13,93	14,60	1,89	11,80	15,40	0,907	0,407
	P4	3	12,03	11,90	1,60	10,50	13,70	0,995	0,862
	P5	3	12,23	11,40	1,80	11,00	14,30	0,839	0,213
	P6	3	12,77	12,00	1,42	11,90	14,40	0,78	0,067
4 min	P7	6	11,96	11,90	2,25	9,67	15,60	0,924	0,533
	P0	6	13,88	13,62	3,84	7,25	18,20	0,895	0,345
	P1	6	13,01	12,55	4,42	7,07	20,40	0,951	0,747
	P2	3	12,28	12,10	2,43	9,95	14,80	0,996	0,875
	P3	3	10,76	11,40	1,56	8,99	11,90	0,874	0,308
	P4	3	9,65	10,30	1,22	8,24	10,40	0,785	0,078
	P5	3	9,26	9,32	1,07	8,16	10,30	0,998	0,907
8 min	P6	3	9,69	9,93	1,06	8,53	10,60	0,960	0,616
	P7	6	9,98	9,12	2,69	6,88	14,20	0,934	0,613
	P0	6	12,79	13,11	3,14	7,52	17,30	0,903	0,394
	P1	6	11,97	11,15	3,61	7,42	18,00	0,944	0,693
	P2	3	11,87	11,60	1,12	10,90	13,10	0,958	0,605
	P3	3	10,83	10,90	0,21	10,60	11,00	0,923	0,463
	P4	3	9,90	10,00	0,27	9,60	10,10	0,893	0,363
12 min	P5	3	9,45	9,55	0,61	8,79	10,00	0,979	0,72
	P6	3	9,17	9,23	0,40	8,75	9,54	0,985	0,764
	P7	6	10,22	9,46	2,76	7,06	14,40	0,941	0,664
	P0	6	15,40	16,39	4,71	7,39	19,50	0,867	0,213
	P1	6	13,58	13,95	3,92	7,86	18,40	0,946	0,706
	P2	3	12,80	12,70	0,27	12,60	13,10	0,893	0,363
	P3	3	10,78	11,00	1,44	9,24	12,10	0,983	0,747
	P4	3	10,12	10,30	0,50	9,55	10,50	0,900	0,384
	P5	3	10,00	9,95	0,58	9,44	10,60	0,995	0,867
	P6	3	9,21	9,29	0,49	8,69	9,65	0,980	0,726
	P7	6	10,45	9,71	2,74	7,12	14,10	0,916	0,474

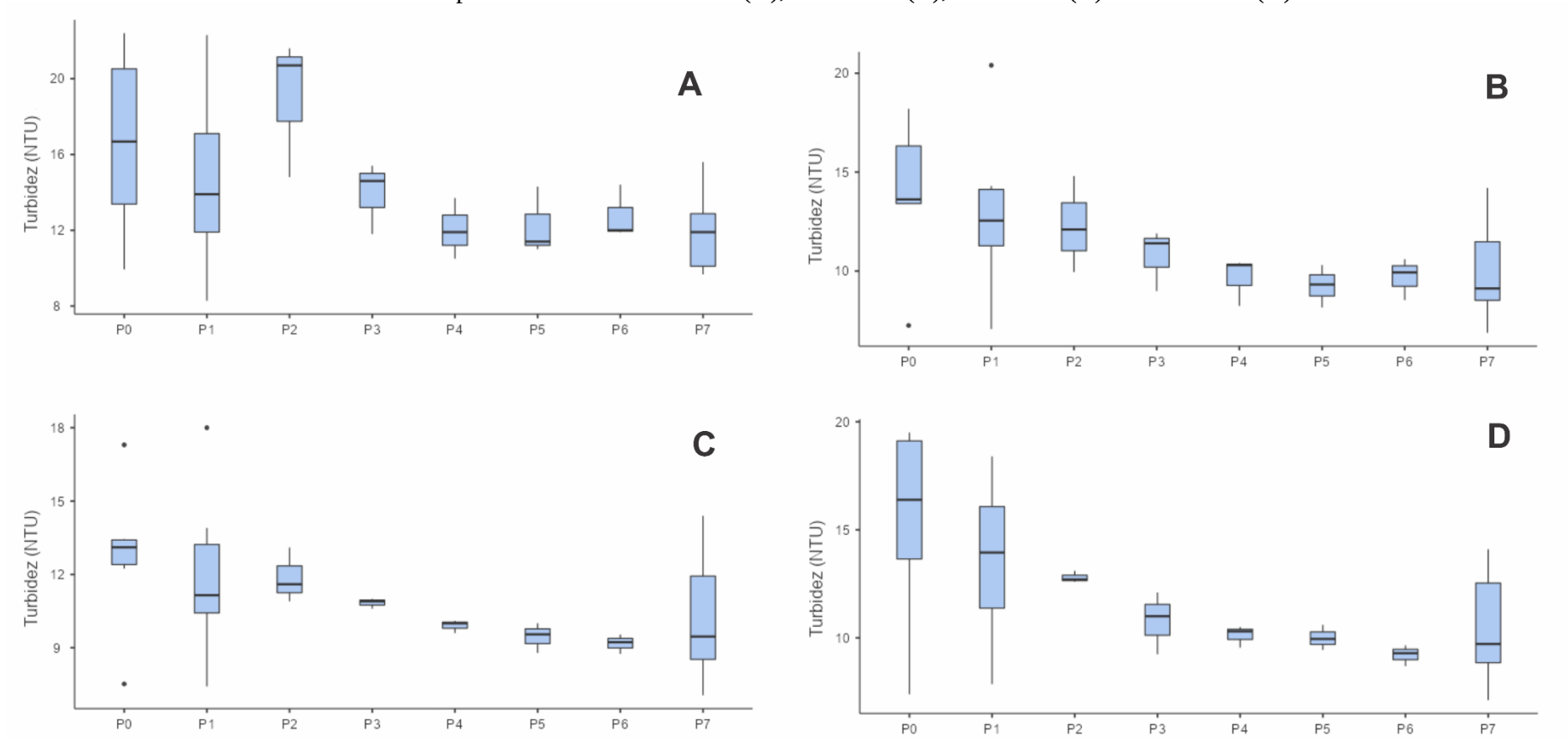
Fonte: Própria autora

Tabela 24 - Resultados dos testes estatísticos de análise de variância das amostras de turbidez da água sintética tipo I coletadas com leito com enchimento de 100% de meio suporte

Tempo de operação	Distribuição das amostras	Análise de variância	H	p-valor	Teste de comparação múltipla	Diferenças entre pontos
0 min	Normal	ANOVA	-	0,112	-	-
4 min	Normal	ANOVA	-	0,201	-	-
8 min	Não-normal	Kruskal-Wallis	10,863	0,145	-	-
12 min	Normal	ANOVA	-	0,056	-	-

Fonte: Própria autora

Figura 25 - Valores de turbidez em cada ponto do aparato com enchimento 100% de meio suporte para as amostras de água sintética tipo I coletadas no tempo de ensaio de 0 minutos (A), 4 minutos (B), 8 minutos (C) e 12 minutos (D).



Fonte: Própria autora

5.3.2 Avaliação da turbidez: Água sintética tipo II

5.3.2.1 Leito sem meio suporte

Os dados de estatística descritiva das amostras coletadas quando o aparato se encontrava sem inserção de dispositivo de remoção dentro do leito são apresentados na Tabela 25. A Tabela 25 mostra os resultados do teste de normalidade para cada conjunto amostral. A Figura 26 apresenta o *boxplot* dos dados coletados.

A maioria das amostras apresentaram $p\text{-valor} > 0,05$, exceto as análises de 8 minutos, comprovando que para a maioria dos conjuntos de dados analisados, as amostras não são normalmente distribuídas.

Devido a isso, os resultados foram submetidos a análise de variância por meio do teste Kruskal-Wallis, entretanto as diferenças entre os valores médios entre os grupos analisados não são grandes o suficiente para que se exclua a hipótese que a variabilidade apresentada não seja devido a variabilidade de amostragem e não há diferença estatisticamente significativa entre os grupos quando o aparato estava sem meio suporte (Tabela 26).

Para os grupos que se encontram na coleta de 8 minutos de ensaio, o teste de normalidade apresentou $p\text{-valor} = 0,066$, enquanto o teste de igualdade de variância apresentou $p\text{-valor} = 0,825$ o que mostra igualdade de variância entre os grupos. O ANOVA apresentou $p\text{-valor} = 0,955$ para os grupos amostrais da análise de 8 minutos de operação, o que significa que os valores médios não são grandes o suficiente para excluir a possibilidade que a diferença seja devido a variabilidade das amostras. A análise do poder do teste α foi de 0,05 abaixo da potência desejada 0,8 que indica que é menos provável que se constate uma diferença quando ela realmente existe.

A Figura 26 mostra a Turbidez ao longo dos grupos P0, P1, P2, P3, P4, P5, P6 e P7, na de operação de 0 minutos (A), 4 minutos (B), 8 minutos (C), e por fim 12 minutos (D). O gráfico tipo *boxplot* que apresentou menor dispersão foi o do instante inicial de ensaio (Figura 26(A)).

De forma diferente ao ocorrido com as amostras de água sintética tipo I, as amostras de turbidez ao longo do leito quando a concentração de sólidos presente era maior, apresentou valores de medianas mais uniformes em relação aos pontos amostrais. Entretanto, pelo gráfico *boxplot* é possível analisar que também houve uma maior dispersão entre os valores analisados.

Tabela 25 - Estatística descritiva e teste de normalidade da turbidez das amostras de água sintética tipo II coletadas no aparato sem inserção de meio suporte

Tempo de ensaio	Ponto	N	Média	Mediana	Desvio-padrão	Mínimo	Máximo	Shapiro-Wilk	
								W	p
0 min	P0	6	57,80	39,30	51,28	22,60	159,00	0,724	0,011
	P1	6	32,50	24,90	19,97	19,30	72,80	0,631	0,001
	P2	3	21,10	20,20	6,15	15,50	27,70	0,983	0,748
	P3	3	24,10	24,00	9,15	15,00	33,30	1,000	0,982
	P4	3	23,40	24,80	7,20	15,60	29,80	0,972	0,677
	P5	3	21,60	22,40	10,67	10,50	31,80	0,995	0,871
	P6	3	19,90	21,20	8,33	11,00	27,50	0,982	0,741
	P7	6	20,80	20,10	4,94	16,30	29,60	0,886	0,297
4 min	P0	6	36,60	33,00	16,04	20,90	62,00	0,907	0,419
	P1	6	30,90	27,90	13,26	20,00	56,90	0,755	0,022
	P2	3	32,10	30,10	7,93	25,30	40,80	0,954	0,587
	P3	3	31,00	25,00	10,62	24,80	43,30	0,758	0,018
	P4	3	28,40	28,20	6,05	22,40	34,50	0,999	0,954
	P5	3	30,00	25,60	8,12	25,10	39,40	0,776	0,059
	P6	3	31,90	30,20	10,55	22,30	43,20	0,981	0,733
	P7	6	26,60	24,60	8,06	18,80	42,00	0,825	0,098
8 min	P0	6	28,30	28,10	8,28	17,00	37,90	0,946	0,704
	P1	6	26,40	25,00	8,78	17,10	41,70	0,926	0,551
	P2	3	27,30	25,30	7,64	20,80	35,70	0,95	0,571
	P3	3	24,30	21,50	6,94	19,20	32,20	0,878	0,318
	P4	3	29,40	28,00	8,43	21,70	38,40	0,98	0,731
	P5	3	27,90	26,00	7,98	21,10	36,70	0,956	0,596
	P6	3	27,30	26,80	7,66	19,90	35,20	0,997	0,892
	P7	6	23,70	22,70	5,47	18,10	33,70	0,885	0,294
12 min	P0	6	28,20	29,50	6,79	19,90	36,90	0,923	0,524
	P1	6	24,60	24,80	7,34	16,80	32,20	0,809	0,071
	P2	3	27,70	25,90	8,19	20,50	36,60	0,965	0,641
	P3	3	25,50	24,80	6,03	19,80	31,80	0,991	0,817
	P4	3	25,30	24,90	3,97	21,60	29,50	0,991	0,819
	P5	3	24,50	24,40	5,10	19,40	29,60	1,000	0,978
	P6	3	26,40	28,60	7,50	18,00	32,50	0,934	0,502
	P7	6	22,80	22,20	6,22	16,50	32,70	0,909	0,427

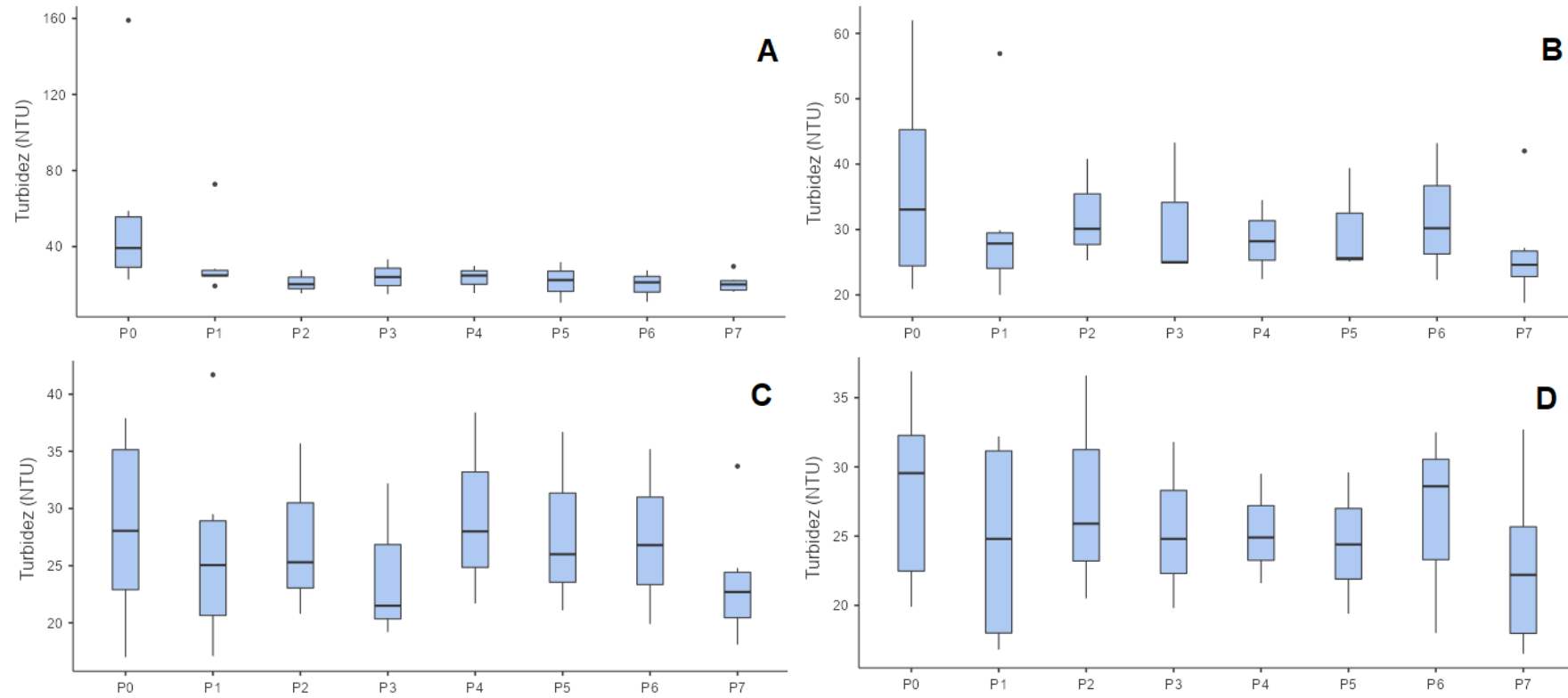
Fonte: Própria autora

Tabela 26 - Resultados dos testes estatísticos de análise de variância das amostras de turbidez da água sintética tipo II coletadas com leito sem enchimento de meio suporte

Tempo de operação	Distribuição das amostras	Análise de variância	H	p-valor	Teste de comparação múltipla	Diferenças entre pontos
0 min	Não-normal	Kruskal-Wallis	10,459	0,164	-	-
4 min	Não-normal	Kruskal-Wallis	2,481	0,929	-	-
8 min	Normal	ANOVA	-	0,955	-	-
12 min	Não-normal	Kruskal-Wallis	3,553	0,830	-	-

Fonte: Própria autora

Figura 26 –Valores de turbidez em cada ponto do aparato sem meio suporte para as amostras de água sintética tipo II coletadas no tempo de ensaio de 0 minutos (A), 4 minutos (B), 8 minutos (C) e 12 minutos (D).



Fonte: Própria autora

5.3.2.2 Leito com 25% de enchimento

Os dados coletados referentes aos ensaios de turbidez quando o leito do aparato possuía 25% de enchimento de meio suporte, também foram submetidos a estatística descritiva (Tabela 27) e a testes estatísticos (Tabela 28). Para determinar a distribuição amostral, o teste de normalidade Shapiro-Wilk (Tabela 27) foi executado e a maioria dos grupos apresentaram distribuição não-normal.

A faixa de leitura de turbidez encontrada no tanque (P0) foi entre 23,8 a 167 NTU. Os valores médios e medianos situaram entre 53,8 a 77,4 NTU semelhante a faixa de valores médios de turbidez - 26,1 a 147,7 NTU - obtidos na Bacia do Peixe entre os anos de 2015 e 2019 (CETESB, 2020). Pela Tabela 28 nota-se que os maiores valores de desvio padrão compreendem os resultados das amostradas coletadas no tanque de mistura (P0). No ponto final de captação das amostras (P7), os dados apresentaram resultados entre 22,7 a 52,7 NTU.

O teste de Kruskal-Wallis foi executado para analisar as diferenças significativas entre os grupos. A análise dos dados coletados no tempo inicial de operação, apresentaram p-valor de 0,316, que significa que não houve diferenças estatísticas entre os grupos.

Nos demais dados coletados no ensaio, o p-valor apresentou resultados inferiores a 0,05, ou seja, mostrou diferenças estatísticas entre os grupos. O teste complementar de Dunn apontou que nos dados de operação de 8 minutos os grupos P0 e P5 exibiram diferenças entre si, além disso, o teste para os dados de turbidez em 12 minutos identificou diferenças entre os grupos P0 e P2, bem como, P0 e P6.

O *boxplot* dos dados coletados tanto nos pontos de P0 a P7, quanto em relação ao tempo de operação do aparato, está apresentado na Figura 27. Em comparação aos *boxplot* apresentados, a maior dispersão dos dados é apresentada nos resultados do tempo inicial de operação (Figura 27(A)). Os pontos que apresentam maior dispersão são os grupos P0, P1 e P7 em ambos os tempos.

Tabela 27 - Estatística descritiva e teste de normalidade da turbidez das amostras de água sintética tipo II coletadas no aparato com enchimento de leito 25% de meio suporte

Tempo de ensaio	Ponto	N	Média	Mediana	Desvio-padrão	Mínimo	Máximo	Shapiro-Wilk	
								W	p
0 min	P0	6	60,00	53,80	31,83	28,90	113,00	0,919	0,496
	P1	6	46,30	47,50	13,52	26,30	65,80	0,982	0,963
	P2	3	33,80	32,20	9,94	24,70	44,40	0,981	0,739
	P3	3	33,00	36,70	9,07	22,70	39,70	0,878	0,317
	P4	3	33,10	36,10	7,90	24,10	39,00	0,889	0,353
	P5	3	31,80	33,20	8,93	22,30	40,00	0,982	0,746
	P6	3	31,80	34,30	8,49	22,30	38,70	0,933	0,501
	P7	6	41,80	45,80	12,20	22,70	52,30	0,86	0,188
4 min	P0	6	77,40	72,80	48,36	23,80	167,00	0,854	0,17
	P1	6	47,40	48,00	14,80	31,80	62,80	0,82	0,088
	P2	3	40,70	36,30	8,83	35,00	50,90	0,811	0,141
	P3	3	27,70	25,30	7,36	21,90	36,00	0,918	0,445
	P4	3	27,60	26,30	7,34	21,00	35,50	0,976	0,706
	P5	3	28,00	30,20	7,84	19,30	34,50	0,941	0,531
	P6	3	29,00	29,30	3,81	25,00	32,60	0,994	0,855
	P7	6	39,50	41,70	9,98	24,60	51,70	0,959	0,815
8 min	P0	6	70,50	61,00	29,98	49,00	128,00	0,776	0,036
	P1	6	48,50	50,10	13,26	26,50	66,60	0,958	0,807
	P2	3	32,60	34,00	2,81	29,40	34,50	0,823	0,17
	P3	3	26,70	26,90	7,35	19,20	33,90	0,999	0,948
	P4	3	29,50	26,80	5,24	26,10	35,50	0,806	0,128
	P5	3	25,30	25,60	7,65	17,50	32,80	0,999	0,935
	P6	3	32,00	36,10	7,66	23,20	36,80	0,788	0,087
	P7	6	41,50	43,30	12,41	24,60	53,60	0,877	0,254
12 min	P0	6	76,70	66,70	36,73	46,20	149,00	0,753	0,021
	P1	6	48,10	46,30	11,61	35,30	64,40	0,936	0,631
	P2	3	30,10	30,40	1,92	28,00	31,80	0,977	0,712
	P3	3	36,80	39,30	5,64	30,30	40,70	0,849	0,237
	P4	3	32,10	32,50	4,16	27,80	36,10	0,994	0,854
	P5	3	34,50	33,60	4,37	30,60	39,20	0,970	0,670
	P6	3	31,40	29,60	4,11	28,50	36,10	0,856	0,257
	P7	6	42,30	42,90	7,57	33,20	52,70	0,950	0,739

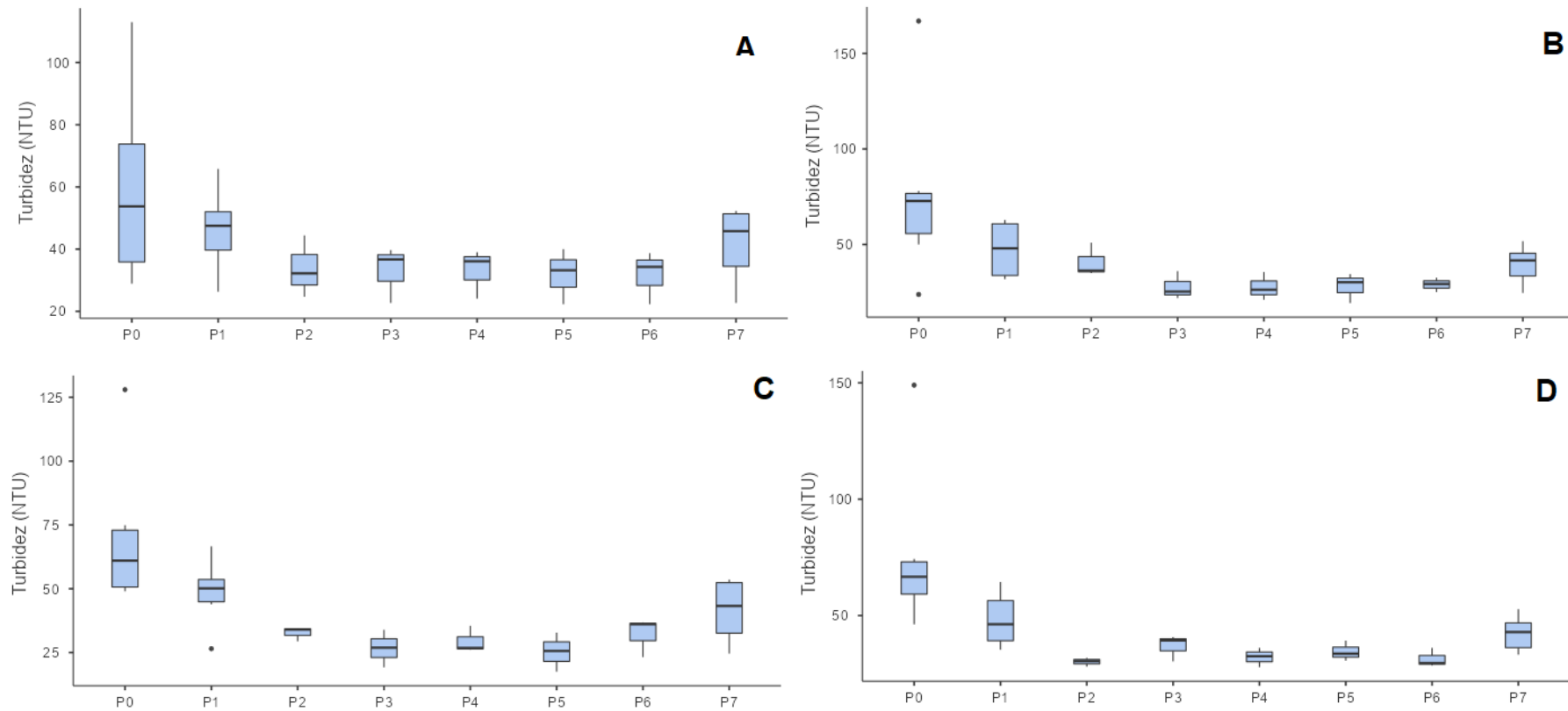
Fonte: Própria autora

Tabela 28 - Resultados dos testes estatísticos de análise de variância das amostras de turbidez da água sintética tipo II coletadas com enchimento de leito em 25% de meio suporte

Tempo de operação	Distribuição das amostras	Análise de variância	H	p-valor	Teste de comparação múltipla	Diferenças entre pontos
0 min	Não-normal	Kruskal-Wallis	8,197	0,316	-	-
4 min	Não-normal	Kruskal-Wallis	14,365	0,045	Dunn	-
8 min	Não-normal	Kruskal-Wallis	18,936	0,008	Dunn	P0 e P5
12 min	Não-normal	Kruskal-Wallis	22,647	0,002	Dunn	P0 e P2; P0 e P6

Fonte: Própria autora

Figura 27- Valores de turbidez em cada ponto do aparato com enchimento de leito 25% para as amostras de água sintética tipo II coletadas no tempo de ensaio de 0 minutos (A), 4 minutos (B), 8 minutos (C) e 12 minutos (D).



Fonte: Própria autora

5.3.2.3 Leito com 50% de enchimento

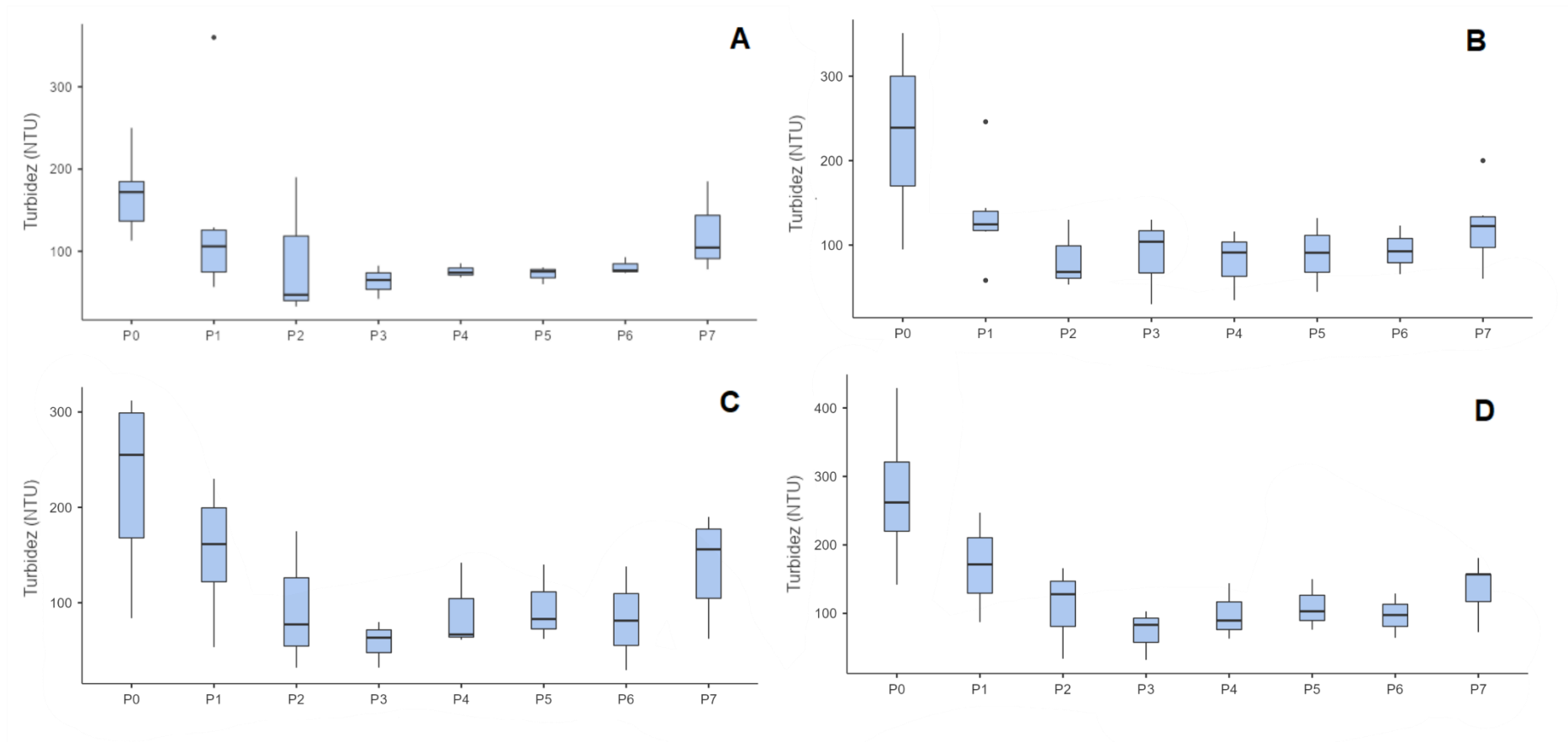
A operação do aparato com 50% de enchimento em meio suporte apresentou os resultados estatísticos da Tabela 29 e expresso pelo gráfico *boxplot* (Figura 28). Da mesma forma que os outros ensaios, o teste de normalidade mostrou que a maioria dos grupos possuía distribuição não paramétrica.

Tabela 29 -Estatística descritiva e teste de normalidade da turbidez das amostras de água sintética tipo II coletadas no aparato com enchimento de leito 50% de meio suporte

Tempo de ensaio	Ponto	N	Média	Mediana	Desvio-padrão	Mínimo	Máximo	Shapiro-Wilk	
								W	p
0 min	P0	6	170,20	172,00	48,86	113,00	250,00	0,942	0,674
	P1	6	137,60	106,00	112,39	56,70	360,00	0,725	0,011
	P2	3	90,00	47,10	86,89	32,90	190,00	0,817	0,156
	P3	3	63,30	65,10	20,16	42,30	82,50	0,994	0,852
	P4	3	75,90	74,10	8,60	68,40	85,30	0,966	0,645
	P5	3	72,00	75,40	10,58	60,10	80,40	0,921	0,456
	P6	3	81,10	76,70	10,33	73,70	92,90	0,864	0,278
	P7	6	119,30	104,50	41,99	78,10	185,00	0,886	0,297
4 min	P0	4	231,00	239,00	110,90	94,90	351,00	0,984	0,927
	P1	6	135,50	124,50	61,49	58,20	246,00	0,883	0,285
	P2	3	83,80	68,20	40,71	53,20	130,00	0,89	0,354
	P3	3	88,00	104,00	51,88	30,00	130,00	0,929	0,484
	P4	3	80,70	91,20	41,61	34,80	116,00	0,952	0,578
	P5	3	89,20	90,90	43,67	44,70	132,00	0,999	0,936
	P6	3	93,70	92,60	28,72	65,60	123,00	0,999	0,935
	P7	6	121,80	122,50	47,19	60,10	200,00	0,961	0,831
8 min	P0	5	223,60	255,00	96,30	83,80	312,00	0,905	0,438
	P1	6	154,60	161,50	64,74	53,50	230,00	0,967	0,875
	P2	3	94,70	77,30	73,13	31,90	175,00	0,957	0,603
	P3	3	58,40	63,40	24,25	32,00	79,70	0,968	0,655
	P4	3	90,00	66,70	45,11	61,30	142,00	0,8	0,114
	P5	3	95,00	82,90	40,29	62,20	140,00	0,932	0,496
	P6	3	82,80	81,20	54,37	29,30	138,00	0,999	0,95
	P7	6	139,40	156,00	51,57	62,30	190,00	0,895	0,346
12 min	P0	5	274,80	262,00	108,10	142,00	429,00	0,991	0,982
	P1	6	169,40	171,50	60,06	87,30	247,00	0,979	0,945
	P2	3	109,30	128,00	68,01	33,90	166,00	0,943	0,541
	P3	3	72,80	83,30	36,60	32,10	103,00	0,938	0,520
	P4	3	98,90	89,60	41,20	63,20	144,00	0,962	0,623
	P5	3	109,70	103,00	37,36	76,20	150,00	0,976	0,701
	P6	3	97,00	97,60	32,30	64,40	129,00	1,000	0,969
	P7	6	138,10	157,00	40,87	72,70	181,00	0,855	0,173

Fonte: Própria autora

Figura 28-Valores de turbidez em cada ponto do aparato com enchimento de leite 50% para as amostras de água sintética tipo II coletadas no tempo de ensaio de 0 minutos (A), 4 minutos (B), 8 minutos (C) e 12 minutos (D).



Fonte: Própria autora.

A mediana, percentis 25% e 75%, máximos, mínimos e *outliers* estão expressos na Figura 28, por meio de um gráfico tipo *boxplot* com os dados de turbidez encontrados na operação do aparato experimental no leito com 50% de empacotamento.

Os valores de turbidez no ponto de coleta P0, para todos os instantes, apresentaram valores mais significativos do que os apresentados na operação do aparato sem meio suporte e com a inserção de 25% de enchimento do leito.

Os resultados relacionados ao teste de análise de variância estão apresentados na Tabela 30 que mostram que com exceção do ensaio em 4 minutos, os resultados apresentados nesse ensaio mostraram resultados estatisticamente significantes. Entretanto, o teste complementar de Dunn apontou que apenas na operação de 12 minutos houve diferenças entre grupos P0 e P3.

Tabela 30- Resultados dos testes estatísticos de análise de variância das amostras de turbidez da água sintética tipo II coletadas com enchimento de leito em 50% de meio suporte

Tempo de operação	Distribuição das amostras	Análise de variância	H	p-valor	Teste de comparação múltipla	Diferenças entre pontos
0 min	Não-normal	Kruskal-Wallis	14,627	0,041	Dunn	-
4 min	Normal	ANOVA	-	0,489	-	-
8 min	Normal	ANOVA	-	0,023	Tukey	P0 e P3
12 min	Normal	ANOVA	-	0,002	Tukey	P0 e P2; P0 e P3; P0 e P4; P0 e P5; P0 e P6; P0 e P7

Fonte: Própria autora.

5.3.2.4 Leito com 75% de enchimento

A estatística descritiva dos dados coletados no decantador com enchimento de 75% de meio suporte é apresentado na Tabela 31. A Tabela também apresenta o teste de normalidade Shapiro-Wilk que analisa a distribuição normal dos grupos analisados.

O valor máximo de turbidez no ponto inicial (P0) quando o leito estava com o enchimento em 75% foi de 2799 NTU, enquanto que o maior valor obtido no ponto de saída (P7) do tratamento foi de 297 NTU. Além disso o valor mínimo de turbidez durante os doze minutos de operação para o ponto inicial (P0) foi de 118 NTU, enquanto que a saída (P7) apresentou 70,1 NTU.

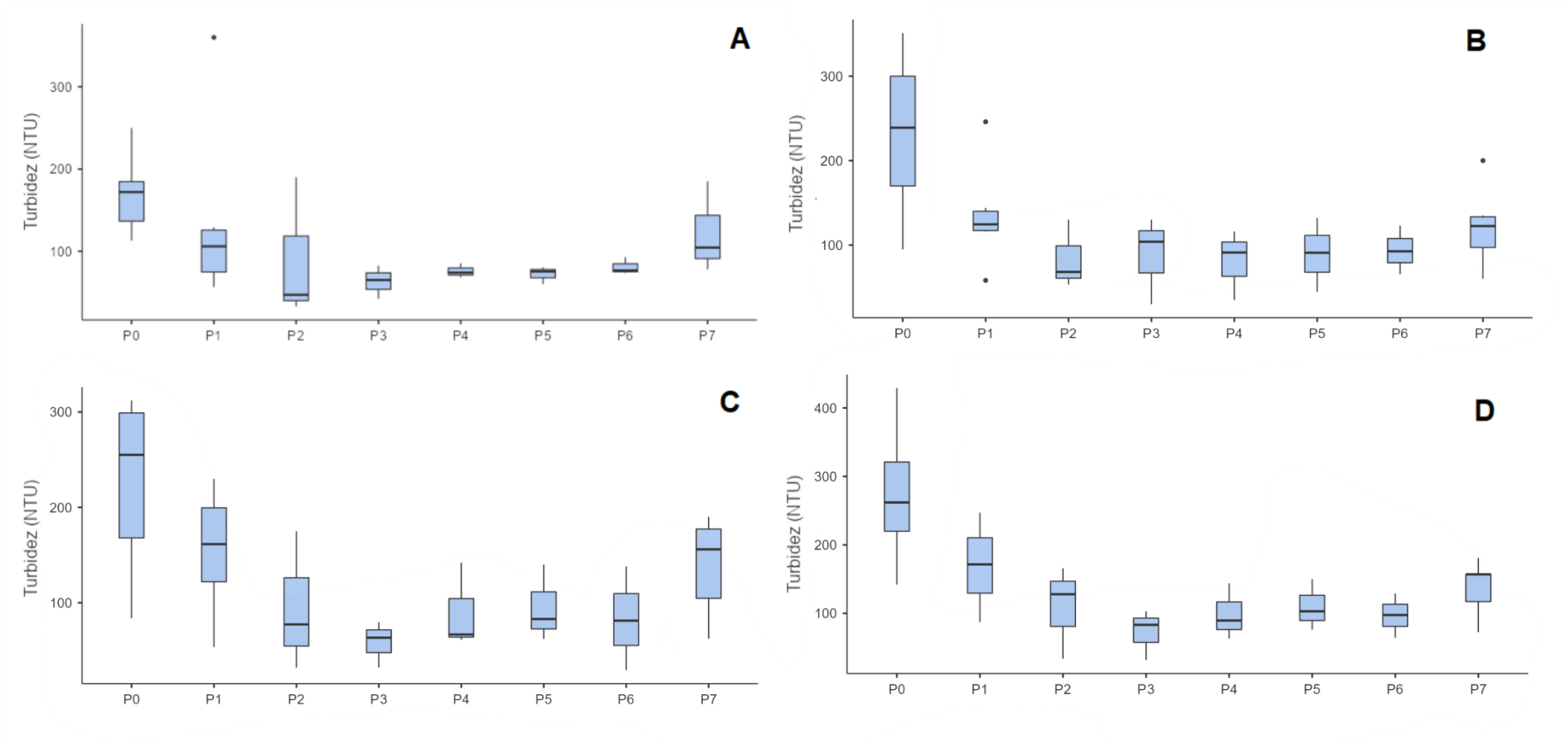
Tabela 31 - Estatística descritiva e teste de normalidade da turbidez das amostras de água sintética tipo II coletadas no aparato com enchimento de leito 75% de meio suporte

Tempo de ensaio	Ponto	N	Média	Mediana	Desvio-padrão	Mínimo	Máximo	Shapiro-Wilk	
								W	p
0 min	P0	5	254,00	248,00	84,20	161,00	342,00	0,874	0,285
	P1	6	261,00	235,00	111,70	157,00	470,00	0,851	0,161
	P2	3	307,00	227,00	217,70	140,00	553,00	0,900	0,384
	P3	3	218,00	166,00	117,40	135,00	352,00	0,855	0,253
	P4	3	183,00	151,00	102,90	99,80	298,00	0,928	0,48
	P5	3	177,00	174,00	73,00	105,00	251,00	0,999	0,94
	P6	3	159,00	166,00	50,30	106,00	206,00	0,987	0,78
	P7	6	176,00	183,50	44,30	105,00	224,00	0,933	0,600
4 min	P0	5	241,00	270,00	70,20	142,00	318,00	0,939	0,661
	P1	6	212,00	220,00	72,60	107,00	302,00	0,966	0,866
	P2	3	176,00	108,00	140,00	83,00	337,00	0,823	0,171
	P3	3	145,00	103,00	85,10	89,10	243,00	0,817	0,156
	P4	3	184,00	188,00	101,70	79,80	283,00	0,999	0,928
	P5	3	141,00	163,00	51,00	83,20	178,00	0,865	0,282
	P6	3	136,00	142,00	62,40	70,70	195,00	0,993	0,838
	P7	6	162,00	171,00	52,70	70,10	212,00	0,900	0,374
8 min	P0	4	189,00	203,00	47,60	122,00	228,00	0,888	0,374
	P1	5	159,00	180,00	73,50	46,80	240,00	0,954	0,767
	P2	3	207,00	121,00	206,70	57,60	443,00	0,87	0,294
	P3	3	176,00	139,00	115,80	83,50	306,00	0,923	0,462
	P4	3	122,00	136,00	43,00	73,50	156,00	0,919	0,448
	P5	3	161,00	165,00	84,50	75,10	244,00	0,999	0,929
	P6	3	154,00	161,00	80,20	71,00	231,00	0,995	0,862
	P7	6	169,00	176,00	56,50	70,90	230,00	0,928	0,566
12 min	P0	6	294,00	249,50	172,00	118,00	607,00	0,891	0,321
	P1	6	220,00	191,00	135,50	102,00	467,00	0,861	0,192
	P2	3	235,00	141,00	216,90	80,90	483,00	0,859	0,265
	P3	3	140,00	77,20	129,60	53,70	289,00	0,824	0,173
	P4	3	166,00	169,00	78,50	86,00	243,00	0,999	0,937
	P5	3	181,00	178,00	106,30	76,50	289,00	0,999	0,951
	P6	3	169,00	161,00	95,60	78,30	269,00	0,994	0,854
	P7	6	181,00	176,00	70,70	81,80	297,00	0,963	0,839

Fonte: Própria autora

Os dados foram distribuídos no gráfico apresentado pela Figura 29 e mostra a distribuição das amostras ao longo do período do ensaio. A Figura 29 (A) representa a operação inicial (0 minutos), enquanto 4 minutos é exposto pela Figura 29 (B) e a Figura 29 (C) e Figura 29 (D) refere-se a 8 e 12 minutos, respectivamente.

Figura 29 - Valores de turbidez em cada ponto do aparato com enchimento de leito 75% para as amostras de água sintética tipo II coletadas no tempo de ensaio de 0 minutos (A), 4 minutos (B), 8 minutos (C) e 12 minutos (D).



Fonte: Própria autora

O resultado da análise de variância dos grupos (Tabela 32), mostrou que entre as variáveis nenhuma apresentou diferenças estatísticas, ou seja, todas com p-valor maior que 0,05.

Da mesma forma que os dados expostos na turbidez do leito com empacotamento de 75% com a água sintética tipo I, os menores valores medianos de turbidez encontrados estão dispostos na região central do leito, entre o P2 e P5. Os valores máximos de P0 apresentaram altos valores em relação ao conjunto de dados coletados, ocasionado os *outliers* apresentados na Figura 29. Outra similaridade em relação aos dados da água sintética tipo I e o mesmo grau de empacotamento é decorrente da resposta de saída do decantador, com valores de medianas superiores ao do leito, que corrobora a hipótese do carreamento das partículas que não conseguem decantar pela interferência da passagem ocasionada pelo meio suporte.

Tabela 32 - Resultados dos testes estatísticos de análise de variância das amostras de turbidez da água sintética tipo II coletadas com enchimento de leito em 75% de meio suporte

Tempo de operação	Distribuição das amostras	Análise de variância	H	p-valor	Teste de comparação múltipla	Diferenças entre pontos
0 min	Normal	ANOVA	-	0,498	-	-
4 min	Normal	ANOVA	-	0,487	-	-
8 min	Normal	ANOVA	-	0,972	-	-
12 min	Não-normal	Kruskal-Wallis	4,493	0,722	-	-

Fonte: Própria autora.

5.3.2.5 Leito com 100% de enchimento

Da mesma maneira que nas demais configurações do decantador, os resultados da estatística descritiva para as amostras coletados no aparato com o leito com 100% de enchimento de meio suporte, estão apresentados na Tabela 32.

A faixa típica de valores encontrados na entrada (P0) e saída (P7) do aparato, exibiu valor mínimo de 93,1 NTU e valor máximo de 398 NTU para o P0 ao longo de toda operação. Enquanto, os valores máximo e mínimo do ponto 7 foram 86 NTU e 198 NTU, respectivamente. O gráfico tipo *boxplot* do ensaio executado com o leito fixo é apresentado na Figura 30. Mediana, percentis 25% e 75%, mínimos, máximos e *outliers* dos dados coletados em 0, 4, 8 e 12 minutos estão representados no *boxplot*.

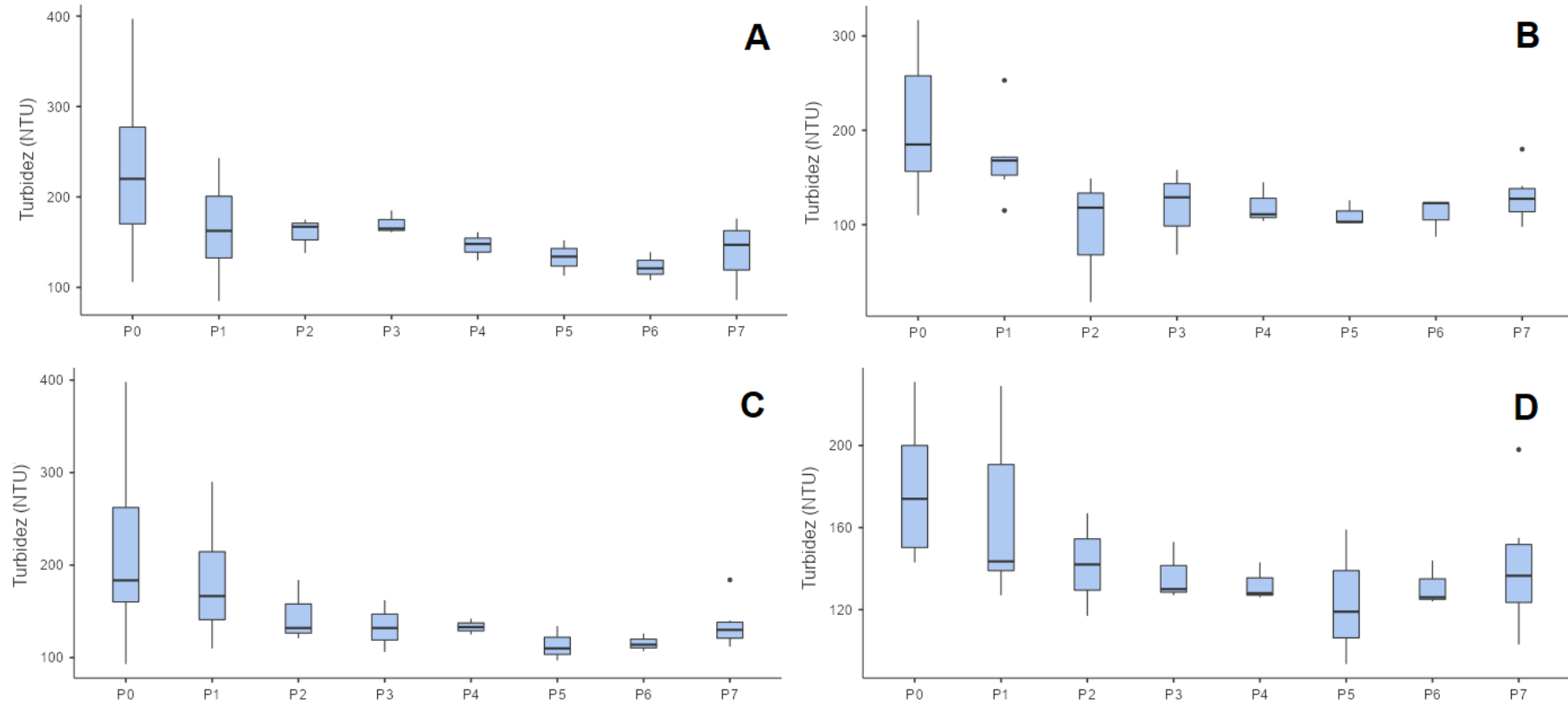
Semelhantemente ao comportamento das amostras de água sintética tipo I no leito com 100% de empacotamento nos ensaios de turbidez, os pontos com maiores saídas de partículas foram P1 e P2 que comprova a retenção de partículas por conta da condição do leito.

Tabela 33 - Estatística descritiva e teste de normalidade da turbidez das amostras de água sintética tipo II coletadas no aparato com enchimento de leito 100% de meio suporte

Tempo de ensaio	Ponto	N	Média	Mediana	Desvio-padrão	Mínimo	Máximo	Shapiro-Wilk	
								W	p
0 min	P0	6	232,20	220,00	103,27	106,00	397,00	0,967	0,874
	P1	6	164,80	163,00	57,13	85,00	243,00	0,987	0,982
	P2	3	160,00	167,00	19,47	138,00	175,00	0,903	0,395
	P3	3	170,30	165,00	12,86	161,00	185,00	0,871	0,298
	P4	3	146,30	148,00	15,57	130,00	161,00	0,991	0,823
	P5	3	133,00	134,00	19,52	113,00	152,00	0,998	0,915
	P6	3	122,70	121,00	15,57	108,00	139,00	0,991	0,823
	P7	6	139,00	147,00	34,37	86,00	176,00	0,927	0,554
4 min	P0	6	204,30	185,00	78,43	110,00	317,00	0,948	0,727
	P1	6	170,70	168,00	45,64	115,00	253,00	0,882	0,276
	P2	3	95,00	118,00	68,46	18,00	149,00	0,915	0,436
	P3	3	118,40	129,00	45,83	68,20	158,00	0,96	0,615
	P4	3	120,00	111,00	21,93	104,00	145,00	0,874	0,306
	P5	3	110,30	103,00	13,58	102,00	126,00	0,781	0,070
	P6	3	111,10	123,00	20,61	87,30	123,00	0,750	<0,001
	P7	6	130,60	128,00	28,57	97,80	180,00	0,942	0,675
8 min	P0	6	216,50	184,00	108,39	93,10	398,00	0,933	0,6
	P1	6	182,70	167,00	66,19	110,00	290,00	0,933	0,604
	P2	3	145,70	132,00	33,65	121,00	184,00	0,876	0,314
	P3	3	133,30	132,00	28,02	106,00	162,00	0,998	0,921
	P4	3	133,30	133,00	8,50	125,00	142,00	0,999	0,935
	P5	3	113,70	110,00	18,77	97,00	134,00	0,971	0,675
	P6	3	115,70	114,00	9,61	107,00	126,00	0,977	0,712
	P7	6	135,80	130,00	25,59	112,00	184,00	0,849	0,154
12 min	P0	6	178,80	174,00	34,95	143,00	231,00	0,924	0,538
	P1	6	164,50	144,00	41,90	127,00	229,00	0,821	0,090
	P2	3	142,00	142,00	25,00	117,00	167,00	1,000	1,000
	P3	3	136,70	130,00	14,22	127,00	153,00	0,835	0,202
	P4	3	132,30	128,00	9,29	126,00	143,00	0,837	0,206
	P5	3	123,80	119,00	33,02	93,50	159,00	0,984	0,757
	P6	3	131,30	126,00	11,02	124,00	144,00	0,824	0,174
	P7	6	141,70	137,00	32,82	103,00	198,00	0,952	0,753

Fonte: Própria autora

Figura 30- Valores de turbidez em cada ponto do aparato com enchimento de leito 100% para as amostras de água sintética tipo II coletadas no tempo de ensaio de 0 minutos (A), 4 minutos (B), 8 minutos (C) e 12 minutos (D).



Fonte: Própria autora.

A análise de variância para os dados obtidos no aparato com enchimento de 100% na operação de 0 e 8 minutos foi realizada (Tabela 34), e o p-valor obtido foi menor que 0,05 para a operação em 0, 8 e 12 minutos e, portanto, não estatisticamente significativo. Em 4 minutos de operação, o p-valor mostrou 0,165. Os grupos da variável de 4 minutos obtiveram p-valor de 0,036, com poder de performance α equivalente a 0,539. Entretanto, o teste complementar de Tukey não apresentou diferenças estatísticas entre os grupos.

Tabela 34 - Resultados dos testes estatísticos de análise de variância das amostras de turbidez da água sintética tipo II coletadas com enchimento de leite em 100% de meio suporte

Tempo de operação	Distribuição das amostras	Análise de variância	H	p-valor	Teste de comparação múltipla	Diferenças entre pontos
0 min	Não-normal	Kruskal-Wallis	9,130	0,243	-	-
4 min	Normal	ANOVA	-	0,036	Tukey	-
8 min	Não-normal	Kruskal-Wallis	10,445	0,165	-	-
12 min	Normal	ANOVA	-	0,166	-	-

Fonte: Própria autora.

A alta variabilidade de P0 (afluente bruto) apresentada nos gráficos *boxplot* nos ensaios de turbidez são justificados pela discrepância de concentração apresentada nas amostras coletadas no tanque de agitação. A incoerência é justificada pela utilização do dispositivo sem defletores. Além disso, o tanque de agitação desse trabalho operou sobre um grau de agitação suave. Sabendo que o grau de agitação do tanque é obtido pela relação potência (Watts) pelo volume (m³), uma melhor uniformidade do afluente deve ser obtida na utilização de um motor mais potente na faixa de 690 a 1.125 Watts.

5.4 Sólidos Totais

Os poluentes presentes na água somam a carga de sólidos que simplificarmente pode ser identificado pelas suas características químicas ou físicas (VON SPERLING, 2014). Os ensaios de sólidos totais foram executados para determinar a retenção da carga total das partículas no decantador de leite móvel. Os resultados apresentados foram classificados pela composição do líquido ensaiado e pelo empacotamento do leite móvel (i.e.: 0%, 25%, 50%, 75% e 100%). A água sintética tipo I era composta de 1.500 L de água e 1,9 kg do solo selecionado e a água sintética tipo II por 1.500 L de água e 10 kg do solo selecionado.

5.4.1 Avaliação dos Sólidos Totais: Água sintética tipo I

5.4.1.1 Leito sem meio suporte

A avaliação estatística descritiva das amostras de água sintética tipo I coletadas na configuração do aparato com leito sem a inserção de meio suporte está apresentada na Tabela 35. A tabela também apresenta os valores do teste de normalidade Shapiro-Wilk.

Em relação ao ponto P0, o valor mínimo obtido ao longo do ensaio foi 160 mg/L, enquanto o valor máximo no mesmo ponto foi 429 mg/L. Para os valores encontrados no ponto de saída do aparato (P7), o valor mínimo foi 128 mg/L e o valor máximo ao longo do ensaio foi 326 mg/L.

A análise de variância das amostras mostrou que não houve diferenças estatísticas entre os pontos em todos os tempos de operação. A Tabela 36 apresenta o método de análise de variância que foram submetidas as amostras de acordo com o resultado do teste de distribuição das amostras Shapiro-Wilk.

A Figura 31 apresenta o gráfico de caixas com os valores estatísticos distribuídos ao de cada tempo de operação. O *boxplot* da operação em 0 minutos com os grupos de P0 a P7 são representados pela Figura 31 (A), os da operação em 4 minutos, pela Figura 31 (B), os de 8 minutos pela Figura 31 (C) e, conseqüentemente os de operação 12 minutos pela Figura 31 (D). Mediana, percentis 25% e 75%, mínimos, máximos e *outliers* estão apresentados no gráfico.

A mediana das concentrações de sólidos totais ao longo dos pontos do decantador apresentou uma dispersão maior dos dados em relação aos resultados de turbidez da água sintética I. As Figuras 31 (C) e 31 (D) mostram medianas de concentração de sólidos totais mais altos no ponto P4 decorrentes do acúmulo de partículas na grelha próxima a esse ponto.

Tabela 35 - Estatística descritiva e teste de normalidade de sólidos totais das amostras de água sintética tipo I coletadas no aparato sem inserção de meio suporte

Tempo de Ensaio	Ponto	N	Média	Mediana	Desvio-padrão	Mínimo	Máximo	Shapiro-Wilk	
								W	p
0 min	P0	6	235,00	235,00	50,93	160,00	309,00	0,99	0,99
	P1	6	215,00	201,00	54,56	158,00	312,00	0,903	0,392
	P2	3	210,00	215,00	9,54	199,00	216,00	0,794	0,1
	P3	3	211,00	212,00	8,54	202,00	219,00	0,99	0,806
	P4	3	222,00	204,00	33,23	201,00	260,00	0,788	0,086
	P5	3	223,00	202,00	81,00	154,00	312,00	0,951	0,574
	P6	3	190,00	194,00	28,21	160,00	216,00	0,985	0,765
4 min	P7	6	194,00	196,00	47,74	128,00	261,00	0,977	0,935
	P0	6	246,00	229,00	95,30	163,00	429,00	0,793	0,051
	P1	6	208,00	179,00	70,50	136,00	330,00	0,866	0,209
	P2	3	158,00	153,00	24,30	136,00	184,00	0,972	0,681
	P3	3	190,00	162,00	48,50	162,00	246,00	0,75	<,001
	P4	3	222,00	216,00	20,10	205,00	244,00	0,94	0,529
	P5	3	218,00	215,00	33,10	186,00	252,00	0,995	0,867
8 min	P6	3	199,00	188,00	45,00	160,00	248,00	0,958	0,605
	P7	6	211,00	214,00	42,60	162,00	262,00	0,904	0,401
	P0	6	207,00	218,00	34,50	167,00	256,00	0,864	0,203
	P1	6	179,00	169,00	16,00	167,00	203,00	0,75	0,02
	P2	3	167,00	153,00	31,80	144,00	203,00	0,861	0,271
	P3	3	163,00	152,00	25,00	146,00	192,00	0,846	0,23
	P4	3	226,00	256,00	52,30	166,00	257,00	0,758	0,018
12 min	P5	3	203,00	195,00	48,50	159,00	255,00	0,98	0,726
	P6	3	237,00	220,00	81,80	165,00	326,00	0,968	0,655
	P7	6	221,00	202,00	57,10	167,00	326,00	0,866	0,209
	P0	6	215,00	214,00	30,50	174,00	257,00	0,978	0,939
	P1	6	193,00	189,00	26,20	166,00	239,00	0,912	0,453
	P2	3	221,00	230,00	17,70	201,00	233,00	0,820	0,162
	P3	3	216,00	208,00	34,70	186,00	254,00	0,960	0,616
	P4	3	250,00	264,00	43,30	201,00	284,00	0,918	0,445
	P5	3	212,00	201,00	23,50	196,00	239,00	0,836	0,203
	P6	3	215,00	202,00	50,30	173,00	271,00	0,947	0,558
	P7	6	213,00	204,00	34,50	180,00	271,00	0,908	0,424

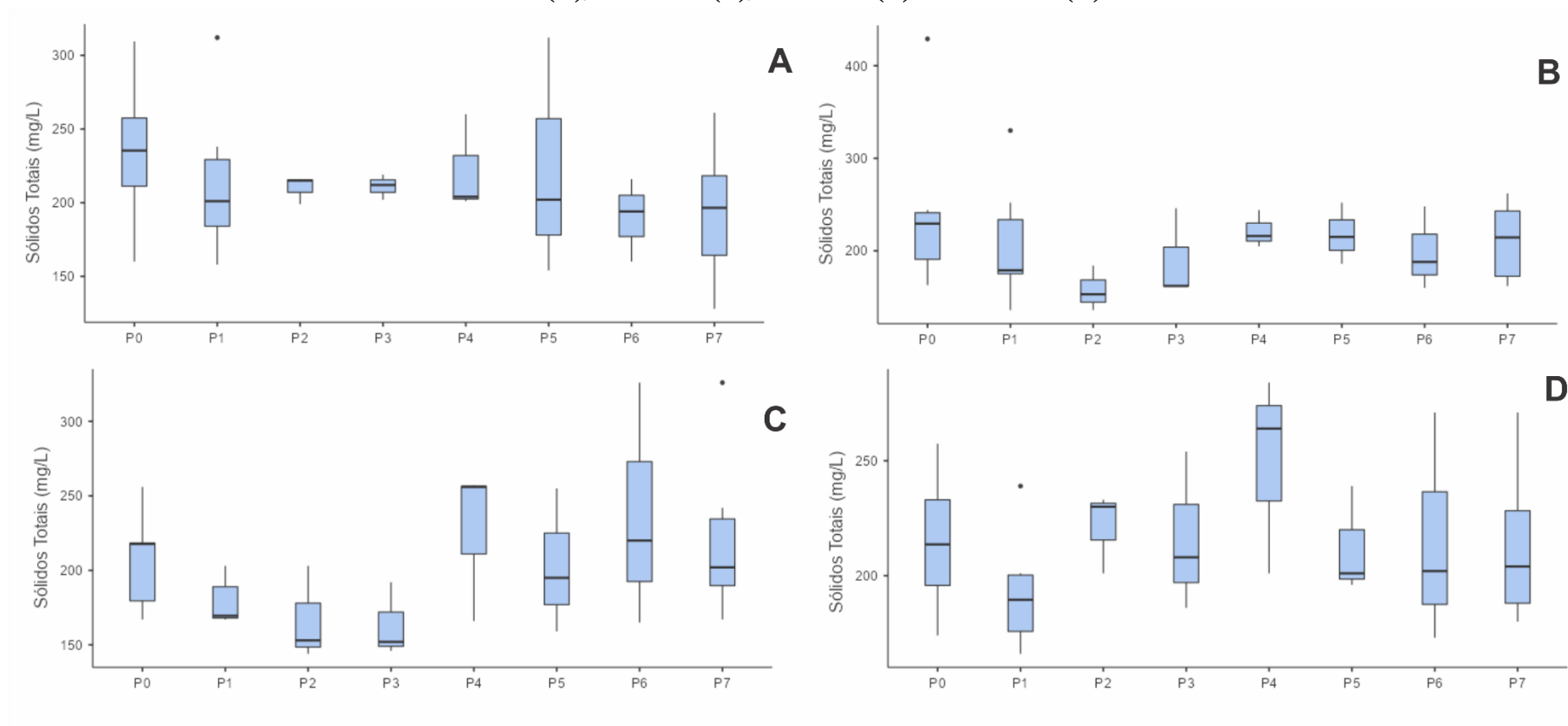
Fonte: Própria autora.

Tabela 36 - Resultados dos testes estatísticos de análise de variância das amostras de ST da água sintética tipo I coletadas com leito sem meio suporte

Tempo de operação	Distribuição das amostras	Análise de variância	H	p-valor	Teste de comparação múltipla	Diferenças entre pontos
0 min	Normal	ANOVA	-	0,855	-	-
4 min	Não-normal	Kruskal-Wallis	6,495	0,483	-	-
8 min	Normal	ANOVA	-	0,261	-	-
12 min	Normal	ANOVA	-	0,539	-	-

Fonte: Própria autora.

Figura 31- Valores de sólidos totais em cada ponto do aparato sem meio suporte para as amostras de água sintética tipo I coletadas no tempo de ensaio de 0 minutos (A), 4 minutos (B), 8 minutos (C) e 12 minutos (D).



Fonte: Própria autora.

5.4.1.2 Leito com 25% de enchimento

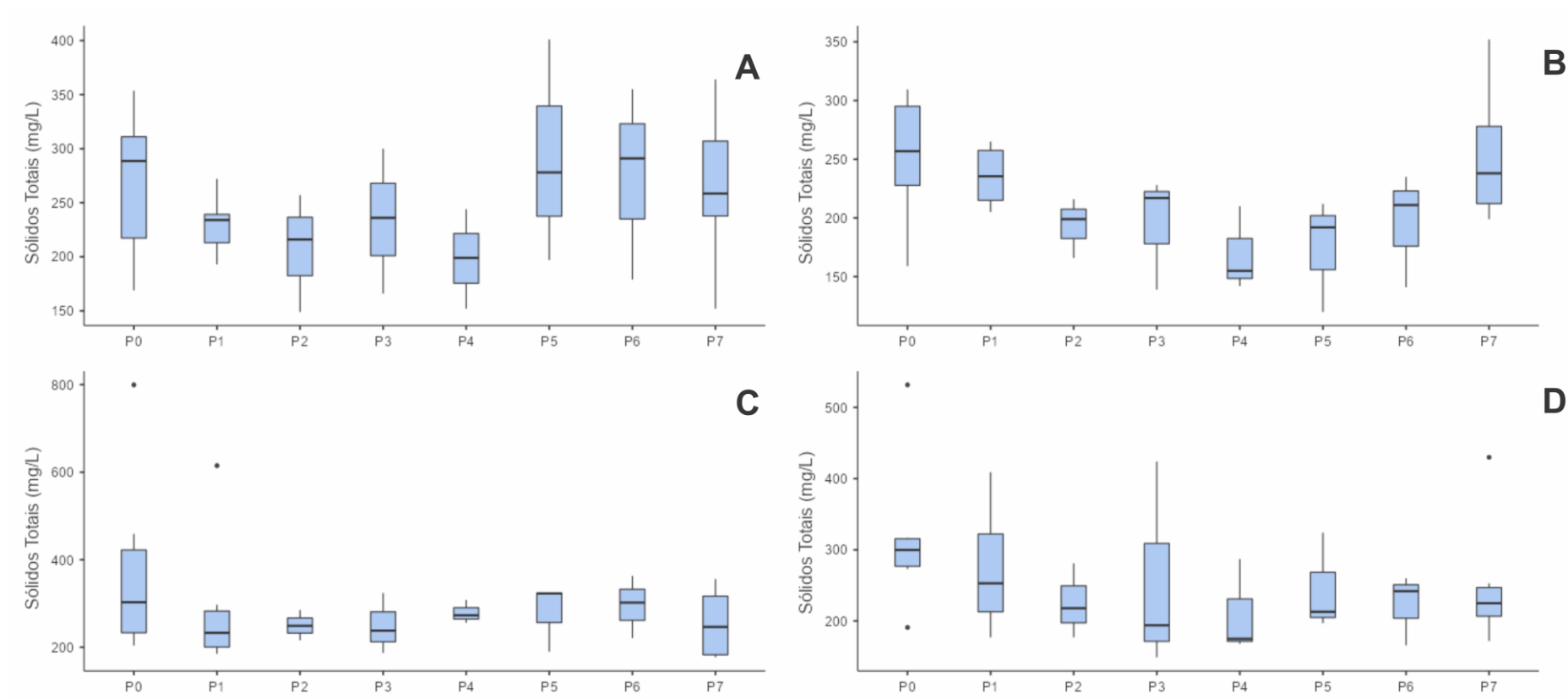
A estatística descritiva e o teste de normalidade dos pontos amostrais do ensaio executado com 25% de enchimento de meio suporte são apresentados na Tabela 37 e expressos em forma de gráfico tipo *boxplot* pela Figura 32.

Tabela 37- Estatística descritiva e teste de normalidade de sólidos totais das amostras de água sintética tipo I coletadas no aparato com enchimento de 25% de meio suporte

Tempo de Ensaio	Ponto	N	Média	Mediana	Desvio-padrão	Mínimo	Máximo	Shapiro-Wilk	
								W	p
0 min	P0	6	269,00	289,00	71,10	169,00	354,00	0,932	0,599
	P1	6	230,00	234,00	27,60	193,00	272,00	0,963	0,842
	P2	3	207,00	216,00	54,50	149,00	257,00	0,981	0,736
	P3	3	234,00	236,00	67,00	166,00	300,00	0,999	0,951
	P4	3	198,00	199,00	46,00	152,00	244,00	1000	0,976
	P5	3	292,00	278,00	102,70	197,00	401,00	0,986	0,774
	P6	3	275,00	291,00	89,10	179,00	355,00	0,976	0,702
4 min	P7	6	265,00	258,00	73,20	152,00	364,00	0,98	0,952
	P0	6	251,00	257,00	56,30	159,00	309,00	0,935	0,616
	P1	6	236,00	235,00	25,80	205,00	265,00	0,891	0,325
	P2	3	194,00	199,00	25,40	166,00	216,00	0,967	0,651
	P3	3	195,00	217,00	48,50	139,00	228,00	0,841	0,217
	P4	3	169,00	155,00	36,10	142,00	210,00	0,887	0,346
	P5	3	175,00	192,00	48,40	120,00	212,00	0,904	0,398
8 min	P6	3	196,00	211,00	48,80	141,00	235,00	0,926	0,474
	P7	6	254,00	238,00	57,80	199,00	352,00	0,903	0,393
	P0	6	380,00	303,00	225,00	204,00	800,00	0,813	0,076
	P1	6	293,00	233,00	163,00	185,00	615,00	0,71	0,008
	P2	3	250,00	249,00	34,50	216,00	285,00	0,999	0,952
	P3	3	250,00	238,00	69,20	187,00	324,00	0,979	0,72
	P4	3	279,00	273,00	26,50	256,00	308,00	0,962	0,623
12 min	P5	3	279,00	323,00	77,40	190,00	325,00	0,761	0,025
	P6	3	295,00	302,00	71,20	221,00	363,00	0,993	0,845
	P7	6	255,00	246,00	82,20	177,00	356,00	0,801	0,06
	P0	6	319,00	300,00	113,80	191,00	532,00	0,841	0,134
	P1	6	273,00	253,00	87,50	177,00	409,00	0,941	0,669
	P2	3	225,00	218,00	52,40	177,00	281,00	0,985	0,768
	P3	3	256,00	194,00	147,50	149,00	424,00	0,869	0,292
	P4	3	210,00	175,00	66,80	168,00	287,00	0,794	0,100
	P5	3	245,00	213,00	69,20	197,00	324,00	0,843	0,221
	P6	3	223,00	242,00	49,90	166,00	260,00	0,887	0,346
	P7	6	251,00	225,00	91,70	172,00	430,00	0,778	0,037

Fonte: Própria autora.

Figura 32 - Valores de sólidos totais em cada ponto do aparato com enchimento em 25% de meio suporte para as amostras de água sintética tipo I coletadas no tempo de ensaio de 0 minutos (A), 4 minutos (B), 8 minutos (C) e 12 minutos (D).



Fonte: Própria autora.

As amostras do ponto P0 analisadas, apresentam como valor mínimo 159 mg/L e valor máximo de 800 mg/L, em relação as amostras coletadas no ponto de saída (P7) 152 mg/L foi o valor mínimo durante a operação e 430 mg/L o valor máximo.

De semelhante modo aos demais ensaios, a distribuição dos dados estatísticos encontrados ao longo da operação nessa configuração de leito, foram distribuídas no gráfico da Figura 32. O gráfico da operação em 0 minutos com os grupos de P0 a P7 são representados pela Figura 32 (A), os da operação em 4 minutos, pela Figura 32 (B), os de 8 minutos pela Figura 32 (C) e, conseqüentemente os de operação 12 minutos pela Figura 32 (D). Mediana, percentis 25% e 75%, mínimos, máximos e *outliers* estão apresentados no *boxplot*.

A análise de variância para cada tempo de operação foi definida de acordo com o resultado de teste de normalidade (Tabela 38), sendo assim, os pontos amostrais na operação em 0 e 4 minutos apresentaram distribuição normal e foram submetidos ao ANOVA. As amostras da operação de 8 e 12 minutos apresentaram distribuição não normal e foram submetidas ao teste de Kruskal-Wallis. As amostras de todos tempos de operação mostraram p-valor acima de 0,05, que significa que não há diferenças estatísticas entre os pontos nesse ensaio.

Tabela 38 - Resultados dos testes estatísticos de análise de variância das amostras de ST da água sintética tipo I coletadas com enchimento de 25% de meio suporte

Tempo de operação	Distribuição das amostras	Análise de variância	H	p-valor	Teste de comparação múltipla	Diferenças entre pontos
0 min	Normal	ANOVA	-	0,548	-	-
4 min	Normal	ANOVA	-	0,065	-	-
8 min	Não-normal	Kruskal-Wallis	2,941	0,890	-	-
12 min	Não-normal	Kruskal-Wallis	5,367	0,615	-	-

Fonte: Própria autora.

5.4.1.3 Leito com 50% de enchimento

A estatística descritiva e teste de normalidade Shapiro-Wilk das amostras coletadas no decantador com 50% de enchimento em meio suporte no leito é apresentado na Tabela 39.

O gráfico que apresenta a distribuição dos resultados da estatística descritiva para as amostras coletas nessa configuração do aparato é apresentada na Figura 33.

Nessa configuração do leito, as amostras de 0 e 12 minutos foram submetidas ao ANOVA, enquanto que as amostras de 4 e 8 minutos foram submetidas ao teste Kruskal-Wallis. Entretanto, apenas as amostras de 0 minutos de operação apresentaram diferenças estatísticas entre os pontos, conforme apresentado na Tabela 40.

Tabela 39 - Estatística descritiva e teste de normalidade de sólidos totais das amostras de água sintética tipo I coletadas no aparato com enchimento de 50% de meio suporte

Tempo de Ensaio	Ponto	N	Média	Mediana	Desvio-padrão	Mínimo	Máximo	Shapiro-Wilk	
								W	p
0 min	P0	6	311,00	309,00	48,35	242,00	386,00	0,972	0,905
	P1	6	262,00	259,00	24,53	227,00	297,00	0,987	0,981
	P2	3	261,00	252,00	27,62	239,00	292,00	0,920	0,454
	P3	3	245,00	230,00	33,72	222,00	284,00	0,845	0,227
	P4	3	217,00	218,00	4,16	212,00	220,00	0,923	0,463
	P5	3	223,00	234,00	37,72	181,00	254,00	0,936	0,512
	P6	3	235,00	233,00	22,59	214,00	259,00	0,992	0,829
	P7	6	229,00	215,00	33,59	199,00	281,00	0,852	0,164
4 min	P0	6	301,00	283,00	93,90	196,00	459,00	0,943	0,683
	P1	6	256,00	247,00	53,90	194,00	353,00	0,907	0,414
	P2	3	335,00	287,00	135,00	230,00	487,00	0,906	0,406
	P3	3	353,00	303,00	159,40	224,00	531,00	0,927	0,478
	P4	3	299,00	319,00	61,50	230,00	348,00	0,921	0,455
	P5	3	280,00	307,00	47,10	226,00	308,00	0,759	0,020
	P6	3	341,00	272,00	141,30	247,00	503,00	0,822	0,169
	P7	6	221,00	214,00	30,80	188,00	277,00	0,903	0,395
8 min	P0	6	269,00	265,00	67,47	196,00	359,00	0,921	0,515
	P1	6	224,00	221,00	41,37	185,00	276,00	0,801	0,06
	P2	3	251,00	254,00	32,08	218,00	282,00	0,995	0,862
	P3	3	261,00	202,00	108,89	195,00	387,00	0,777	0,061
	P4	3	228,00	225,00	33,08	196,00	262,00	0,995	0,867
	P5	3	217,00	220,00	22,65	193,00	238,00	0,987	0,78
	P6	3	209,00	217,00	24,02	182,00	228,00	0,917	0,441
	P7	6	231,00	214,00	58,94	192,00	348,00	0,694	0,005
12 min	P0	6	274,00	297,00	63,29	182,00	333,00	0,866	0,210
	P1	6	267,00	245,00	72,84	214,00	413,00	0,686	0,004
	P2	3	236,00	213,00	63,31	188,00	308,00	0,898	0,380
	P3	3	217,00	208,00	20,07	203,00	240,00	0,849	0,238
	P4	3	180,00	180,00	11,50	168,00	191,00	0,999	0,952
	P5	3	219,00	191,00	55,90	182,00	283,00	0,816	0,154
	P6	3	204,00	214,00	61,16	138,00	259,00	0,979	0,720
	P7	6	222,00	224,00	52,44	135,00	285,00	0,950	0,743

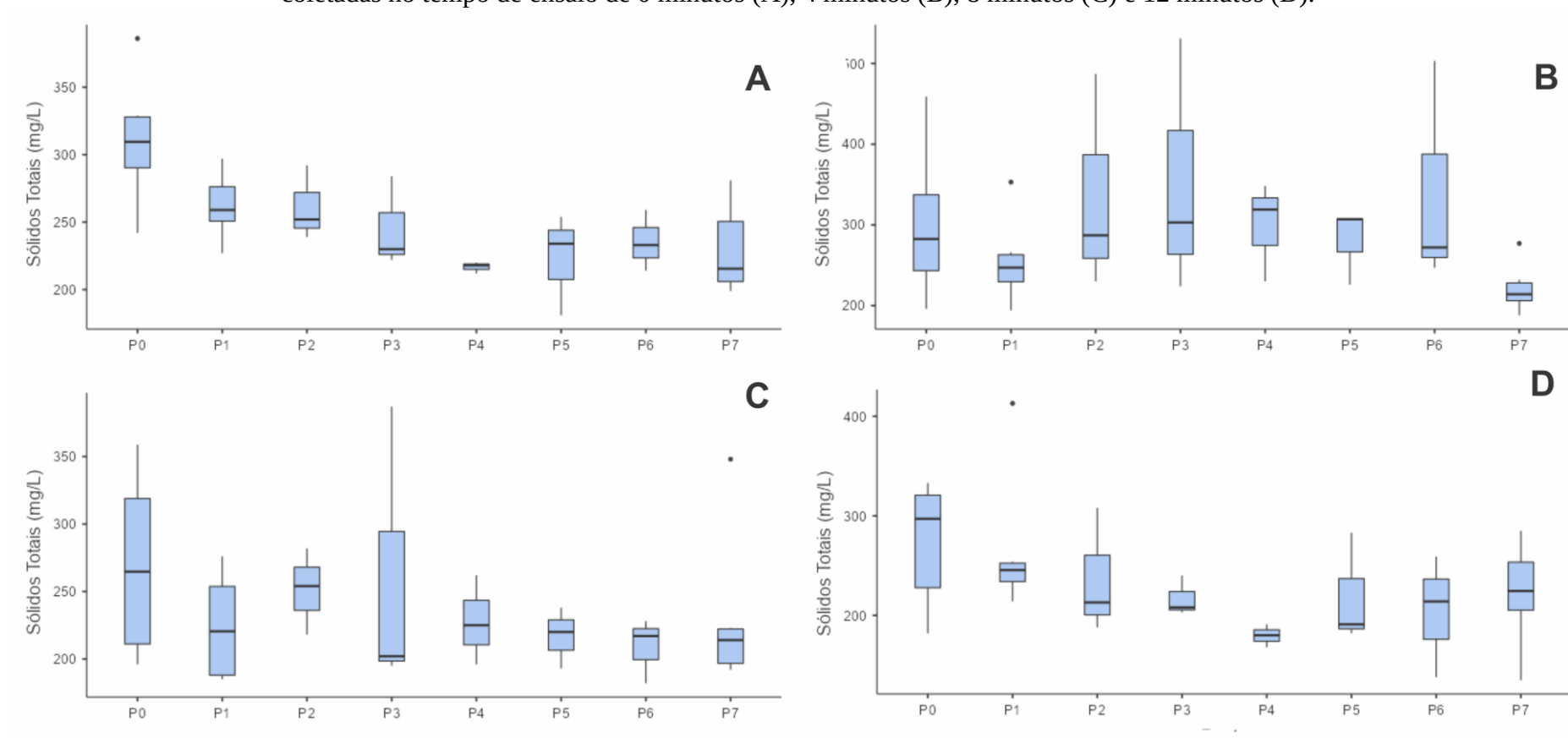
Fonte: Própria autora.

Tabela 40 - Resultados dos testes estatísticos de análise de variância das amostras de ST da água sintética tipo I coletadas com enchimento de 50% de meio suporte

Tempo de operação	Distribuição das amostras	Análise de variância	H	p-valor	Teste de comparação múltipla	Diferenças entre pontos
0 min	Normal	ANOVA	-	0,004	Tukey	P0 e P4 P0 e P5 P0 e P7
4 min	Não-normal	Kruskal-Wallis	8,216	0,314	-	-
8 min	Não-normal	Kruskal-Wallis	4,852	0,678	-	-
12 min	Normal	ANOVA	-	0,293	-	-

Fonte: Própria autora.

Figura 33 - Valores de sólidos totais em cada ponto do aparato com enchimento em 50% de meio suporte para as amostras de água sintética tipo I coletadas no tempo de ensaio de 0 minutos (A), 4 minutos (B), 8 minutos (C) e 12 minutos (D).



Fonte: Própria autora.

O ponto P0 que representa a entrada do sistema mostrou valores máximo e mínimo ao longo da operação de 459 mg/L e 182 mg/L, respectivamente. Em relação ao ponto de saída do sistema (P7), os valores máximos e mínimos obtidos foram 348 mg/L e 135 mg/L, respectivamente.

O gráfico da operação em 0 minutos com os grupos de P0 a P7 são representados pela Figura 33 (A), os da operação em 4 minutos, pela Figura 33 (B), os de 8 minutos pela Figura 33 (C) e, conseqüentemente os de operação 12 minutos pela Figura 33 (D). Mediana, percentis 25% e 75%, mínimos, máximos e *outliers* estão apresentados no *boxplot*.

Os resultados apresentados no leito com 50% de empacotamento mostram, com exceção da operação em 12 minutos, concentração decrescente de ST ao longo do leito. O *boxplot* apresenta dispersão dos dados em P3 decorrente ou de erro de amostragem ou de acúmulo de partículas nessa região.

5.4.1.4 Leito com 75% de enchimento

A Tabela 41 apresenta os valores obtidos a partir da estatística descritiva e teste de normalidade dos pontos amostrais do decantador com o enchimento do leito em 75% de meio suporte.

Os resultados mostram que os valores mínimos na entrada do sistema (P0) e saída do sistema (P7) são respectivamente 159 mg/L e 137 mg/L, enquanto que os valores máximos também em ordem são 705mg/L e 319 mg/L.

O gráfico da operação em 0 minutos com os grupos de P0 a P7 são representados pela Figura 34 (A), os da operação em 4 minutos, pela Figura 34 (B), os de 8 minutos pela Figura 34 (C) e, conseqüentemente os de operação 12 minutos pela Figura 34 (D). Mediana, percentis 25% e 75%, mínimos, máximos e *outliers* estão apresentados no *boxplot*.

Em relação a análise de variância nessa configuração do leito (Tabela 42), 0, 4 e 8 minutos de operação apresentaram distribuição normal e foram submetidos ao ANOVA, porém não apresentaram diferenças estatísticas entre os pontos. A operação de 12 minutos não mostrou distribuição normal das amostras e foi submetido ao teste de Kruskal-Wallis, mas também não apresentou diferenças entre os grupos.

Tabela 41 - Estatística descritiva e teste de normalidade de sólidos totais das amostras de água sintética tipo I coletadas no aparato com enchimento de 75% de meio suporte

Tempo de Ensaio	Ponto	N	Média	Mediana	Desvio-padrão	Mínimo	Máximo	Shapiro-Wilk	
								W	p
0 min	P0	6	268,00	261,00	63,49	174,00	365,00	0,975	0,923
	P1	6	237,00	236,00	34,05	193,00	281,00	0,966	0,862
	P2	3	162,00	180,00	46,11	110,00	197,00	0,890	0,354
	P3	3	188,00	196,00	18,93	166,00	201,00	0,855	0,253
	P4	3	203,00	191,00	47,71	163,00	256,00	0,95	0,569
	P5	3	193,00	191,00	34,04	160,00	228,00	0,997	0,903
	P6	3	202,00	206,00	7,81	193,00	207,00	0,803	0,122
	P7	6	211,00	222,00	45,91	143,00	261,00	0,933	0,605
4 min	P0	6	236,00	227,00	33,72	204,00	280,00	0,853	0,167
	P1	6	211,00	213,00	22,49	183,00	236,00	0,897	0,355
	P2	3	228,00	219,00	17,67	216,00	248,00	0,82	0,162
	P3	3	201,00	188,00	30,07	179,00	235,00	0,867	0,287
	P4	3	219,00	216,00	24,17	197,00	245,00	0,986	0,771
	P5	3	197,00	204,00	28,59	166,00	222,00	0,959	0,612
	P6	3	206,00	206,00	22,00	184,00	228,00	1,000	1,000
	P7	6	179,00	174,00	39,36	137,00	225,00	0,871	0,23
8 min	P0	6	257,00	239,00	77,30	159,00	350,00	0,898	0,363
	P1	6	220,00	225,00	48,46	155,00	269,00	0,897	0,357
	P2	3	231,00	254,00	41,00	184,00	256,00	0,771	0,047
	P3	3	210,00	223,00	30,29	175,00	231,00	0,855	0,253
	P4	3	199,00	202,00	37,59	160,00	235,00	0,995	0,868
	P5	3	230,00	215,00	78,58	160,00	315,00	0,973	0,683
	P6	3	202,00	183,00	48,38	166,00	257,00	0,884	0,337
	P7	6	222,00	216,00	57,47	153,00	319,00	0,954	0,77
12 min	P0	6	397,00	350,00	158,44	260,00	705,00	0,789	0,047
	P1	6	327,00	276,00	112,63	243,00	542,00	0,758	0,024
	P2	3	245,00	232,00	45,90	207,00	296,00	0,940	0,527
	P3	3	282,00	252,00	60,25	242,00	351,00	0,818	0,159
	P4	3	275,00	276,00	12,53	262,00	287,00	0,995	0,868
	P5	3	315,00	291,00	62,18	269,00	386,00	0,885	0,340
	P6	3	269,00	288,00	49,89	212,00	306,00	0,887	0,346
	P7	6	247,00	253,00	34,87	198,00	286,00	0,937	0,639

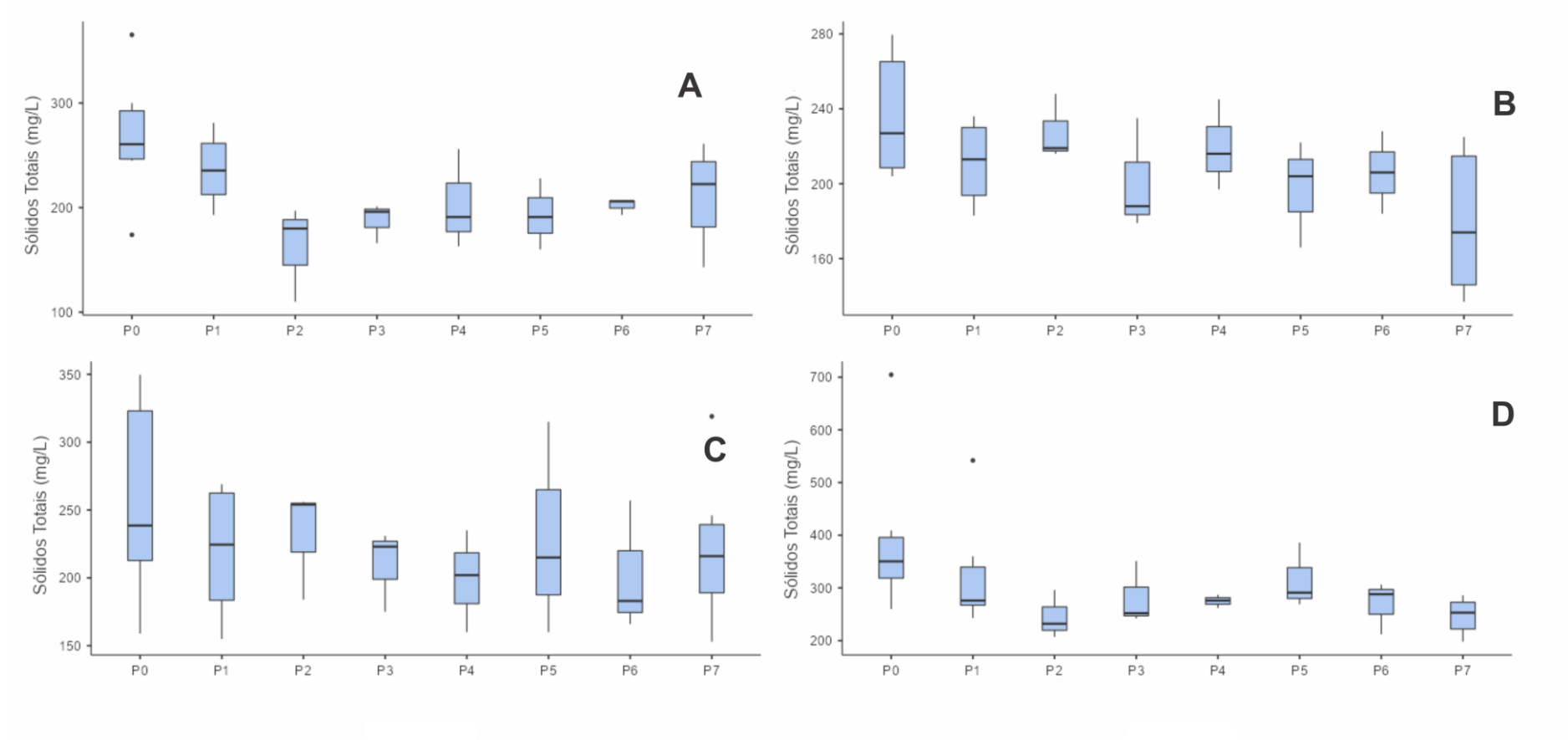
Fonte: Própria autora

Tabela 42 - Resultados dos testes estatísticos de análise de variância das amostras de ST da água sintética tipo I coletadas com enchimento de 75% de meio suporte

Tempo de operação	Distribuição das amostras	Análise de variância	H	p-valor	Teste de comparação múltipla	Diferenças entre pontos
0 min	Normal	ANOVA	-	0,051	-	-
4 min	Normal	ANOVA	-	0,111	-	-
8 min	Normal	ANOVA	-	0,850	-	-
12 min	Não-normal	Kruskal-Wallis	10,765	0,149	-	-

Fonte: Própria autora.

Figura 34 - Valores de sólidos totais em cada ponto do aparato com enchimento em 75% de meio suporte para as amostras de água sintética tipo I coletadas no tempo de ensaio de 0 minutos (A), 4 minutos (B), 8 minutos (C) e 12 minutos (D).



Fonte: Própria autora.

5.4.1.5 Leito com 100% de enchimento

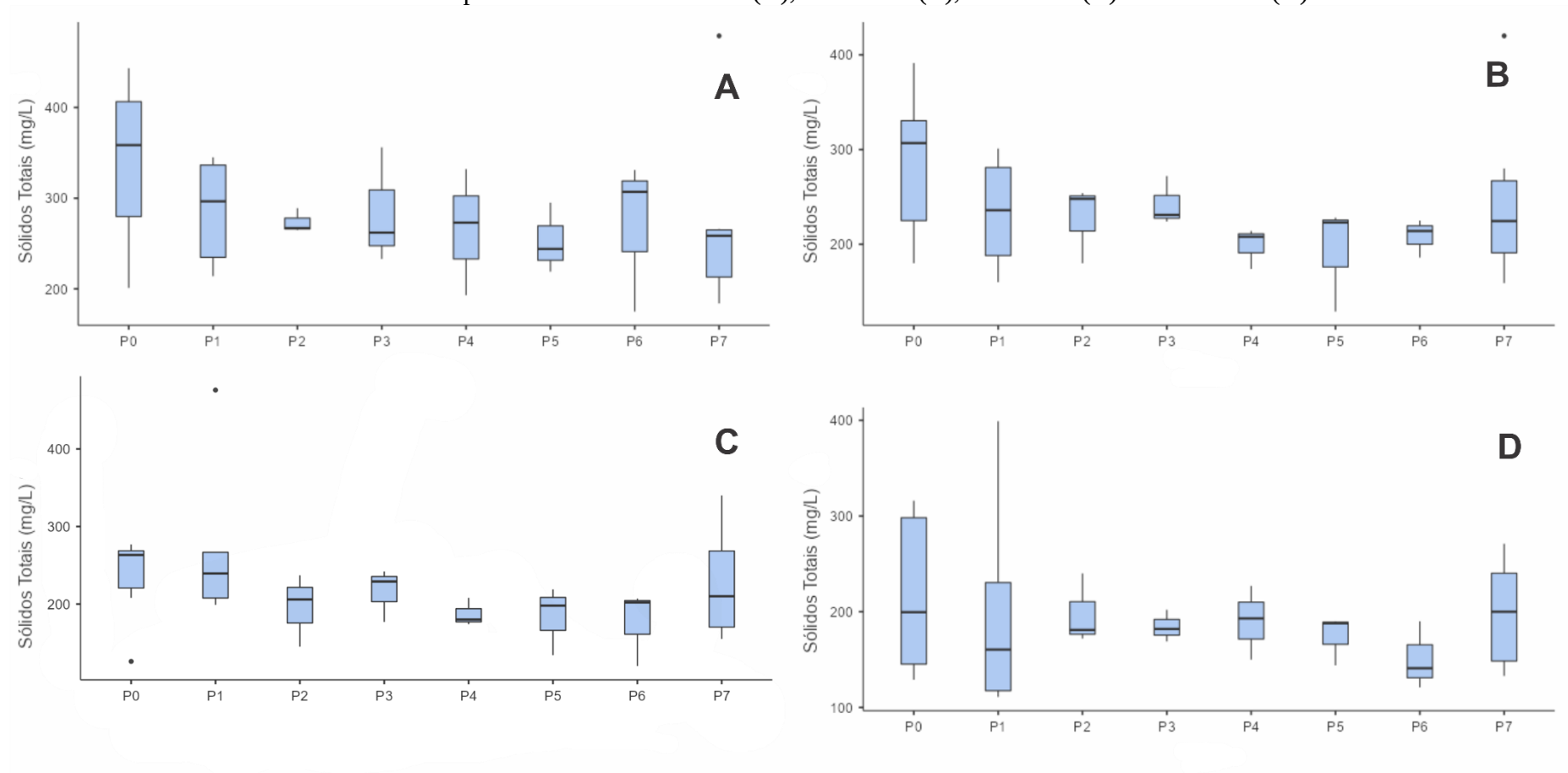
A Tabela 43 apresenta os valores obtidos a partir da estatística descritiva e teste de normalidade dos pontos amostrais do decantador com o enchimento do leito em 100% de meio suporte, a Tabela 44 mostra a análise de variância entre as amostras e a Figura 35 apresenta o gráfico de caixas dos dados apresentados.

Tabela 43 - Estatística descritiva e teste de normalidade de sólidos totais das amostras de água sintética tipo I coletadas no aparato com enchimento de 100% de meio suporte

Tempo de Ensaio	Ponto	N	Média	Mediana	Desvio-padrão	Mínimo	Máximo	Shapiro-Wilk	
								W	p
0 min	P0	6	340,00	359,00	94,10	201,00	443,00	0,933	0,603
	P1	6	286,00	297,00	58,80	214,00	345,00	0,862	0,195
	P2	3	274,00	267,00	13,30	265,00	289,00	0,812	0,144
	P3	3	284,00	262,00	64,30	233,00	356,00	0,915	0,434
	P4	3	266,00	273,00	69,80	193,00	332,00	0,992	0,834
	P5	3	253,00	244,00	38,70	219,00	295,00	0,962	0,628
	P6	3	271,00	307,00	84,00	175,00	331,00	0,862	0,274
	P7	6	274,00	258,00	106,10	184,00	479,00	0,776	0,036
4 min	P0	6	287,00	307,00	81,70	180,00	391,00	0,920	0,508
	P1	6	233,00	236,00	59,00	160,00	301,00	0,903	0,39
	P2	3	227,00	248,00	41,10	180,00	254,00	0,81	0,14
	P3	3	242,00	231,00	25,90	224,00	272,00	0,857	0,259
	P4	3	199,00	208,00	21,60	174,00	214,00	0,86	0,266
	P5	3	193,00	223,00	55,80	129,00	228,00	0,788	0,086
	P6	3	208,00	214,00	20,10	186,00	225,00	0,940	0,529
	P7	6	248,00	224,00	94,00	159,00	420,00	0,872	0,235
8 min	P0	6	234,00	263,00	58,60	126,00	277,00	0,770	0,031
	P1	6	271,00	239,00	104,70	199,00	476,00	0,729	0,012
	P2	3	196,00	206,00	46,80	145,00	237,00	0,966	0,645
	P3	3	216,00	229,00	34,40	177,00	242,00	0,892	0,360
	P4	3	187,00	180,00	18,10	174,00	208,00	0,878	0,317
	P5	3	184,00	198,00	44,30	134,00	219,00	0,921	0,457
	P6	3	176,00	202,00	48,90	120,00	207,00	0,793	0,098
	P7	6	227,00	210,00	72,80	155,00	340,00	0,91	0,438
12 min	P0	6	217,00	200,00	87,30	129,00	316,00	0,821	0,090
	P1	6	198,00	160,00	111,30	111,00	399,00	0,832	0,113
	P2	3	198,00	181,00	36,90	172,00	240,00	0,847	0,233
	P3	3	184,00	182,00	16,60	169,00	202,00	0,985	0,767
	P4	3	190,00	193,00	38,60	150,00	227,00	0,995	0,871
	P5	3	174,00	188,00	26,00	144,00	190,00	0,783	0,073
	P6	3	151,00	141,00	35,50	121,00	190,00	0,944	0,545
	P7	6	198,00	200,00	57,60	133,00	271,00	0,911	0,446

Fonte: Própria autora.

Figura 35 - Valores de sólidos totais em cada ponto do aparato com enchimento em 100% de meio suporte para as amostras de água sintética tipo I coletadas no tempo de ensaio de 0 minutos (A), 4 minutos (B), 8 minutos (C) e 12 minutos (D).



Fonte: Própria autora.

Os pontos P0 e P7 apresentam valores máximos, em ordem, de 443 mg/L e 479 mg/L e 126 mg/L e 133 mg/L valores mínimos, respectivamente. Além disso, nessa configuração as a distribuição amostral foi normal para 0 e 4 minutos de operação e não normal para 8 e 12 minutos. Não foram apresentadas diferenças entre os pontos amostrais no leito com 100% de enchimento. O gráfico da operação em 0, 4, 8 e 12 minutos com os grupos de P0 a P7 são representados pela Figura 35 (A), Figura 35 (B), Figura 35 (C) e Figura 35 (D), respectivamente. Mediana, percentis 25% e 75%, mínimos, máximos e *outliers* estão apresentados no *boxplot*.

Tabela 44 - Resultados dos testes estatísticos de análise de variância das amostras de ST da água sintética tipo I coletadas com enchimento de 100% de meio suporte

Tempo de operação	Distribuição das amostras	Análise de variância	H	p-valor	Teste de comparação múltipla	Diferenças entre pontos
0 min	Normal	ANOVA	-	0,786	-	-
4 min	Normal	ANOVA	-	0,487	-	-
8 min	Não-normal	Kruskal-Wallis	7,366	0,392	-	-
12 min	Não-normal	Kruskal-Wallis	3,034	0,882	-	-

Fonte: Própria autora.

Da mesma forma que os resultados de turbidez em 100% de empacotamento do leito, os pontos P1 e P2 apresentaram concentrações mais elevadas se comparadas aos demais pontos. As medianas de P7 mostraram valores maiores em relação a P6, justificado por um acúmulo de partículas na calha e/ou carreamento das partículas mais finas pelo movimento ascendente do fluido que não conseguem decantar devido ao impedimento de passagem através do meio suporte.

5.4.2 Avaliação dos Sólidos Totais: Água sintética tipo II

5.4.2.1 Leito sem meio suporte

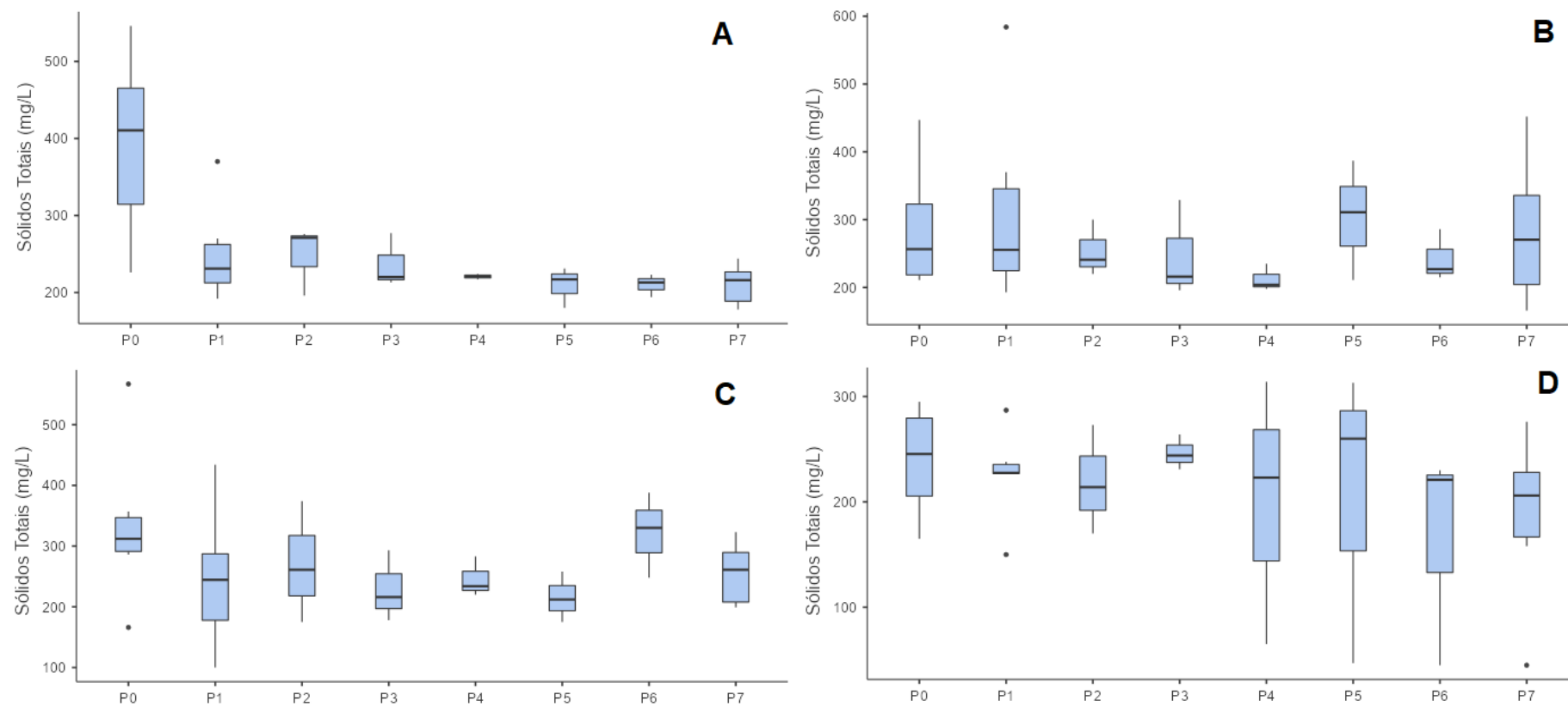
Para a análise dos sólidos totais presentes na água sintética tipo II ao longo do decantador os dados coletados durante a operação do ensaio foram submetidos a estatística descritiva e ao teste de normalidade Shapiro-Wilk conforme apresentado na Tabela 45 e expressos pelo gráfico *boxplot* (Figura 36).

Tabela 45- Estatística descritiva e teste de normalidade de sólidos totais das amostras de água sintética tipo II coletadas no aparato sem inserção de meio suporte

Tempo de ensaio	Ponto	N	Média	Mediana	Desvio-padrão	Mínimo	Máximo	Shapiro-Wilk	
								W	p
0 min	P0	6	393,00	411,00	118,77	226,00	546,00	0,971	0,902
	P1	6	250,00	231,00	64,33	192,00	370,00	0,855	0,171
	P2	3	248,00	271,00	44,81	196,00	276,00	0,797	0,107
	P3	3	237,00	220,00	35,10	213,00	277,00	0,831	0,191
	P4	3	221,00	221,00	3,51	217,00	224,00	0,993	0,843
	P5	3	209,00	217,00	26,35	180,00	231,00	0,937	0,514
	P6	3	210,00	213,00	14,73	194,00	223,00	0,969	0,661
	P7	6	211,00	216,00	26,39	178,00	244,00	0,92	0,507
4 min	P0	6	287,00	256,00	91,94	211,00	447,00	0,859	0,187
	P1	6	313,00	255,00	146,22	193,00	584,00	0,822	0,092
	P2	3	254,00	241,00	41,48	220,00	300,00	0,93	0,489
	P3	3	247,00	216,00	71,71	196,00	329,00	0,86	0,267
	P4	3	212,00	204,00	19,86	198,00	235,00	0,868	0,29
	P5	3	303,00	311,00	88,27	211,00	387,00	0,994	0,850
	P6	3	243,00	227,00	38,00	215,00	286,00	0,873	0,303
	P7	6	283,00	270,00	109,03	166,00	452,00	0,908	0,425
8 min	P0	6	333,00	312,00	131,42	166,00	567,00	0,899	0,368
	P1	6	247,00	245,00	115,65	100,00	434,00	0,976	0,932
	P2	3	270,00	261,00	99,80	175,00	374,00	0,994	0,851
	P3	3	229,00	216,00	58,59	178,00	293,00	0,963	0,631
	P4	3	246,00	234,00	33,08	220,00	283,00	0,907	0,407
	P5	3	215,00	212,00	41,58	175,00	258,00	0,996	0,881
	P6	3	322,00	330,00	70,34	248,00	388,00	0,99	0,812
	P7	6	256,00	261,00	52,25	199,00	323,00	0,887	0,303
12 min	P0	6	239,00	245,00	51,17	165,00	295,00	0,943	0,687
	P1	6	226,00	228,00	43,92	150,00	287,00	0,863	0,201
	P2	3	219,00	214,00	51,68	170,00	273,00	0,993	0,840
	P3	3	246,00	244,00	16,62	231,00	264,00	0,985	0,767
	P4	3	201,00	223,00	125,99	65,00	314,00	0,976	0,706
	P5	3	207,00	260,00	140,79	47,00	313,00	0,892	0,362
	P6	3	165,00	221,00	104,31	45,00	230,00	0,786	0,082
	P7	6	187,00	206,00	79,90	45,00	276,00	0,919	0,501

Fonte: Própria autora

Figura 36- Valores de sólidos totais em cada ponto do aparato sem meio suporte para as amostras de água sintética tipo II coletadas no tempo de ensaio de 0 minutos (A), 4 minutos (B), 8 minutos (C) e 12 minutos (D).



Fonte: Própria autora

A concentração de sólidos totais ao longo dos pontos do decantador apresentou uma dispersão menor na operação em 0, 4 e 8 minutos. Ao longo do leito, as maiores medianas de ST são encontradas em P0, P5, P6 e P7.

A análise de variância das amostras realizada pelo teste Kruskal-Wallis e ANOVA mostrou p-valor maior que 0,05 para os tempos de coletas de 0 e 4 minutos (Tabela 46). Dessa forma, não houve diferenças estatísticas entre os grupos.

Para a operação em 8 minutos e 12 minutos os resultados foram submetidos ao ANOVA, pois apresentaram distribuição normal. Entretanto, o p-valor apresentado para 8 e 12 minutos foi 0,524 e 0,851, respectivamente.

Em relação aos dados apresentados em 8 e 12 minutos, o teste de poder de performance com alpha mostrou que a potência desses testes está abaixo dos 0,800 recomendados, com apenas 0,05 para ambos tempos de operação. Isso mostra que os resultados dos testes podem indicar que não existem diferenças estatísticas quando realmente existe.

Tabela 46- Resultados dos testes estatísticos de análise de variância das amostras de ST da água sintética tipo II coletadas com leito sem enchimento em meio suporte

Tempo de operação	Distribuição das amostras	Análise de variância	H	p-valor	Teste de comparação múltipla	Diferenças entre pontos
0 min	Não-normal	Kruskal-Wallis	13,718	0,056	-	-
4 min	Não-normal	Kruskal-Wallis	3,675	0,816	-	-
8 min	Normal	ANOVA	-	0,524	-	-
12 min	Normal	ANOVA	-	0,851	-	-

Fonte: Própria autora

5.4.2.2 Leito com 25% de enchimento

Do mesmo modo que para turbidez, os dados coletados no leito com diferentes alturas de meio suporte foram submetidos a estatística descritiva, os resultados provenientes das amostras coletadas com o leito preenchido com 25% de meio suporte estão dispostos na Tabela 47.

O *boxplot* dos valores de sólidos totais encontrados ao longo do período de operação do ensaio é apresentado na Figura 37, no qual, os valores máximos e mínimos, mediana, percentis 25% e 75%, além de *outliers* dos grupos P0 a P7 nos tempos de operação 0 minutos (A), 4 minutos (B), 8 minutos (C) e 12 minutos (D) estão representados.

Tabela 47 - Estatística descritiva e teste de normalidade de sólidos totais das amostras de água sintética tipo II coletadas no aparato com enchimento de leito 25% de meio suporte

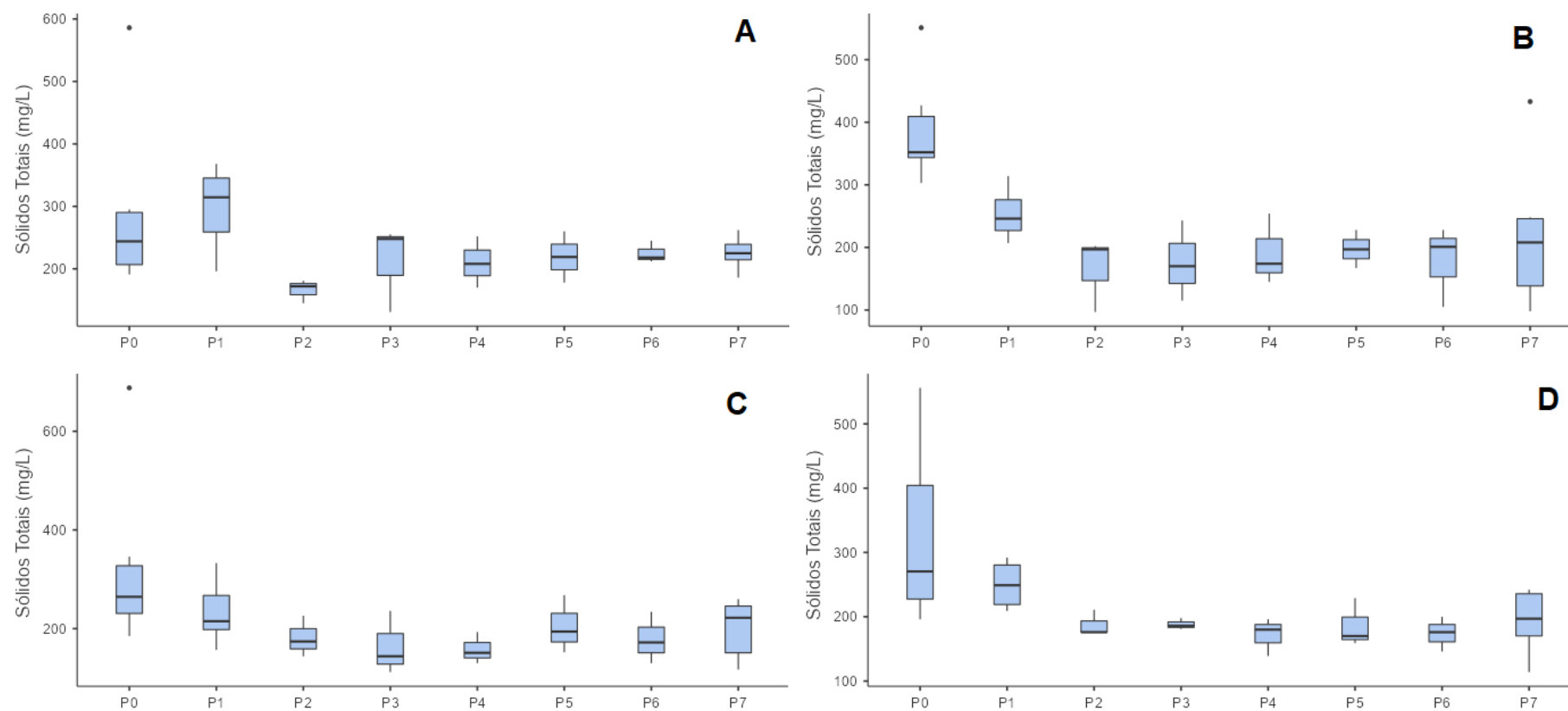
Tempo de ensaio	Ponto	N	Média	Mediana	Desvio-padrão	Mínimo	Máximo	Shapiro-Wilk	
								W	p
0 min	P0	6	294,00	244,00	148,89	191,00	586,00	0,732	0,013
	P1	6	298,00	314,00	66,57	196,00	368,00	0,92	0,509
	P2	3	166,00	172,00	18,73	145,00	181,00	0,923	0,463
	P3	3	211,00	248,00	69,66	131,00	255,00	0,792	0,096
	P4	3	210,00	208,00	41,04	170,00	252,00	0,998	0,919
	P5	3	219,00	219,00	41,00	178,00	260,00	1,000	1
	P6	3	225,00	218,00	17,58	212,00	245,00	0,881	0,328
	P7	6	226,00	225,00	26,18	186,00	262,00	0,983	0,964
4 min	P0	6	388,00	352,00	89,50	303,00	551,00	0,845	0,145
	P1	6	253,00	246,00	39,69	207,00	314,00	0,964	0,849
	P2	3	165,00	197,00	59,23	97,00	202,00	0,786	0,081
	P3	3	176,00	170,00	64,21	115,00	243,00	0,993	0,845
	P4	3	191,00	174,00	56,45	145,00	254,00	0,932	0,496
	P5	3	197,00	197,00	30,50	167,00	228,00	1,000	0,982
	P6	3	178,00	201,00	64,65	105,00	228,00	0,905	0,402
	P7	6	220,00	208,00	120,17	98,00	433,00	0,903	0,389
8 min	P0	6	328,00	265,00	184,27	185,00	688,00	0,761	0,026
	P1	6	233,00	215,00	64,02	157,00	333,00	0,943	0,684
	P2	3	181,00	174,00	41,49	144,00	226,00	0,977	0,706
	P3	3	164,00	144,00	64,37	112,00	236,00	0,928	0,48
	P4	3	158,00	151,00	32,08	130,00	193,00	0,964	0,637
	P5	3	205,00	194,00	58,73	152,00	268,00	0,975	0,698
	P6	3	179,00	172,00	52,32	130,00	234,00	0,988	0,789
	P7	6	200,00	222,00	61,41	117,00	260,00	0,858	0,181
12 min	P0	6	326,00	270,00	143,81	196,00	556,00	0,857	0,178
	P1	6	250,00	249,00	36,18	209,00	292,00	0,887	0,303
	P2	3	188,00	176,00	20,21	176,00	211,00	0,750	< ,001
	P3	3	188,00	186,00	8,74	181,00	198,00	0,947	0,554
	P4	3	172,00	180,00	29,40	139,00	196,00	0,940	0,526
	P5	3	186,00	170,00	37,64	159,00	229,00	0,865	0,280
	P6	3	174,00	176,00	27,06	146,00	200,00	0,996	0,878
	P7	6	193,00	197,00	50,22	114,00	242,00	0,901	0,377

Fonte: Própria autora

O teste de Shapiro-Wilk apresentou dados não paramétricos para a maioria dos grupos ao longo do ensaio. A Tabela 48 apresenta o resultado da análise de variância de 0 e 8 minutos que mostraram p-valor maior que 0,05. Em 4 e 12 minutos, o teste Dunn foi executado, porém não apresentou diferenças entre os grupos analisados.

Os valores máximo e mínimo encontrados ao longo do ensaio no ponto inicial (P0) foram 688 mg/L e 185 mg/L respectivamente. No ponto final (P7), os valores máximos e mínimos coletados foram de 433 mg/L e 98 mg/L.

Figura 37- Valores de sólidos totais em cada ponto do aparato com enchimento de leito 25% para as amostras de água sintética tipo II coletadas no tempo de ensaio de 0 minutos (A), 4 minutos (B), 8 minutos (C) e 12 minutos (D).



Fonte: Própria autora.

As concentrações de sólidos totais para as amostras coletadas nessa configuração apresentaram declínio da concentração ao longo dos pontos observados. Além disso, as amostras dessa composição de água sintética tipo II mostraram menor dispersão dos dados em relação as amostras de ST da água sintética tipo I e empacotamento 25%.

Tabela 48 - Resultados dos testes estatísticos de análise de variância das amostras de ST da água sintética tipo II com o aparato com 25% de enchimento de meio suporte

Tempo de operação	Distribuição das amostras	Análise de variância	H	p-valor	Teste de comparação múltipla	Diferenças entre pontos
0 min	Não-normal	Kruskal-Wallis	11,061	0,136	-	-
4 min	Não-normal	Kruskal-Wallis	17,031	0,017	Dunn	-
8 min	Não-normal	Kruskal-Wallis	10,544	0,160	-	-
12 min	Não-normal	Kruskal-Wallis	15,706	0,028	Dunn	-

Fonte: Própria autora

5.4.2.3 Leito com 50% de enchimento

A estatística descritiva dos dados coletados ao longo da operação do decantador com a altura de meio suporte no leito de 50 cm ou equivalente a 50% de empacotamento, está apresentada na Tabela 49 e expressos pelo gráfico *boxplot* (Figura 38).

Os valores máximo e mínimo encontrados para o grupo que representa o ponto inicial da operação (P0) foram 921 mg/L e 266 mg/L, respectivamente. Quando observados os valores máximo e mínimo ao longo da execução do ensaio, o menor valor de sólidos totais foi 107 mg/L para o ponto final (P7) e a concentração máxima encontrada no P7 com 265 mg/L.

Os *boxplots* (Figura 38) dos ensaios realizados no decantador com 75% de enchimento durante o tempo de ensaio de 0 minutos (A), 4 minutos (B), 8 minutos (C) e 12 minutos (D), apresentam os valores máximos e mínimos, mediana, percentis 25% e 75%, além de *outliers*

A maioria dos grupos apresentaram distribuição não paramétrica, devido a isso a análise de variância foi executada e é apresentada na Tabela 50. Os grupos presentes nas variáveis de 0 minuto, 4 minutos, 8 minutos e 12 minutos obtiveram p-valor inferior a 0,05.

Entretanto, o teste complementar Dunn ao realizar a comparação ponto a ponto, mostrou diferenças estatísticas na operação em 8 minutos, entre os pontos P0 e P4. Além disso, apresentou diferenças estatísticas entre P0 e P6 nos dados coletados em 12 minutos de ensaio.

Tabela 49 - Estatística descritiva e teste de normalidade de sólidos totais das amostras de água sintética tipo II coletadas no aparato com enchimento de leito 50% de meio suporte

Tempo de Ensaio	Ponto	N	Média	Mediana	Desvio-padrão	Mínimo	Máximo	Shapiro-Wilk	
								W	p
0 min	P0	6	415,00	354,00	181,60	288,00	756,00	0,774	0,034
	P1	6	390,00	392,00	110,02	269,00	566,00	0,939	0,654
	P2	3	268,00	256,00	71,30	204,00	345,00	0,978	0,713
	P3	2	221,00	221,00	113,10	141,00	301,00	-	-
	P4	3	201,00	207,00	45,30	153,00	243,00	0,987	0,78
	P5	3	211,00	222,00	22,61	185,00	226,00	0,822	0,169
	P6	3	156,00	143,00	35,34	129,00	196,00	0,899	0,381
	P7	6	175,00	175,00	49,89	119,00	236,00	0,905	0,407
4 min	P0	6	512,00	453,00	208,72	266,00	792,00	0,904	0,398
	P1	6	313,00	306,00	54,26	247,00	411,00	0,885	0,294
	P2	3	190,00	192,00	30,05	159,00	219,00	0,997	0,89
	P3	3	182,00	178,00	38,16	146,00	222,00	0,992	0,826
	P4	3	198,00	185,00	22,81	184,00	224,00	0,769	0,042
	P5	3	195,00	220,00	66,71	119,00	245,00	0,892	0,360
	P6	3	169,00	188,00	39,46	124,00	196,00	0,832	0,194
	P7	6	187,00	193,00	23,87	152,00	212,00	0,907	0,415
8 min	P0	6	545,00	460,00	193,20	423,00	921,00	0,715	0,009
	P1	6	248,00	248,00	20,36	222,00	278,00	0,986	0,977
	P2	3	213,00	222,00	21,57	188,00	228,00	0,86	0,266
	P3	3	186,00	201,00	28,94	153,00	205,00	0,807	0,132
	P4	3	177,00	183,00	33,41	141,00	207,00	0,976	0,702
	P5	3	185,00	184,00	14,05	172,00	200,00	0,993	0,843
	P6	3	203,00	195,00	62,92	145,00	270,00	0,987	0,78
	P7	6	181,00	169,00	71,74	107,00	265,00	0,849	0,153
12 min	P0	6	513,00	477,00	200,21	306,00	826,00	0,935	0,617
	P1	6	256,00	264,00	25,72	206,00	279,00	0,790	0,048
	P2	3	197,00	205,00	21,73	172,00	213,00	0,890	0,354
	P3	3	196,00	192,00	55,63	143,00	254,00	0,995	0,871
	P4	3	185,00	203,00	33,23	147,00	206,00	0,788	0,086
	P5	3	198,00	197,00	49,00	149,00	247,00	1,000	0,977
	P6	3	166,00	164,00	6,24	161,00	173,00	0,923	0,463
	P7	6	188,00	186,00	53,28	111,00	264,00	0,997	0,999

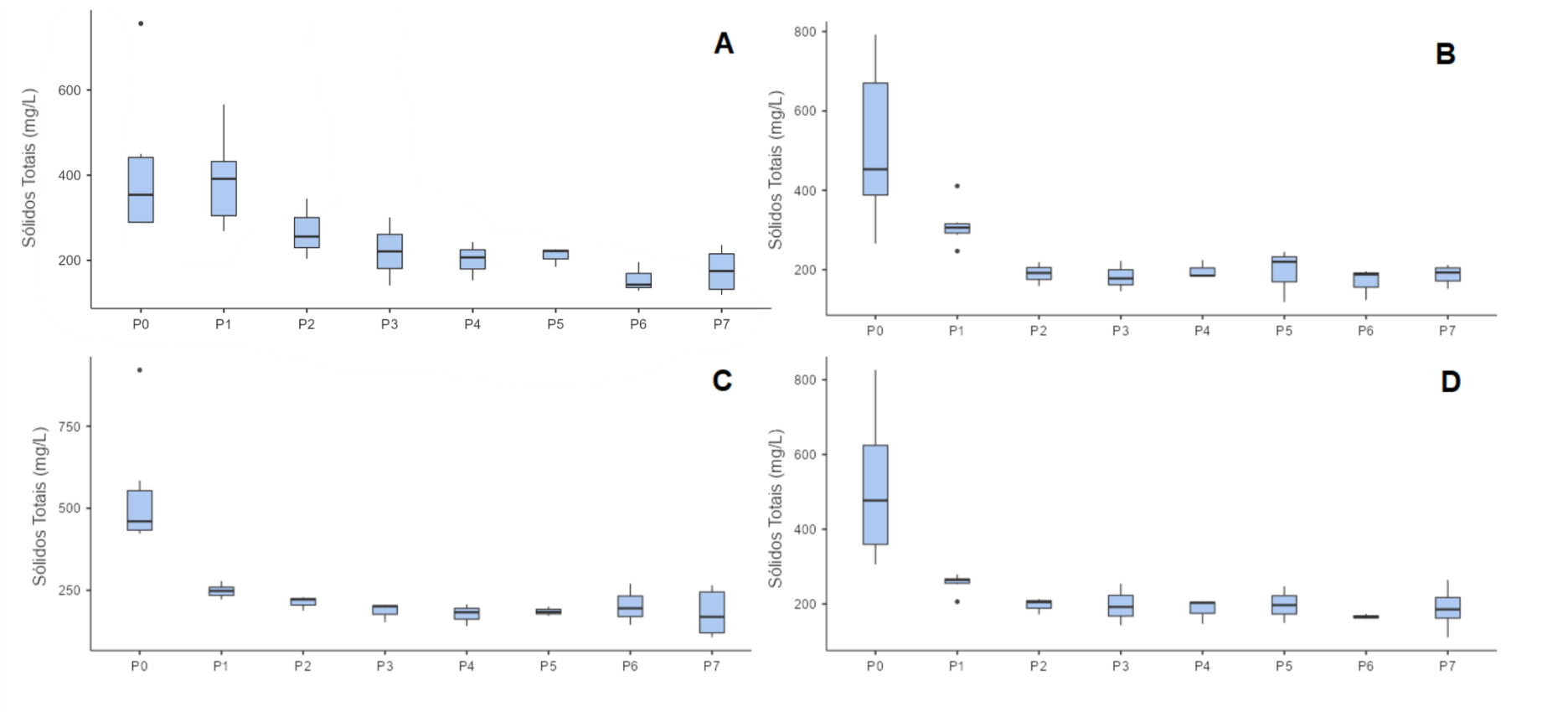
Fonte: Própria autora.

Tabela 50- Resultados do teste estatístico de análise de variância das amostras de água sintética tipo II de ST coletadas com o aparato com 50% de enchimento de meio suporte

Tempo de operação	Distribuição das amostras	Análise de variância	H	p-valor	Teste de comparação múltipla	Diferenças entre pontos
0 min	Não-normal	Kruskal-Wallis	21,750	0,003	Dunn	-
4 min	Não-normal	Kruskal-Wallis	23,217	0,002	Dunn	-
8 min	Não-normal	Kruskal-Wallis	20,531	0,005	Dunn	P0 e P4
12 min	Não-normal	Kruskal-Wallis	21,845	0,003	Dunn	P0 e P6

Fonte: Própria autora.

Figura 38 - Valores de sólidos totais em cada ponto do aparato com enchimento de leito 50% para as amostras de água sintética tipo II coletadas no tempo de ensaio de 0 minutos (A), 4 minutos (B), 8 minutos (C) e 12 minutos (D).



Fonte: Própria autora.

5.4.2.4 Leito com 75% de enchimento

De semelhante modo aos demais ensaios, foi executada a estatística descritiva dos resultados no dispositivo com enchimento de 75% do leito com meio suporte e é apresentada na Tabela 51.

Tabela 51 - Estatística descritiva e teste de normalidade de sólidos totais das amostras de água sintética tipo II coletadas no aparato com enchimento de leito 75% de meio suporte

Tempo de Ensaio	Ponto	N	Média	Mediana	Desvio-padrão	Mínimo	Máximo	Shapiro-Wilk	
								W	p
0 min	P0	6	406,00	446,00	108,44	267,00	502,00	0,807	0,069
	P1	6	464,00	513,00	168,14	238,00	666,00	0,919	0,501
	P2	3	399,00	393,00	55,24	347,00	457,00	0,991	0,82
	P3	3	353,00	369,00	39,88	308,00	383,00	0,884	0,337
	P4	3	334,00	317,00	40,29	305,00	380,00	0,866	0,286
	P5	3	300,00	331,00	67,68	222,00	346,00	0,839	0,212
	P6	3	313,00	331,00	83,91	222,00	387,00	0,967	0,65
	P7	6	264,00	241,00	52,76	220,00	332,00	0,777	0,036
4 min	P0	6	453,00	397,00	164,45	288,00	758,00	0,846	0,146
	P1	6	363,00	330,00	117,56	254,00	584,00	0,847	0,149
	P2	3	339,00	331,00	18,72	325,00	360,00	0,874	0,307
	P3	3	302,00	306,00	6,93	294,00	306,00	0,75	<0,001
	P4	3	253,00	259,00	24,13	226,00	273,00	0,948	0,562
	P5	3	285,00	287,00	37,53	247,00	322,00	0,999	0,927
	P6	3	260,00	256,00	22,27	240,00	284,00	0,976	0,702
	P7	6	248,00	253,00	24,97	212,00	276,00	0,927	0,554
8 min	P0	6	543,00	422,00	256,93	319,00	928,00	0,826	0,1
	P1	6	330,00	284,00	161,38	196,00	649,00	0,74	0,016
	P2	3	291,00	246,00	86,43	237,00	391,00	0,794	0,099
	P3	3	261,00	225,00	64,09	223,00	335,00	0,763	0,03
	P4	3	265,00	223,00	80,98	213,00	358,00	0,801	0,118
	P5	3	225,00	232,00	113,15	109,00	335,00	0,997	0,903
	P6	3	253,00	224,00	66,43	206,00	329,00	0,857	0,26
	P7	6	224,00	212,00	86,68	109,00	365,00	0,975	0,925
12 min	P0	6	430,00	424,00	92,72	333,00	576,00	0,936	0,630
	P1	6	331,00	312,00	108,81	218,00	529,00	0,893	0,334
	P2	3	312,00	278,00	104,24	229,00	429,00	0,920	0,453
	P3	3	257,00	215,00	103,60	181,00	375,00	0,877	0,315
	P4	3	247,00	214,00	92,44	175,00	351,00	0,906	0,406
	P5	3	252,00	213,00	68,42	212,00	331,00	0,756	0,014
	P6	3	244,00	212,00	70,32	196,00	325,00	0,841	0,218
	P7	6	220,00	199,00	67,46	166,00	354,00	0,725	0,011

Fonte: Própria autora.

Os dados coletados no início do ensaio apresentaram p-valor de 0,449 no teste de normalidade Shapiro-Wilk e foram submetidos ao ANOVA, entretanto, o p-valor obtido foi de 0,064. O teste alpha de poder de performance foi 0,421, abaixo do esperado.

Os valores máximos dos grupos P0 e P7 foram 928 mg/L e 365 mg/L, respectivamente, enquanto que os valores mínimos obtidos para os mesmos grupos foram 267 mg/L para P0 e 109 mg/L para P7.

A Figura 39 apresenta os *boxplots* dos ensaios realizados no decantador com 75% de enchimento durante o tempo de ensaio de 0 minutos (A), 4 minutos (B), 8 minutos (C) e 12 minutos (D). Os valores máximos e mínimos, mediana, percentis 25% e 75%, além de *outliers* estão representados na figura.

A concentração de ST apresentada pela Figura 39 ilustra os valores das medianas, as quais, mostram um declínio de concentração ao longo dos pontos. Como os dados de turbidez analisados para mesma composição de água sintética mostraram maiores medianas na saída do aparato se comparados aos pontos P2, P3, P4 e P5, se contrapõem aos resultados de saída de ST, é possível que haja uma retenção de partículas de maiores ao longo no leito com empacotamento de 75% em relação as partículas mais finas.

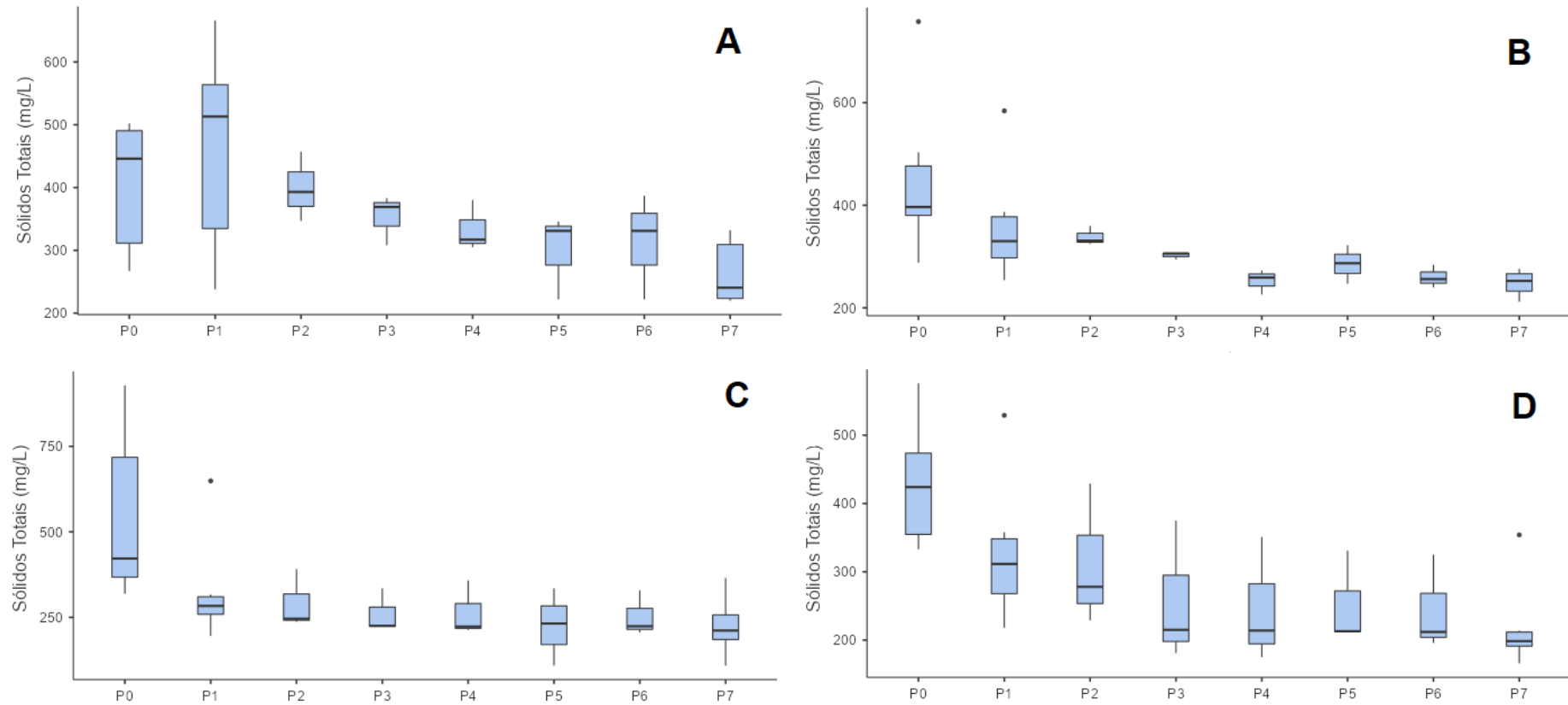
O resultado do teste de análise de variância é apresentado na Tabela 52, o p-valor na operação de 4 minutos e 12 minutos foram abaixo de 0,05. Além disso, o teste complementar de Dunn mostrou diferenças entre os grupos P0 e P7.

Tabela 52- Resultados do teste estatístico de análise de variância das amostras de água sintética tipo II de ST coletadas com o aparato com 75% de enchimento de meio suporte

Tempo de operação	Distribuição das amostras	Análise de variância	H	p-valor	Teste de comparação múltipla	Diferenças entre pontos
0 min	Normal	ANOVA	-	0,064	-	-
4 min	Não-normal	Kruskal-Wallis	22,009	0,003	Dunn	P0 e P7
8 min	Não-normal	Kruskal-Wallis	13,125	0,069	-	-
12 min	Não-normal	Kruskal-Wallis	9,027	0,032	-	P0 e P7

Fonte: Própria autora.

Figura 39 - Valores de sólidos totais em cada ponto do aparato com enchimento de leito 75% para as amostras de água sintética tipo II coletadas no tempo de ensaio de 0 minutos (A), 4 minutos (B), 8 minutos (C) e 12 minutos (D).



Fonte: Própria autora.

5.4.2.5 Leito com 100% de enchimento

Para analisar os dados de sólidos totais no leito com 100% de meio suporte foi realizada estatística descritiva e o teste de normalidade que estão apresentados na Tabela 53.

Tabela 53 - Estatística descritiva e teste de normalidade de sólidos totais das amostras de água sintética tipo II coletadas no aparato com enchimento de leito 100% de meio suporte

Tempo de Ensaio	Ponto	N	Média	Mediana	Desvio-padrão	Mínimo	Máximo	Shapiro-Wilk	
								W	p
0 min	P0	6	411,00	332,00	170,71	252,00	643,00	0,805	0,065
	P1	6	333,00	309,00	54,03	293,00	437,00	0,754	0,022
	P2	3	270,00	269,00	7,55	263,00	278,00	0,987	0,78
	P3	3	253,00	237,00	31,24	233,00	289,00	0,803	0,122
	P4	3	256,00	256,00	13,00	243,00	269,00	1,000	1,000
	P5	3	241,00	242,00	24,01	217,00	265,00	0,999	0,954
	P6	3	238,00	230,00	15,95	227,00	256,00	0,827	0,18
	P7	6	229,00	220,00	35,37	184,00	287,00	0,947	0,715
4 min	P0	6	353,00	327,00	119,79	240,00	583,00	0,812	0,075
	P1	6	320,00	283,00	115,04	221,00	530,00	0,849	0,154
	P2	3	262,00	213,00	88,36	209,00	364,00	0,769	0,043
	P3	3	233,00	232,00	39,51	194,00	273,00	1,000	0,958
	P4	3	237,00	236,00	46,51	191,00	284,00	1,000	0,964
	P5	3	223,00	195,00	73,14	168,00	306,00	0,890	0,355
	P6	3	253,00	233,00	38,48	228,00	297,00	0,804	0,124
	P7	6	209,00	204,00	14,47	199,00	237,00	0,762	0,026
8 min	P0	6	401,00	369,00	133,74	251,00	625,00	0,938	0,646
	P1	6	277,00	273,00	56,50	217,00	347,00	0,893	0,333
	P2	3	269,00	252,00	64,76	215,00	341,00	0,946	0,553
	P3	3	253,00	219,00	80,21	196,00	345,00	0,863	0,275
	P4	3	232,00	241,00	41,68	187,00	269,00	0,968	0,654
	P5	3	206,00	205,00	7,02	199,00	213,00	0,993	0,843
	P6	3	216,00	224,00	27,47	185,00	238,00	0,931	0,492
	P7	6	200,00	196,00	28,87	169,00	244,00	0,944	0,693
12 min	P0	6	302,00	290,00	63,53	241,00	413,00	0,898	0,361
	P1	6	245,00	236,00	31,79	212,00	305,00	0,841	0,134
	P2	3	273,00	267,00	73,70	203,00	350,00	0,994	0,858
	P3	3	247,00	224,00	64,65	197,00	320,00	0,905	0,402
	P4	3	239,00	236,00	13,32	228,00	254,00	0,953	0,583
	P5	3	237,00	245,00	45,08	188,00	277,00	0,974	0,693
	P6	3	232,00	222,00	28,92	210,00	265,00	0,904	0,399
	P7	6	225,00	212,00	40,85	193,00	305,00	0,755	0,022

Fonte: Própria autora.

A Figura 40 apresenta os *boxplots* dos ensaios realizados no decantador com 75% de enchimento durante o tempo de ensaio de 0 minutos (A), 4 minutos (B), 8 minutos (C) e 12 minutos (D). Os valores máximos e mínimos, mediana, percentis 25% e 75%, além de *outliers* estão representados na figura.

Em relação aos resultados apresentados pela Figura 40, o acúmulo de partículas nos pontos P1 e P2 corrobora a ideia que as partículas ficam em parte retidas pela falta de caminhos livres no leito. A maior concentração de sólidos na água apresentou uma resposta em que a concentração de saída foi menor em relação a P6, diferente do ocorrido com a água sintética tipo I.

A Tabela 53 mostra que os valores mínimos para o ponto inicial (P0) e ponto final (P7) foram 240 mg/L e 169 mg/L, enquanto que os valores máximos para os mesmos pontos foram 643 mg/L para P0 e 305 mg/L para P7.

A análise de variância apresentou diferenças estatísticas na operação de 0, 8 e 12 minutos (Tabela 54). Além disso, o teste complementar Dunn comparou os grupos isoladamente e apontou que houve diferenças estatísticas entre os pontos P1 e P7 na operação de 0 minutos, e também nos grupos P0 e P7 no tempo de ensaio de 8 minutos.

Tabela 54 - Resultados do teste estatístico Kruskal-Wallis das amostras de água sintética tipo II de sólidos totais coletadas com o aparato com 100% de enchimento de meio suporte

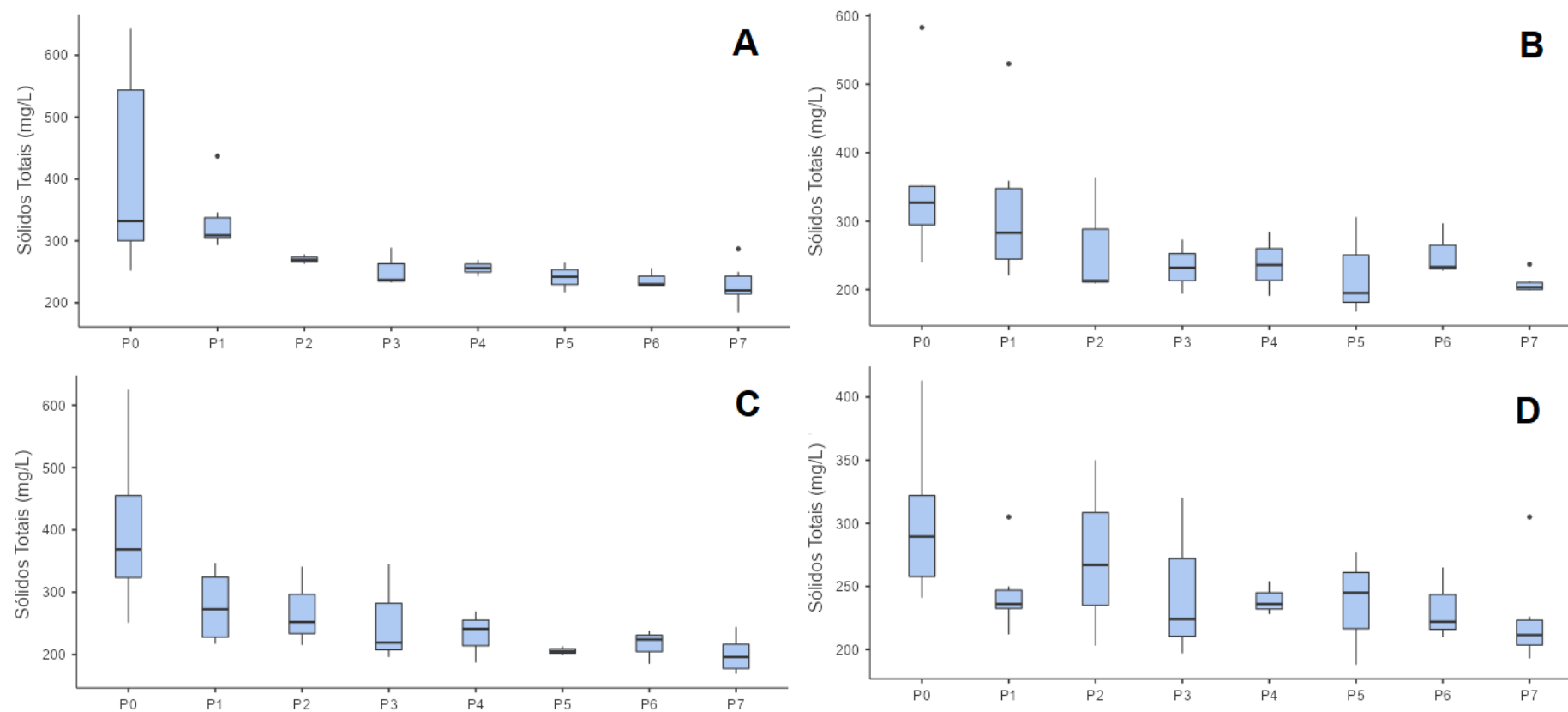
Tempo de operação	Distribuição das amostras	Análise de variância	H	p-valor	Teste de comparação múltipla	Diferenças entre pontos
0 min	Não-normal	Kruskal-Wallis	22,294	0,002	Dunn	P1 e P7
4 min	Não-normal	Kruskal-Wallis	14,515	0,043	Dunn	-
8 min	Não-normal	Kruskal-Wallis	18,136	0,011	Dunn	P0 e P7
12 min	Não-normal	Kruskal-Wallis	9,027	0,251	-	-

Fonte: Própria autora.

Arabgol, Vanrolleghem e Delatolla (2022) analisaram os impactos das propriedades geométricas de três tipos de carreadores e diferentes espessuras de biofilme na velocidade de sedimentação das partículas. Em seu estudo foi constatado que, no efluente dos carreadores com o biofilme mais espesso e menos denso, houve sedimentação mais rápida das partículas maiores em relação aos outros dois tipos de carreadores. Os reatores operaram com TDH 1,1 h e vazão hidráulica de $3,7 \pm 0,1$ L/h (ARABGOL; VANROLLEGHEM; DELATOLLA, 2022).

Os resultados encontrados nas diferentes porcentagens de empacotamento do leito e pesquisas de outras configurações como apresentado por Arabgol, Vanrolleghem e Delatolla (2022) mostram que características como formato e porcentagem de empacotamento são fatores importantes para redução da concentração de sólidos do efluente.

Figura 40 - Valores de sólidos totais em cada ponto do aparato com enchimento de leito 100% para as amostras de água sintética tipo II coletadas no tempo de ensaio de 0 minutos (A), 4 minutos (B), 8 minutos (C) e 12 minutos (D).



Fonte: Própria autora.

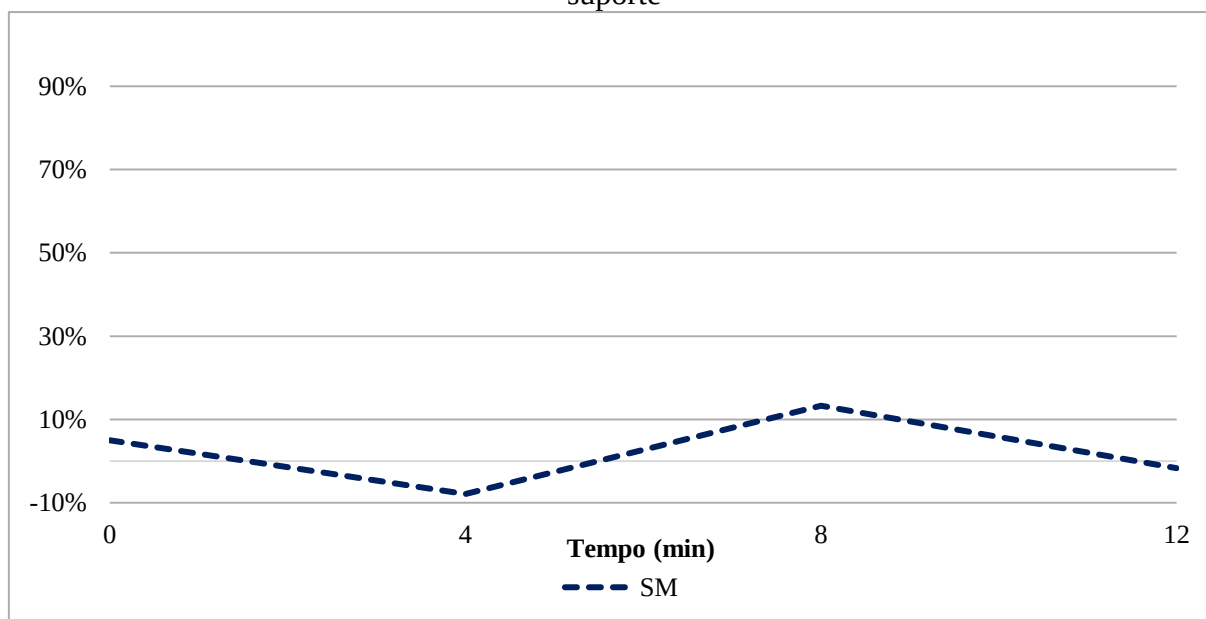
5.5 Eficiência de remoção de turbidez

A eficiência de remoção a turbidez foi calculada para a análise do desempenho do decantador de leito móvel. Os resultados apresentados foram classificados pela composição do líquido ensaiado e pelo empacotamento do leito móvel (i.e.: 0%, 25%, 50%, 75% e 100%). A água sintética tipo I era composta de 1.500 L de água e 1,9 kg do solo selecionado e a água sintética tipo II por 1.500 L de água e 10 kg do solo selecionado.

5.5.1 Água sintética tipo I

Os resultados de eficiência de remoção de turbidez nas amostras coletadas no ensaio com o aparato sem a inserção de meio suporte no leito estão apresentados no Figura 41. O gráfico apresenta a remoção média obtida ao longo dos 12 minutos de ensaio.

Figura 41 - Eficiência de remoção de turbidez da água sintética tipo I no leito sem meio suporte



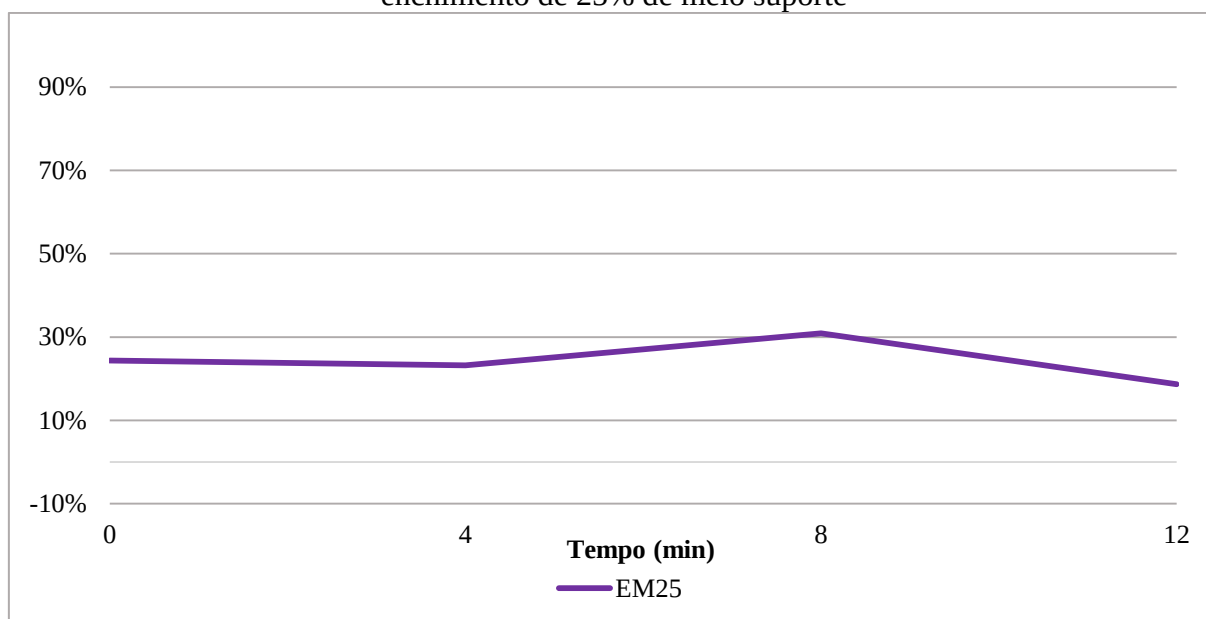
Fonte: Própria autora.

Para as amostras coletadas no tempo 0 minutos, o desempenho médio do aparato sem meio suporte foi de 5,00%. Entretanto, a eficiência de remoção média obtida nas amostras coletadas em 4 minutos foi de -7,88%, decorrente de um possível carreamento das partículas decantadas ao longo dos minutos iniciais de ensaio. Em sistemas de filtros é recomendada a utilização de técnicas de lavagem do leito quando ocorre deterioração da qualidade da água filtrada (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2017). De maneira similar, a prevenção da saída de sólidos no leito pode ser realizada pela saída de água no sistema de descarte do aparato.

O melhor resultado nessa configuração foi constatado nas amostras de 8 minutos de execução, com 13,31% de eficiência de remoção de turbidez, contudo, um declínio foi apresentado nos resultados de remoção de turbidez nas amostras de 12 minutos, sendo seu resultado médio de -1,66%.

Os resultados de eficiência média a remoção de turbidez atingidos pela configuração do leito com 25% de enchimento de meio suporte é apresentado na Figura 42. Conforme apresentado, a eficiência média de remoção no tempo 0 minutos foi de 24,39% e o de 4 minutos 23,22%. Semelhante ao gráfico apresentado no leito sem enchimento, o melhor desempenho foi apresentado nas amostras de 8 minutos de ensaio (30,92%) e um declínio aparente nas amostras em 12 minutos de ensaio com eficiência média de 18,68%, redução de 39,58% de eficiência de remoção.

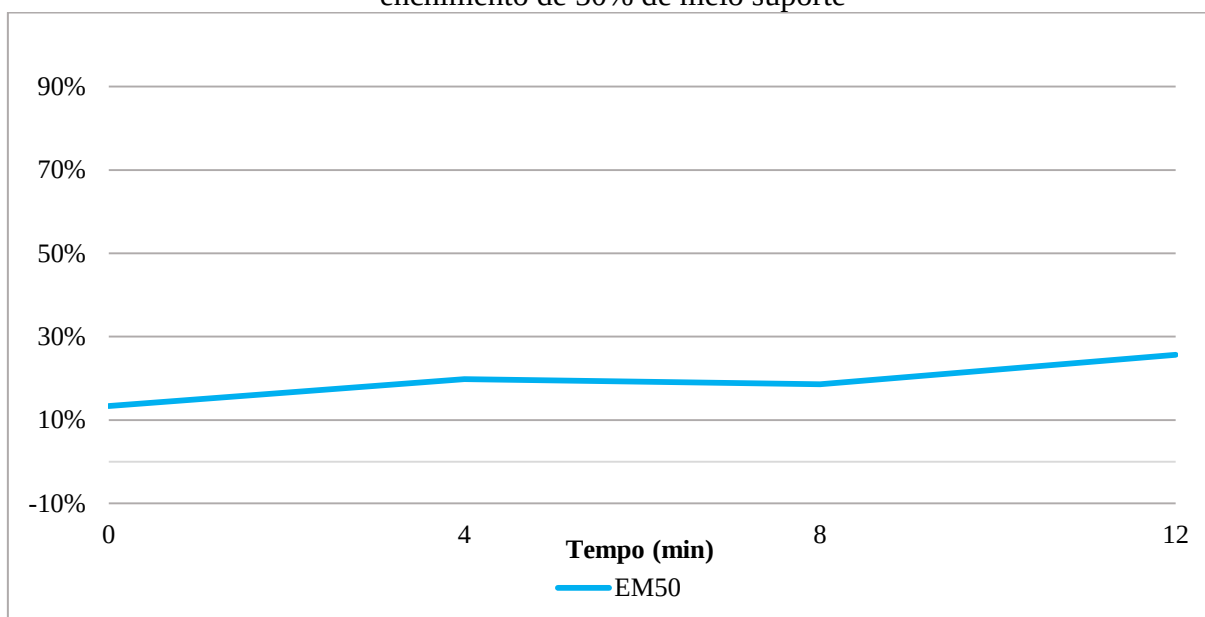
Figura 42 - Eficiência de remoção de turbidez da água sintética tipo I no leito com enchimento de 25% de meio suporte



Fonte: Própria autora.

Os resultados obtidos com a configuração do leito em 50% de enchimento de meio suporte estão apresentados na Figura 43. As amostras coletadas ao longo do ensaio apresentaram 13,38% de eficiência média de remoção à turbidez em 0 minutos, em sequência 19,77% e 18,57% de eficiência de remoção foram observadas nas amostras de 4 minutos e 8 minutos, respectivamente. Diferente dos resultados apresentados nas configurações sem meio suporte e com 25% de enchimento do leito, a maior eficiência média de remoção da turbidez foi 25,60% em 12 minutos de ensaio.

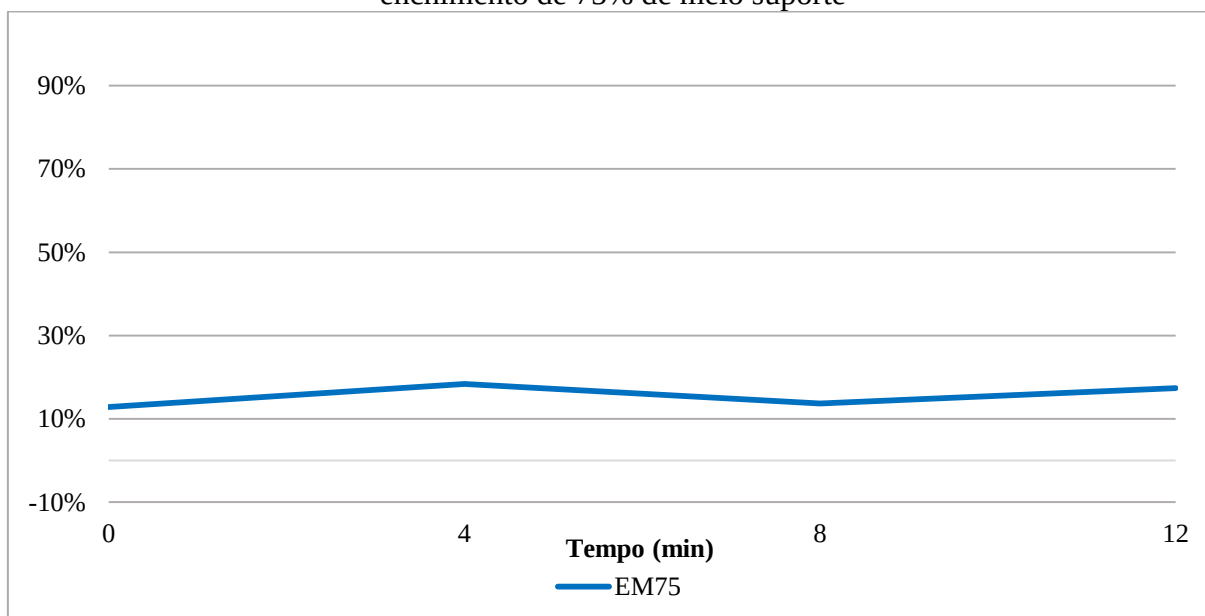
Figura 43 - Eficiência de remoção de turbidez da água sintética tipo I no leito com enchimento de 50% de meio suporte



Fonte: Própria autora.

O gráfico apresentado pelos resultados de eficiência média de remoção a turbidez no leito com configuração de 75% de meio suporte (Figura 44), comportou-se semelhante ao do leito com 50% de enchimento.

Figura 44 - Eficiência de remoção de turbidez da água sintética tipo I no leito com enchimento de 75% de meio suporte

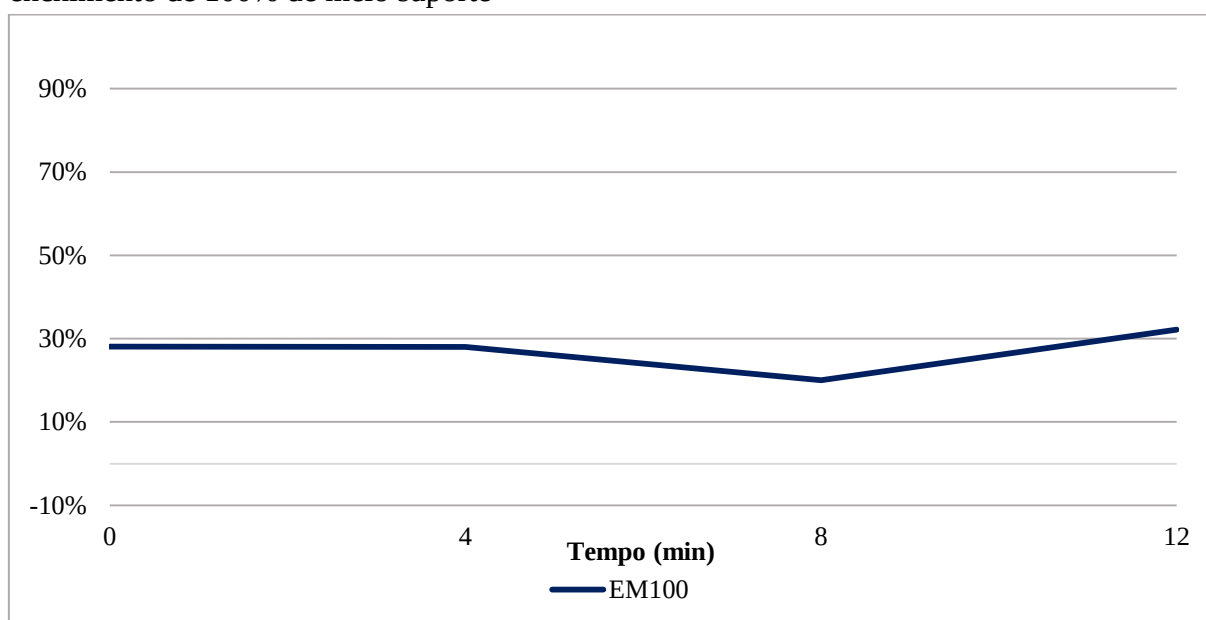


Fonte: Própria autora.

Entretanto, o tempo de ensaio que apresentou maior eficiência de remoção média das partículas foi no instante de 4 minutos de ensaio, com 18,36%. Os resultados apresentados para as amostras coletadas em 0, 8 e 12 minutos foram de 12,88% 13,73% e 17,41%, respectivamente, para a eficiência de remoção média de turbidez.

Os resultados de eficiência média de remoção de turbidez das amostras com enchimento de 100% de meio suporte, é ilustrado na Figura 45. Para as amostras coletadas em 0 minutos, o desempenho do aparato mostrou 28,07% de eficiência de remoção média a turbidez. Em 4 minutos, as amostras apresentaram 28,04% de eficiência de remoção, seguidos de 20,03% e 32,18% de eficiência média de remoção para 8 e 12 minutos, respectivamente.

Figura 45 - Eficiência de remoção de turbidez da água sintética tipo I no leito com enchimento de 100% de meio suporte



Fonte: Própria autora.

A Figura 46 e a Tabela 55 indicam os diferentes resultados obtidos na avaliação do desempenho do aparato na remoção das partículas responsáveis pela turbidez. De maneira geral, o pior desempenho foi observado nos ensaios cujo leito não havia inserção de meio suporte. O melhor desempenho nas coletas realizadas em 0, 4 e 12 minutos foram apresentados no leito totalmente preenchido de meio suporte e na coleta em 8 minutos, no leito de 25% de enchimento com remoção de 30,92%.

A maior taxa de eficiência de remoção foi constatada em 12 minutos de ensaio do leito com 100% de enchimento, sendo 32,18%. O menor desempenho foi obtido nas amostras coletadas em 4 minutos do leito sem meio suporte que apresentaram -7,88% de eficiência de

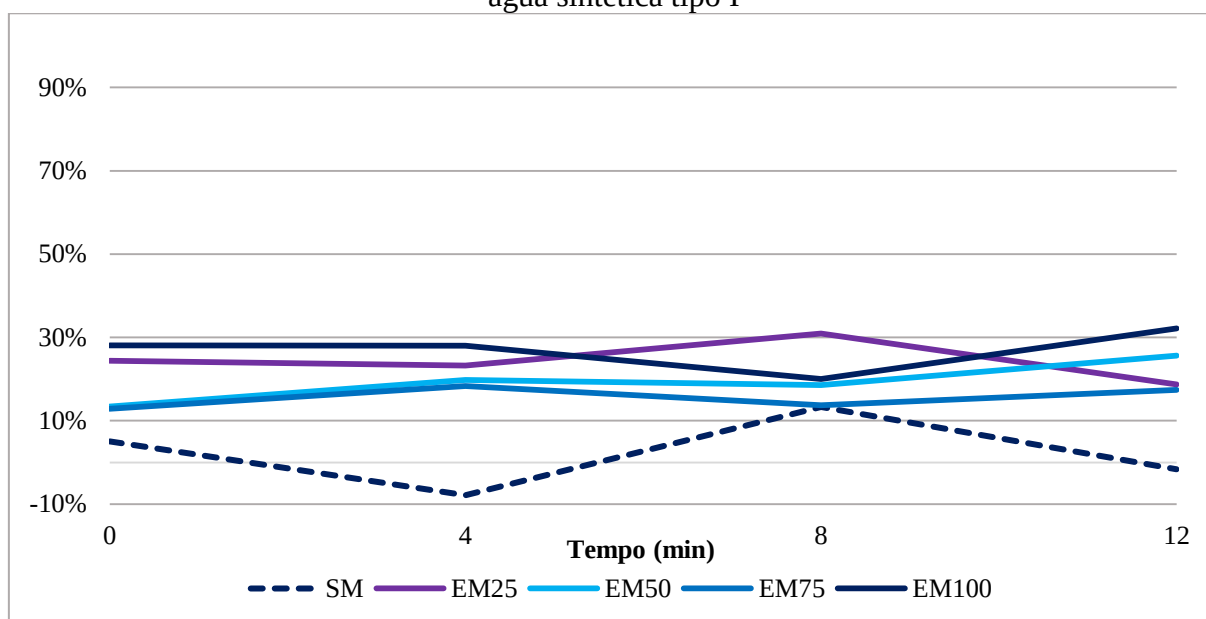
remoção a turbidez, seguidos do desempenho de -1,66% de eficiência que foram constatados em 12 minutos do leito sem meio suporte.

Tabela 55 - Eficiência de remoção de turbidez com diferentes alturas de enchimento do leito da água sintética tipo I

Enchimento do leito	Eficiência (%)			
	0 min	4 min	8 min	12 min
SM	5,00 ± 93,7	-7,88 ± 39,5	13,31 ± 18,6	-1,66 ± 23,1
EM25	24,39 ± 27,5	23,22 ± 71,5	30,92 ± 23,3	18,68 ± 10,1
EM50	13,38 ± 118,9	19,77 ± 28,7	18,57 ± 15,7	25,60 ± 9,8
EM75	12,88 ± 19,9	18,36 ± 16,5	13,73 ± 11,1	17,41 ± 9,9
EM100	28,07 ± 26,0	28,04 ± 16,8	20,03 ± 13,3	32,18 ± 15,5

Fonte: Própria autora.

Figura 46 - Eficiência de remoção de turbidez entre diferentes enchimentos de leito da água sintética tipo I



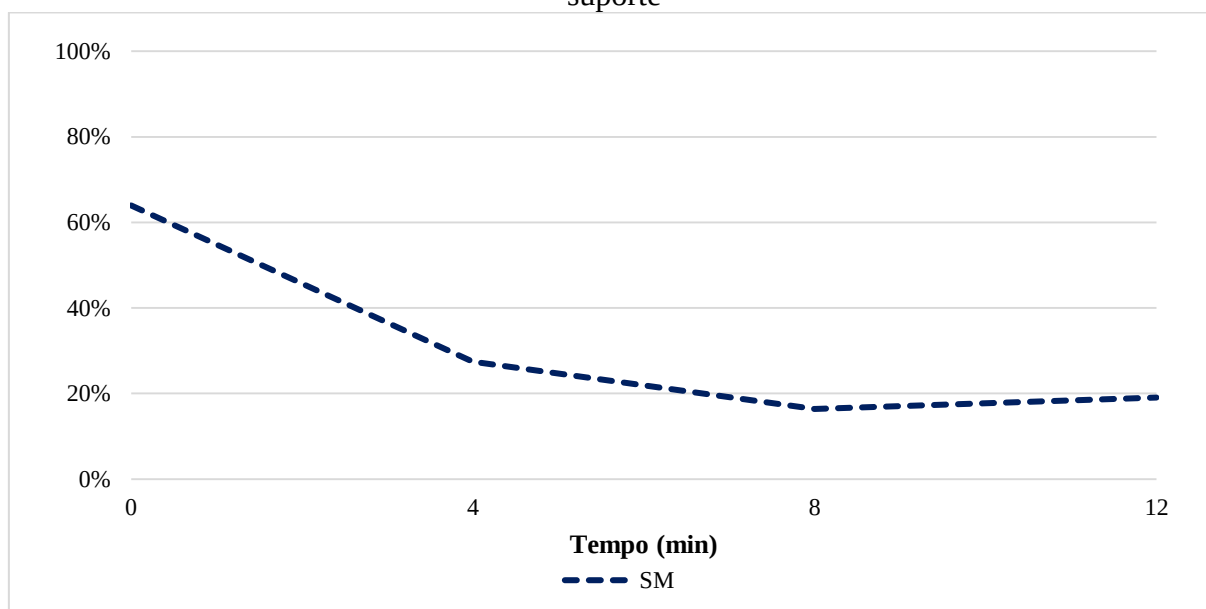
Fonte: Própria autora.

5.5.2 Água sintética tipo II

A eficiência de remoção das partículas responsáveis pela turbidez foi analisada para avaliação do desempenho do aparato. A Figura 47 apresenta a eficiência de remoção de turbidez ao longo do tempo de ensaio do aparato sem enchimento com meio suporte.

Foi observado que de semelhante modo ao desempenho de remoção de sólidos totais, o aparato operado sem a interferência do meio suporte, apresentou uma remoção no tempo inicial de ensaio de 63,97%. Ao longo do período analisado, o desempenho decaiu significativamente nos instantes 4, 8 e 12 minutos apresentando eficiência de 27,42%, 16,38% e 19,03% respectivamente.

Figura 47 - Eficiência de remoção de turbidez da água sintética tipo II no leito sem meio suporte

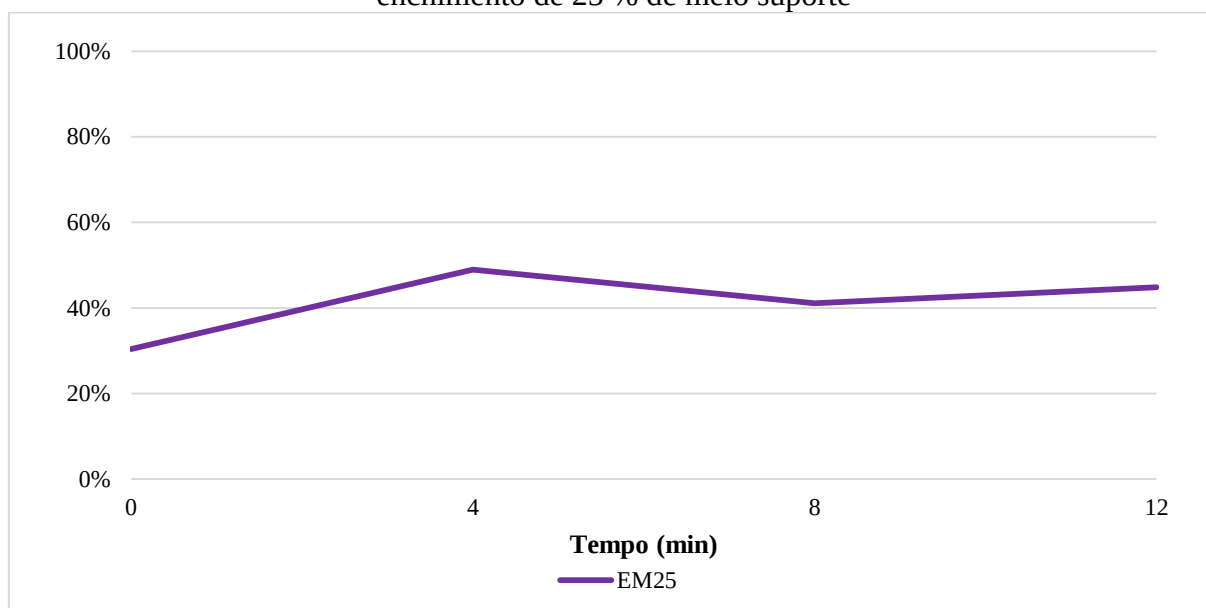


Fonte: Própria autora.

A curva apresentada na Figura 48 mostra uma similaridade na curva desempenhada na eficiência de remoção de sólidos totais para a mesma altura de enchimento do leito, 25%, entretanto os resultados apresentados foram superiores aos obtidos no outro ensaio.

No instante inicial, o aparato apresentou remoção de 30,38% das partículas responsáveis pela turbidez. Ao contrário do desempenho do leito sem meio suporte, os tempos posteriores apresentaram desempenho de 48,96%, 41,10% e 44,87 % para 4, 8 e 12 minutos respectivamente.

Figura 48 - Eficiência de remoção de turbidez da água sintética tipo II no leito com enchimento de 25 % de meio suporte

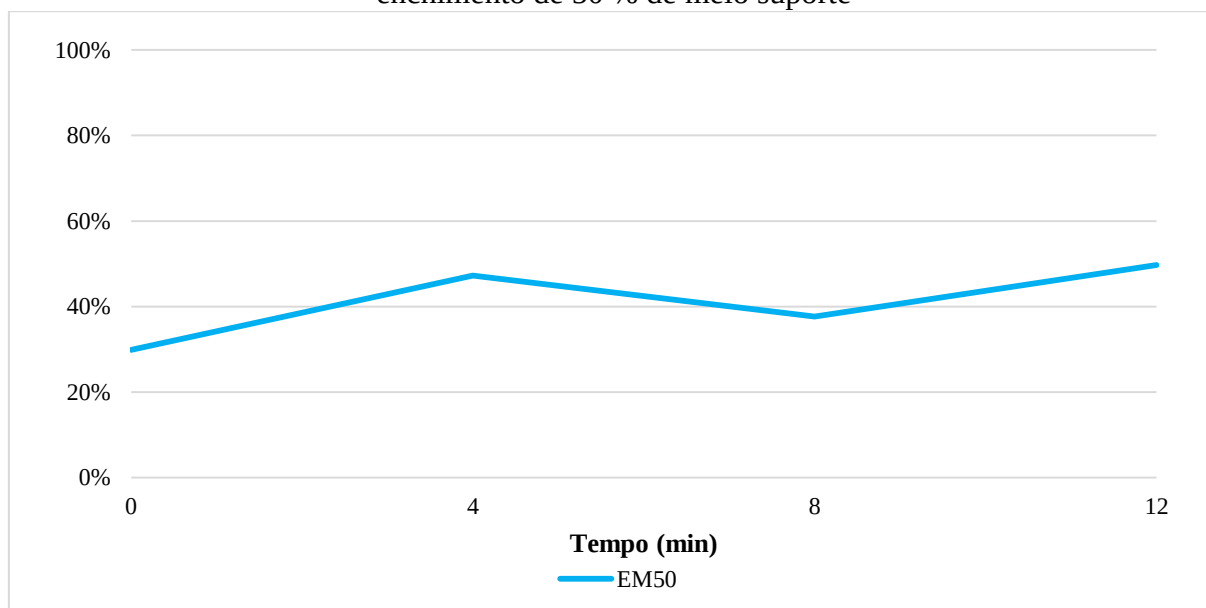


Fonte: Própria autora.

A curva de remoção de turbidez quando o aparato teve seu leito com 50% de enchimento, apresentou eficiência de remoção conforme apresenta a Figura 49.

Os resultados obtidos no leito com 50% de empacotamento de meio suporte, apresentaram uma trajetória semelhante ao apresentado pelo leito com 25% de empacotamento do leito.

Figura 49 - Eficiência de remoção de turbidez da água sintética tipo II no leito com enchimento de 50 % de meio suporte

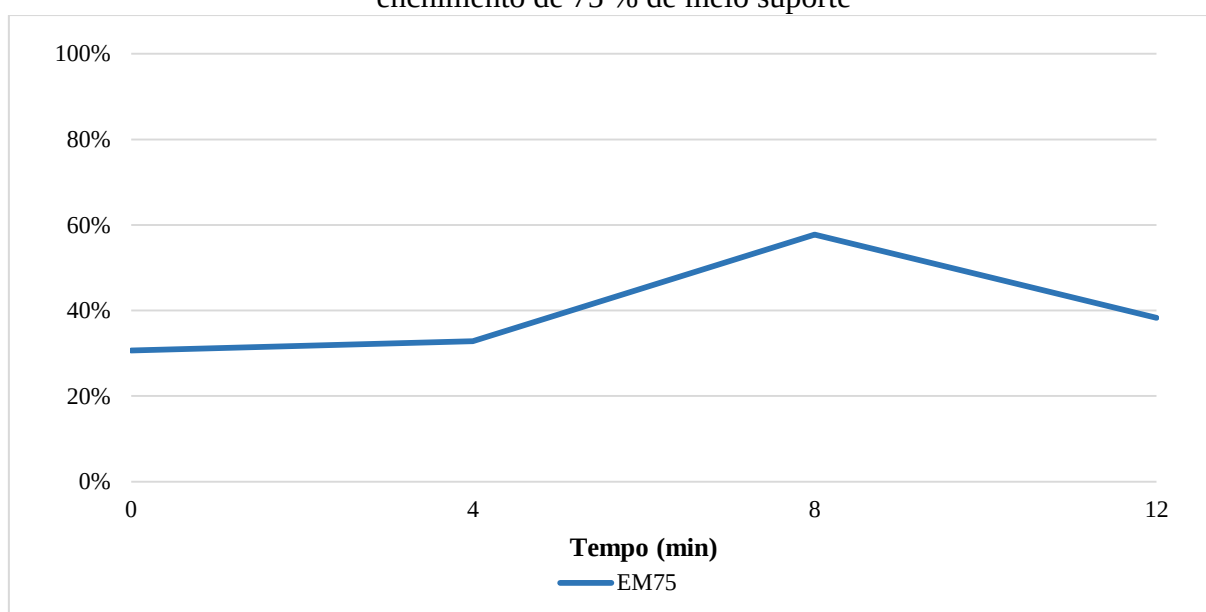


Fonte: Própria autora.

A média de eficiência de remoção de turbidez obtida nas coletas no início do ensaio foi de 29,90%, por outro lado, a média de remoção das coletas realizadas no tempo 4 minutos apresentaram 47,25% de eficiência. Quando o tempo de ensaio atingiu a marca de 8 minutos, a eficiência de remoção média obtida foi de 37,66% seguidos de 49,74% de eficiência média de remoção de turbidez no tempo de 12 minutos.

Em relação ao ensaio realizado com o aparato provido de 75% de enchimento, a remoção média adquirida no decorrer do ensaio é apresentada na Figura 50.

Figura 50 - Eficiência de remoção de turbidez da água sintética tipo II no leito com enchimento de 75 % de meio suporte



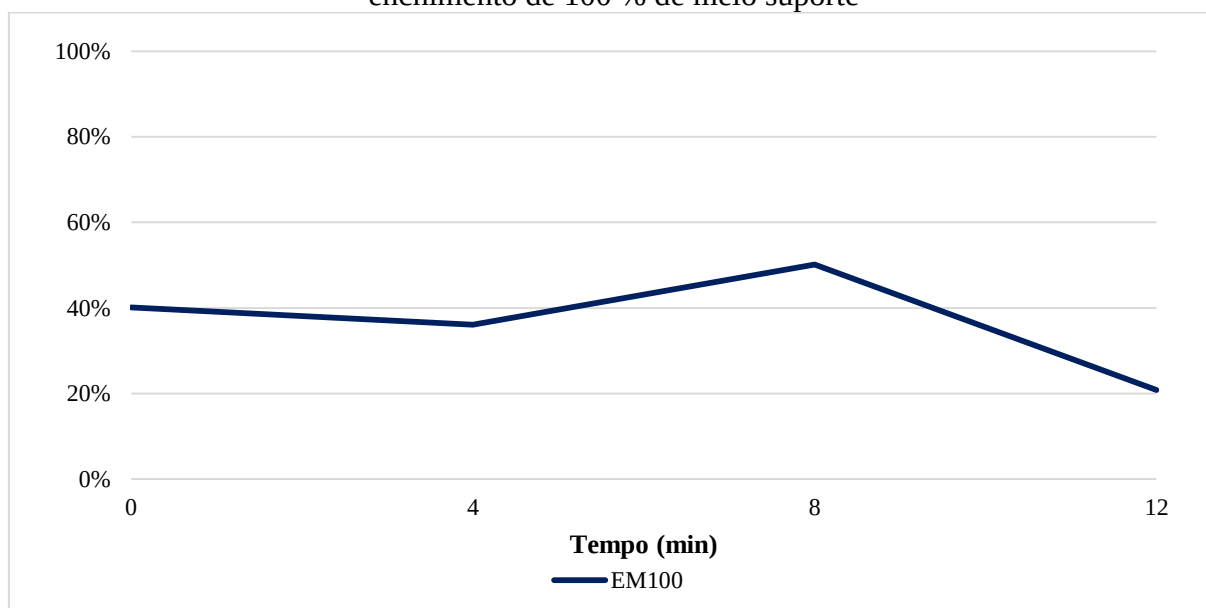
Fonte: Própria autora.

A análise dos resultados mostrou que houve um acréscimo de eficiência de remoção da turbidez até o período de 8 minutos da execução dos ensaios, seguidos de um significativo declínio de eficiência de remoção das amostras do tempo de 12 minutos.

Inicialmente, o aparato apresentou uma remoção média de 30,63% para as amostras coletadas em 0 minutos, em sequência, 32,82% e 57,78% de eficiência de remoção de turbidez para as coletas realizadas em 4 e 8 minutos, respectivamente. A eficiência média de remoção obtida nas amostras recolhidas no tempo de 12 minutos de ensaio foram de 38,26%, uma redução de 33,78% em relação à média de eficiência no tempo de 8 minutos.

Os dados coletados do ensaio de turbidez quando o leito se encontrava com 100% de enchimento, estão apresentados na Figura 51. É possível observar que o melhor desempenho foi obtido no tempo de operação de 8 minutos com 50,15 % de eficiência de remoção.

Figura 51- Eficiência de remoção de turbidez da água sintética tipo II no leito com enchimento de 100 % de meio suporte



Fonte: Própria autora.

O pior desempenho foi apresentado quando o ensaio estava em 12 minutos de operação, apresentando o declínio de remoção semelhante ao apresentado no ensaio de 75% de enchimento do leito. A eficiência de remoção quando o ensaio foi iniciado, atingiu 40,13%, seguido de 36,07% de remoção obtida no tempo de operação de 4 minutos.

É possível observar na Figura 52 e na Tabela 56 a comparação da eficiência de remoção de turbidez para as diferentes configurações do dispositivo. No instante que o começou o ensaio, o melhor desempenho apresentado foi o do leito sem meio suporte com 63,97%, em sequência o leito com enchimento de 100% de empacotamento com 40,13%. A remoção inicial do aparato com o enchimento de 75% foi de 30,63% e os piores desempenhos iniciais foram de 25% e 50%, sendo 30,38% e 29,90%, respectivamente.

Os dados apresentados quando o leito atingiu 4 minutos de operação, mostram que o melhor desempenho foi de 48,96 % obtido no leito com 25 % de empacotamento do leito, em sequência, 47,25 % obtido no leito com 50 % de enchimento. Além disso, o desempenho obtido para o leito com 100% foi de 36,07 % enquanto as configurações com menor desempenho foram de 75 % de meio suporte no leito e do leito vazio, os quais apresentaram 32,82 % e 27,42 %, respectivamente.

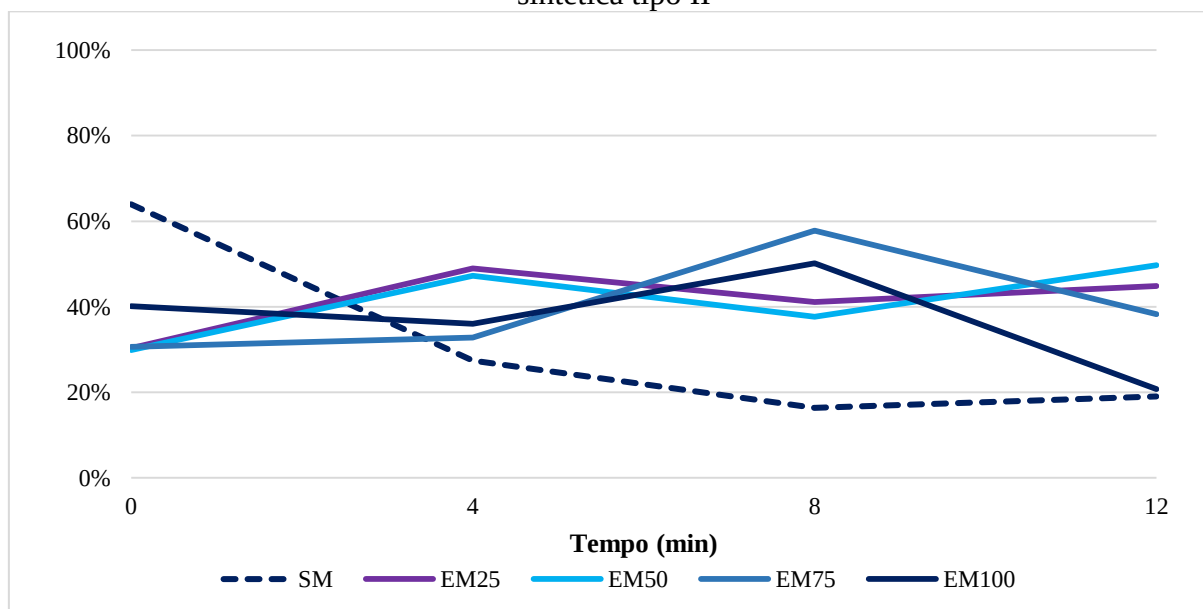
Tabela 56- Eficiência de remoção de turbidez com diferentes alturas de enchimento do leito da água sintética tipo II

Enchimento do leito	Eficiência (%)			
	0 min	4 min	8 min	12 min
SM	63,97 ± 36,6	27,42 ± 24,2	16,38 ± 15,1	19,03 ± 18,7
EM25	30,38 ± 41,0	48,96 ± 59,3	41,10 ± 26,1	44,87 ± 17,2
EM50	29,90 ± 39,9	47,25 ± 13,58	37,66 ± 5,84	49,74 ± 10,32
EM75	30,63 ± 18,87	32,82 ± 11,83	57,78 ± 28,10	38,26 ± 13,9
EM100	40,13 ± 24,3	36,07 ± 20,0	50,15 ± 11,0	20,78 ± 9,3

Fonte: Própria autora.

De maneira geral, quando o tempo de operação atingiu 8 minutos, houve declínio na eficiência de remoção para as configurações de leito com 25% e 50% de enchimento e no leito sem meio suporte. Em contrapartida, os ensaios com o enchimento em 75% e 100% apresentaram melhoria no desempenho. O melhor desempenho de remoção nessa fase foi de 57,78% no leito com 75% de enchimento, enquanto que o pior desempenho é mostrado no aparato sem meio suporte, conforme o esperado.

Figura 52- Eficiência de remoção de turbidez entre diferentes enchimentos de leito da água sintética tipo II



Fonte: Própria autora.

A operação do ensaio de 12 minutos exibiu melhorias de desempenhos de remoção, nas quais o decantador com 50% de enchimento no leito obteve 49,74% de remoção de turbidez. O leito com 25% de empacotamento também mostrou acréscimo na remoção, atingindo 44,87%.

Entretanto, os resultados de remoção dos leitos com 75% e 100% de enchimento mostraram declínios significativos apresentando 38,26% e 20,78%, respectivamente.

Fleite *et al.* (2020) em seu estudo, operou um decantador tubular com vazão de 2 L/min e TDH de 2.448 s, que foi construído a partir de uma simulação, para tratamento de efluentes de confinamento de bovinos e obteve no sistema coagulação-floculação-decantação desempenho de 99,7% de remoção de turbidez.

Lopes (2020) avaliou o desempenho de um decantador tubular horizontal com uma nova concepção de limpeza de TDH médio 227s e obteve 98,9% de remoção a turbidez da água, entretanto a pesquisadora utilizou o coagulante hidróxicloreto de alumínio ou Policloreto de Alumínio (PAC) e o alcalinizante hidróxido de cálcio, que melhora o rendimento da decantação.

Tarpagkou e Pantokratoras (2014) em seu estudo analisaram a interferência das lamelas nos decantadores e concluíram que as lamelas aumentam 20% da eficiência da decantação. Os autores ainda obtiveram uma remoção de turbidez em 75% em um sistema convencional, enquanto o decantador de alta taxa apresentou 93% de eficiência.

Os resultados apresentados na literatura mostram a influência da utilização de dispositivos na remoção da turbidez, entretanto, os ensaios compõem-se com a utilização de coagulantes para a análise dos resultados de remoção. Como o intuito inicial era verificar a interferência apenas do meio suporte, os resultados obtidos apresentaram-se inferiores aos obtidos na literatura, mas ainda assim, satisfatórios.

De maneira geral, a eficiência média de remoção de turbidez constatada foi de 31,7% no decantador quando não havia meio suporte no leito. A inserção dos dispositivos apresentou eficiência de remoção de turbidez de 41,3% para altura de 0,25 m de camada, 41,1% para 0,50 m, 39,9 % para 0,75 m, e por fim, 36,8% para o leito totalmente preenchido.

5.6 Eficiência de remoção de sólidos totais

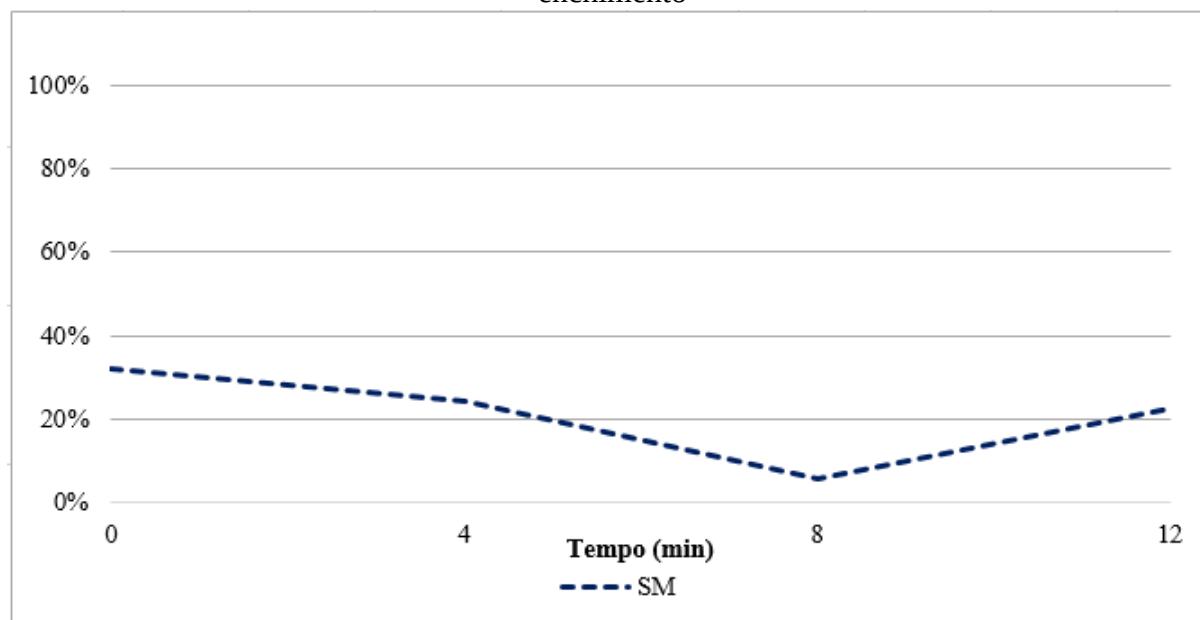
A eficiência de remoção de sólidos totais foi calculada para a análise do desempenho do decantador de leito móvel. Os resultados apresentados foram classificados pela composição do líquido ensaiado e pelo empacotamento do leito móvel (i.e.: 0%, 25%, 50%, 75% e 100%). A água sintética tipo I era composta de 1.500 L de água e 1,9 kg do solo selecionado e a água sintética tipo II por 1.500 L de água e 10 kg do solo selecionado.

5.6.1 Água sintética tipo I

A eficiência de remoção de sólidos totais da água sintética tipo I no leito sem a inserção de meio suporte é mostrada na Figura 53. As amostras coletadas no início do ensaio (0 minutos)

apresentam 31,98% de eficiência de remoção de sólidos totais, desempenho muito superior ao constatado para a mesma configuração em relação a eficiência de remoção a turbidez (5,00%).

Figura 53 - Eficiência de remoção de sólidos totais da água sintética tipo I no leito sem enchimento

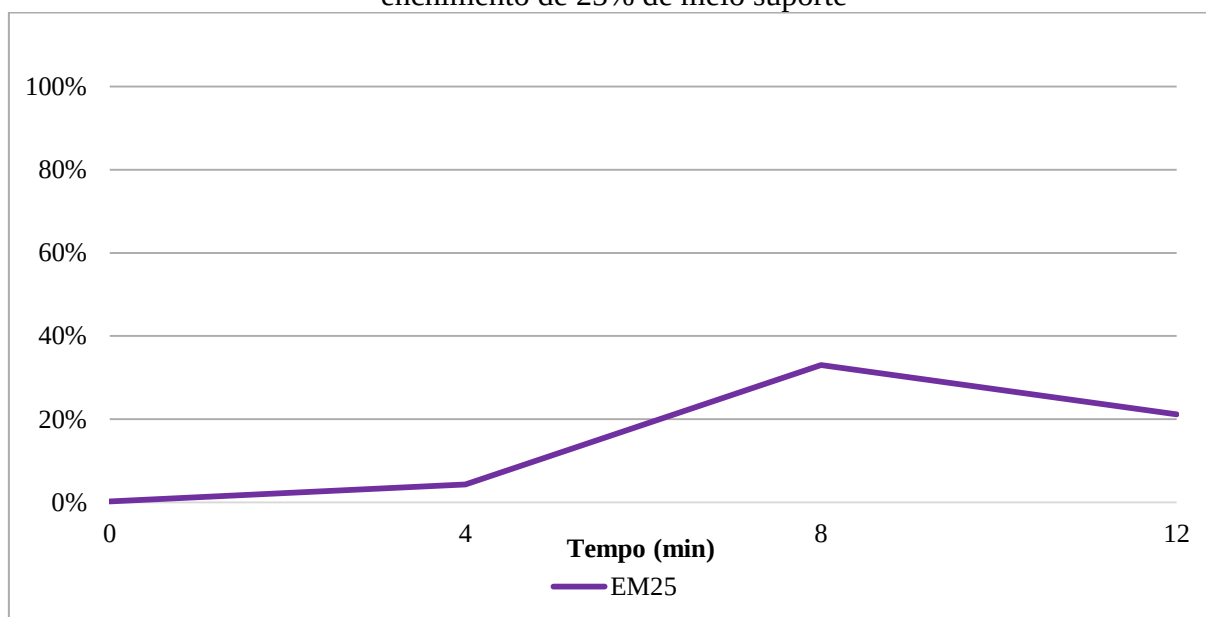


Fonte: Própria autora.

Em 4 minutos de ensaio, as amostras coletadas apresentaram o melhor desempenho dessa configuração, com 24,45% de eficiência a remoção de ST. Além disso, 5,68% e 22,77% de eficiência média foram encontradas em 8 e 12 minutos respectivamente. Conforme apresentado, o ponto com menor eficiência de remoção foi o de 8 minutos,

O desempenho do aparato em relação a remoção de sólidos totais nas amostras coletadas durante o ensaio realizado com o leito com 25% de enchimento de meio suporte é apresentado na Figura 54. De semelhante modo ao ocorrido nos resultados constatados nas análises de remoção de turbidez do leito nessa configuração, o melhor desempenho foi mostrado no tempo de operação em 8 minutos com 33,02% de eficiência, entretanto o pior desempenho foi constatado nas amostras coletadas em 0 minutos de execução do ensaio com 0,23% de eficiência de remoção de sólidos totais. O aparato apresentou eficiência de remoção de ST de 4,32% e 21,19% no tempo de 4 e 12 minutos respectivamente.

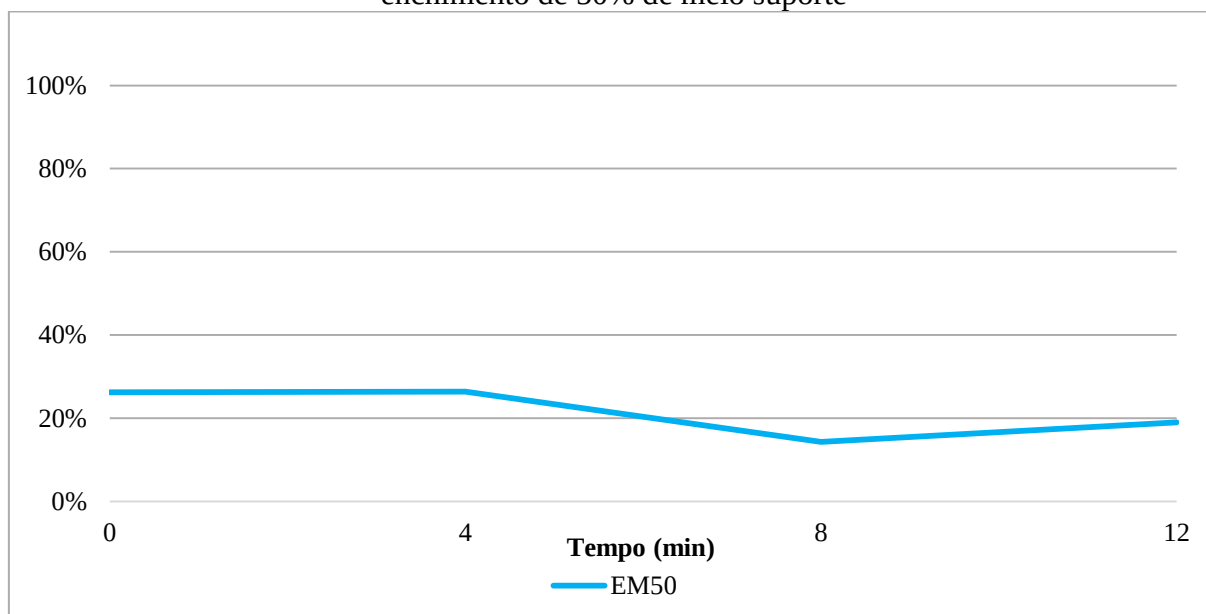
Figura 54 - Eficiência de remoção de sólidos totais da água sintética tipo I no leito com enchimento de 25% de meio suporte



Fonte: Própria autora.

A curva de eficiência a remoção de sólidos totais ao longo de 12 minutos de ensaio do aparato do leito com 50% de enchimento é apresentada na Figura 55.

Figura 55 - Eficiência de remoção de sólidos totais da água sintética tipo I no leito com enchimento de 50% de meio suporte

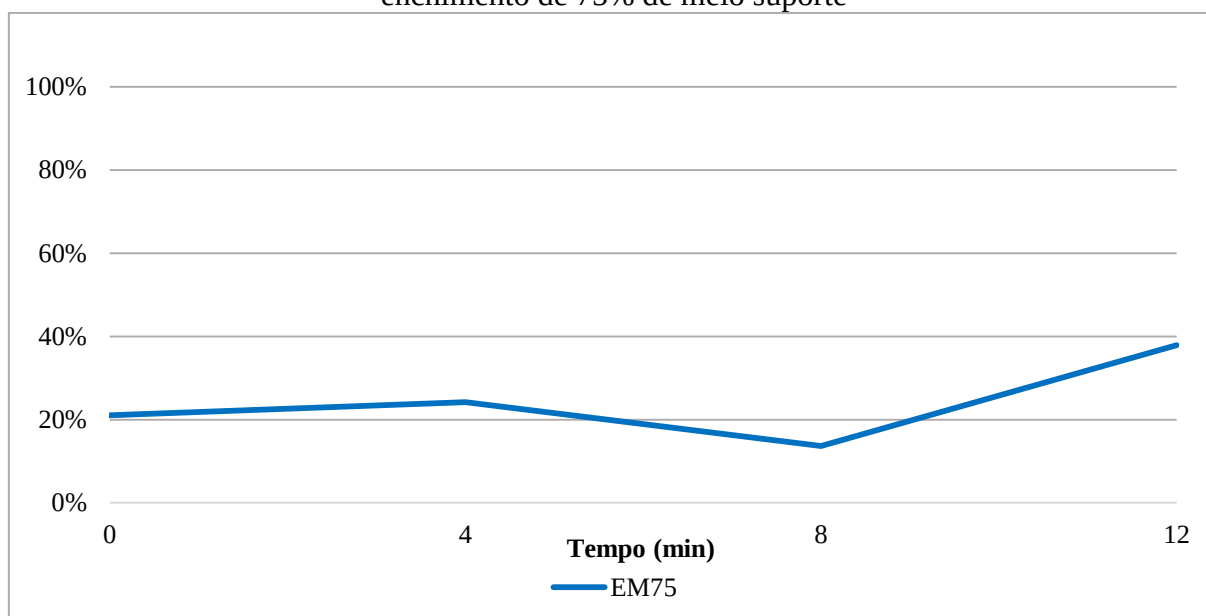


Fonte: Própria autora.

A partir dos resultados apresentados na Figura 55, o melhor desempenho é observado em 4 minutos com 26,40% de eficiência de remoção de ST, em contrapartida, o pior resultado é mostrado em 8 minutos com 14,27%. Nos demais instantes de ensaio foram obtidos desempenhos de 26,22% para as amostras coletadas em 0 minutos e 18,96% para as amostras de 12 minutos de ensaio.

A Figura 56 apresenta a curva de eficiência de remoção de sólidos totais do leite com 75% de empacotamento de meio suporte. A eficiência média de remoção dos sólidos totais presentes na água sintética tipo I foi de 21,03% para as amostras coletadas em 0 minutos, enquanto que foram observados os valores de 24,17% e 13,64% para 4 e 8 minutos de ensaio, respectivamente. O melhor desempenho nessa configuração foi mostrado em 12 minutos de ensaio com 37,89% de eficiência média a remoção de ST.

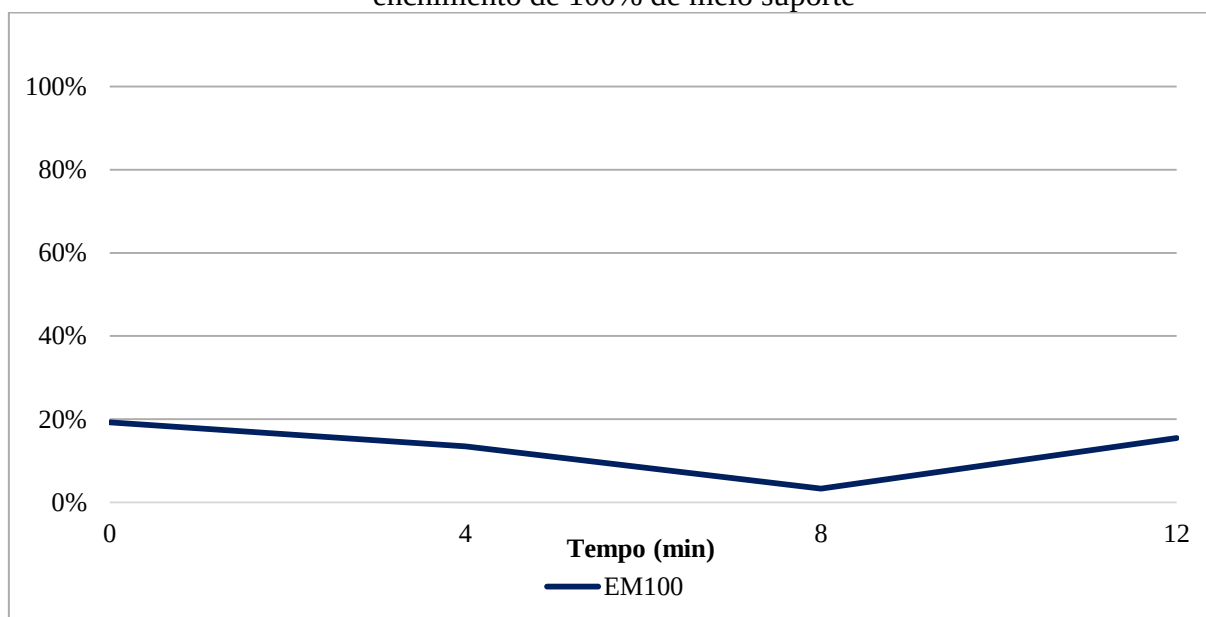
Figura 56 - Eficiência de remoção de sólidos totais da água sintética tipo I no leite com enchimento de 75% de meio suporte



Fonte: Própria autora.

A eficiência média de remoção de sólidos totais na configuração do aparato que tinha o leite completamente preenchido com meio suporte é apresentada pela curva na Figura 57. É possível analisar o desempenho do aparato ao longo do tempo de ensaio com 19,25% de eficiência média de remoção de ST para as amostras coletadas em 0 minutos, 13,48% e 3,30% para as amostras de 4 e 8 minutos, respectivamente, e por fim, 15,46% de eficiência média para as amostras no tempo de 12 minutos de ensaio.

Figura 57 - Eficiência de remoção de sólidos totais da água sintética tipo I no leito com enchimento de 100% de meio suporte



Fonte: Própria autora.

A eficiência de remoção de sólidos totais no leito com 100% de enchimento, mostrou performance menor em relação a eficiência de remoção de turbidez da água sintética tipo I. Esse dado indica que para essa configuração a proporção de retenção de partículas mais finas em relação as partículas mais densas, foi maior. Pelos dados apresentados no *boxplot* de ST da água sintética tipo I e tipo II do leito fixo, foi possível observar também, que o afluente bruto mais concentrado apresenta melhores resultados de eficiência de remoção.

Os comparativos entre as diferenças de eficiência de remoção de sólidos totais encontradas nas cinco configurações de leito estão apresentados na Tabela 57 e na Figura 58. A partir dos resultados, nota-se que no tempo de operação de 0 minutos mostrou melhor desempenho no leito sem mídia, enquanto que o pior desempenho é o encontrado no leito com 25% de enchimento com apenas 0,23% de eficiência de remoção média de ST.

Em relação as amostras coletadas na operação em 4 minutos, foi apontado o melhor desempenho do aparato na configuração com 50% de enchimento (26,40%), entretanto, a pior performance foi referente as amostras do leito com 25% de enchimento (4,32%).

O leito com 25% de enchimento obteve o melhor resultado de eficiência média de remoção de ST nas amostras coletadas em 8 minutos de ensaio, com 33,02%, enquanto o leito completamente preenchido obteve seu desempenho de 3,30% de eficiência como o menor resultado na operação em 8 minutos.

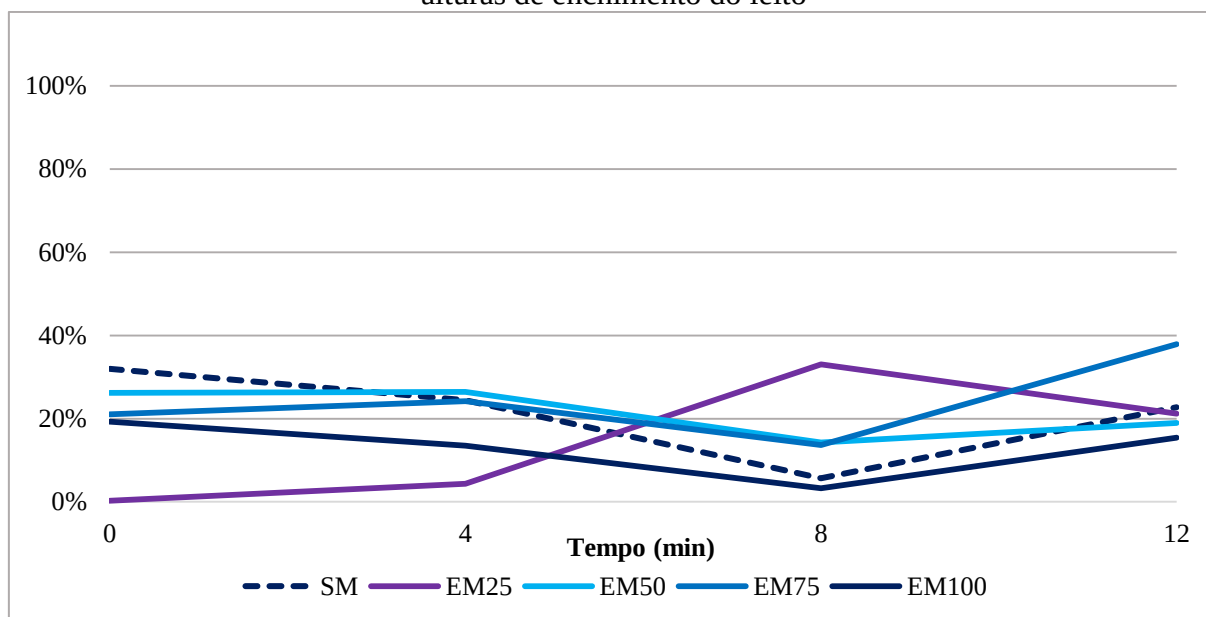
Tabela 57 - Eficiência de remoção de sólidos totais da água sintética tipo I com diferentes alturas de enchimento do leito

Enchimento do leito	Eficiência (%)			
	0 min	4 min	8 min	12 min
SM	31,98 ± 26,5	24,45 ± 23,2	5,68 ± 22,4	22,77 ± 15,3
EM25	0,23 ± 18,9	4,32 ± 43,4	33,02 ± 28,6	21,19 ± 32,8
EM50	26,22 ± 14,6	26,4 ± 18,3	14,27 ± 19,8	18,96 ± 29,6
EM75	21,03 ± 34,3	24,17 ± 19,0	13,64 ± 55,6	37,89 ± 18,19
EM100	19,25 ± 34,0	13,48 ± 29,9	3,3 ± 39,8	15,46 ± 28,1

Fonte: Própria autora.

Por sua vez, o leito com 75% de enchimento em meio suporte, apresentou 37,89% de eficiência média de remoção de sólidos totais nas amostras coletadas em 12 minutos de ensaio, entretanto, ao contrário observado na eficiência média de remoção a turbidez, o leito com 100% de enchimento de meio suporte apresentou o menor resultado das cinco configurações, com 15,46%.

Figura 58 - Eficiência de remoção de sólidos totais da água sintética tipo I com diferentes alturas de enchimento do leito



Fonte: Própria autora.

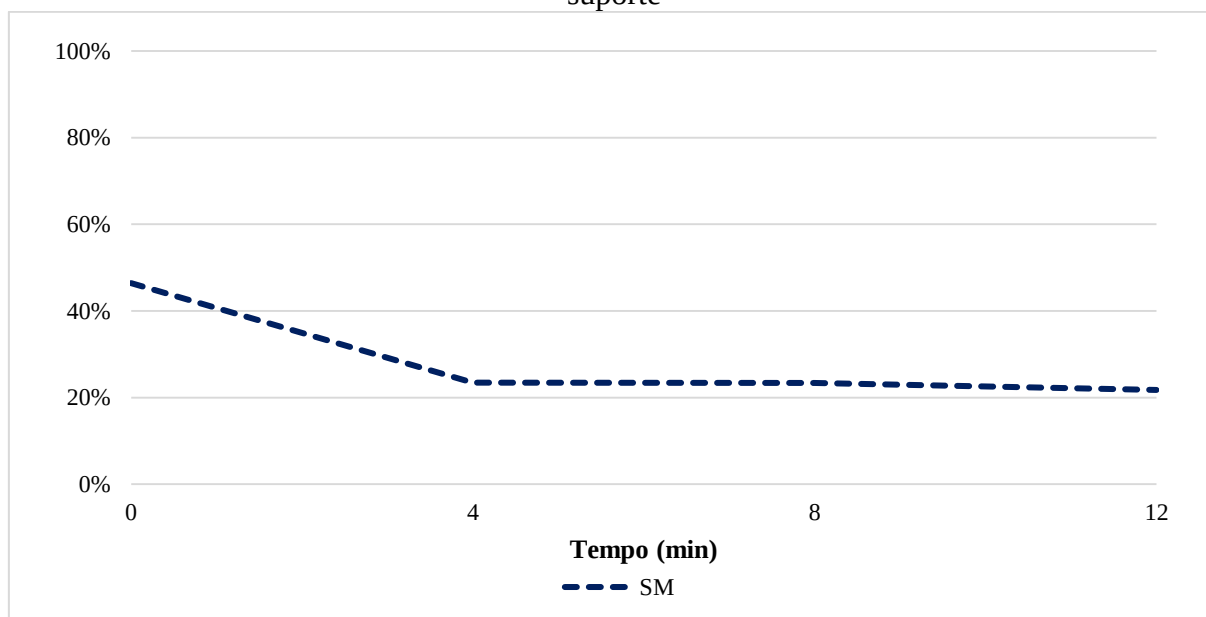
5.6.2 Água sintética tipo II

A Figura 59 apresenta a remoção de sólidos totais que ocorreu no leito sem meio suporte, é possível observar que houve uma remoção média inicial de sólidos totais de 46,42%, por outro lado, no instante 4 minutos seu desempenho de remoção média apresentou 23,47% e

os instantes 8 e 12 minutos apresentaram respectivamente 23,35% e 21,75 % de média de remoção.

Ao longo do período observado, nota-se que houve um declínio do desempenho do decantador em 53,14 %, o que era esperado, uma vez que as partículas mais finas inicialmente suspensas no tanque de agitação vão sedimentando, são coletadas pela bomba e carregadas com o fluxo d'água no aparato.

Figura 59- Eficiência de remoção de sólidos totais da água sintética tipo II no leito sem meio suporte

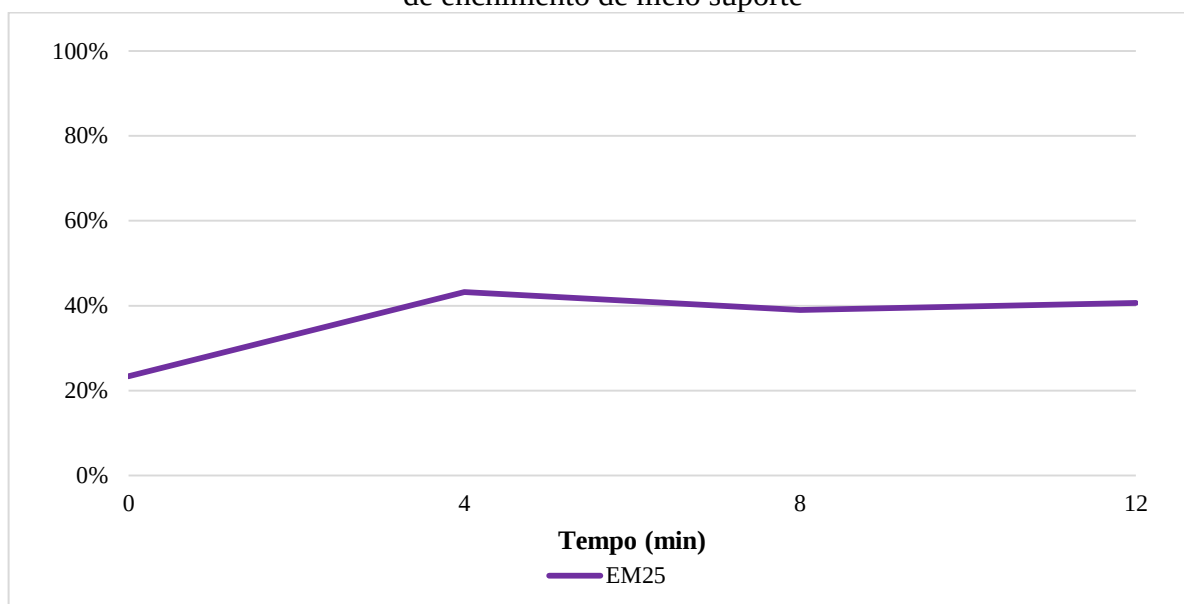


Fonte: Própria autora.

Ao inserir meio suporte no leito, nota-se um comportamento díspar em relação aos resultados apresentados pelos ensaios sem meio suporte. No instante inicial nota-se uma remoção inicial média de 23,34% e ao contrário do desempenho do aparato sem meio suporte, foi observado que um acréscimo de remoção de 85,22 % em relação ao momento inicial. Os resultados obtidos nos tempos de 4 minutos, 8 minutos e 12 minutos foram respectivamente 43,23%, 38,98 % e 40,66% e são apresentados no Figura 60.

Comparando aos resultados do aparato com 0,25 m de meio suporte em relação ao leito sem enchimento, nota-se uma melhoria do desempenho a partir do instante 4 minutos em uma média de 84,19% e posteriormente em valores médios de 66,94% e 86,94 % para os instantes 8 e 12 minutos. Dessa forma, é possível constatar que a utilização do meio suporte efetivamente apresentou melhoria da remoção de sólidos totais.

Figura 60- Eficiência de remoção de sólidos totais da água sintética tipo II no leito com 25 % de enchimento de meio suporte

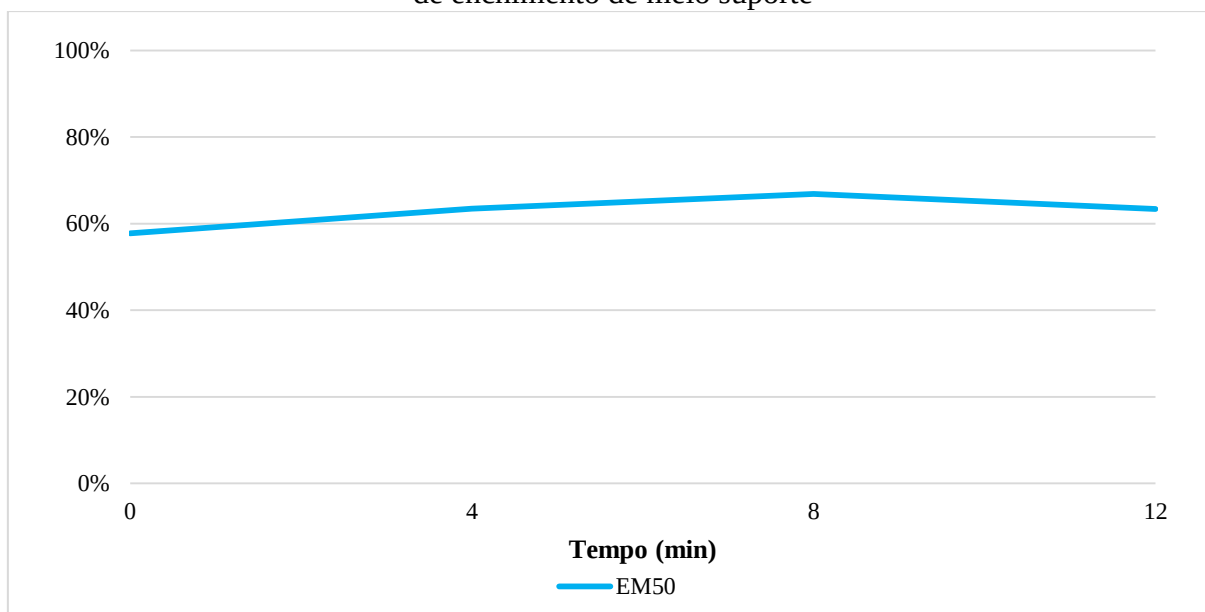


Fonte: Própria autora.

De forma análoga, o reator que possui enchimento em 50% apresentou desempenho de remoção de sólidos superior tanto em relação ao reator sem meio suporte quanto ao reator com a camada de 25%.

Os resultados apresentados na Figura 61, mostram uma remoção de sólidos iniciais de 57,77%, o desempenho apresentado no tempo de 4 minutos foi de 63,46%, seguidos de 66,88% e 63,38% para os instantes de 8 e 12 minutos, respectivamente.

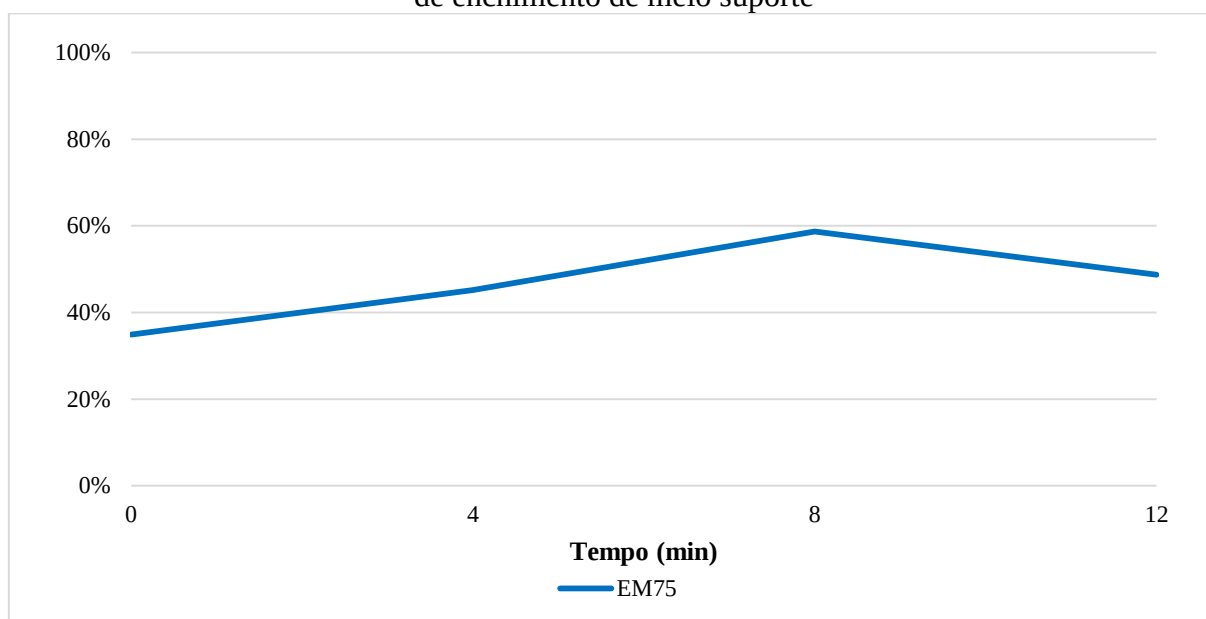
Figura 61 - Eficiência de remoção de sólidos totais da água sintética tipo II no leito com 50 % de enchimento de meio suporte



Fonte: Própria autora.

Os dados coletados no aparato cujo 75% do leito possuía enchimento de meio suporte, apresentaram eficiência de remoção de sólidos totais (Figura 62), em exceção do instante inicial, superiores aos resultados obtidos nos leitos sem meio suporte e no de 25% de enchimento.

Figura 62 - Eficiência de remoção de sólidos totais da água sintética tipo II no leito com 75 % de enchimento de meio suporte

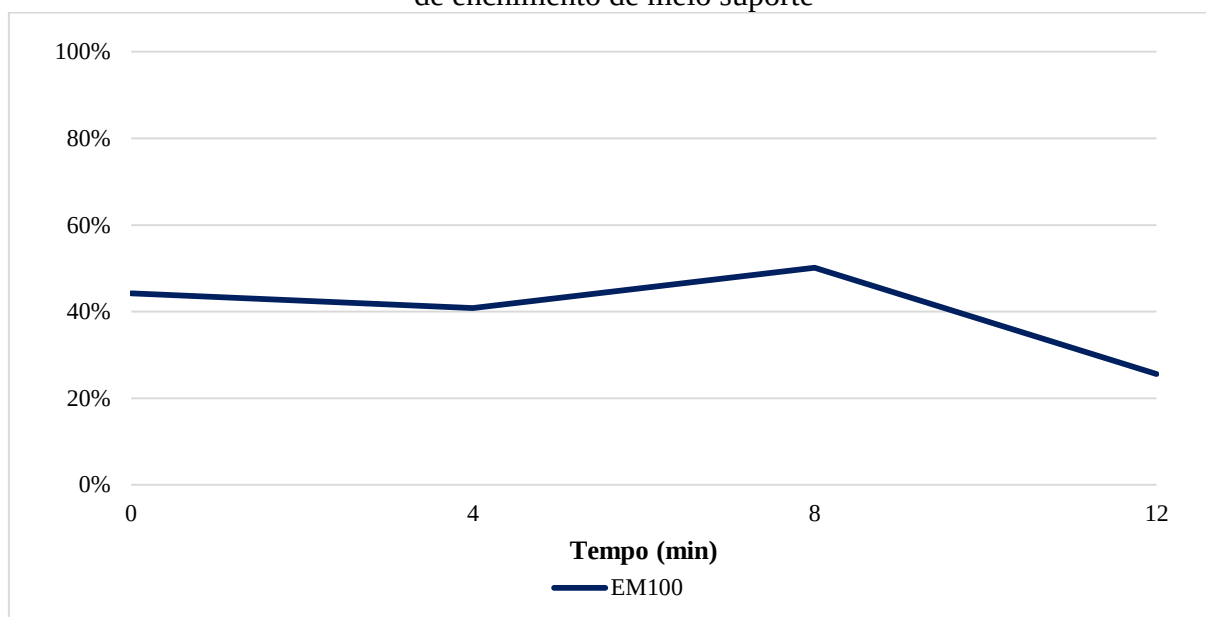


Fonte: Própria autora.

Entretanto, o leito apresentou um declínio de remoção quando comparado ao leito de enchimento com 50% de camada de meio suporte. Os resultados obtidos mostram a evolução de remoção de sólidos ao longo do tempo de ensaio apresentou a maior eficiência de remoção no tempo de 8 minutos com 58,67 %. O ponto com menor eficiência de remoção é de 34,94% alcançado no tempo inicial, o que apresenta consistência no desempenho do aparato em relação aos resultados iniciais das demais alturas de leito. Para os instantes de 4 e 12 minutos foram obtidos resultados respectivos de 45,16% e 48,74%.

A análise dos resultados obtidos pelo leito cujo enchimento era de 100% apresentou um leve declínio na eficiência de remoção entre o instante inicial (44,21%) e 4 minutos (40,80%). De modo semelhante aos demais resultados encontrados nos leitos com meio suporte, houve uma melhoria de remoção significativa entre o tempo de 4 minutos e 8 minutos (50,15%). Em relação ao comportamento no tempo de 12 minutos, houve um decréscimo significativo (25,59%), o mesmo decréscimo foi notado no leito de 75% de meio suporte e também no de 50% mesmo que de forma tênue. A Figura 63 apresenta a eficiência de remoção ao longo do tempo de ensaio.

Figura 63- Eficiência de remoção de sólidos totais no leito da água sintética tipo II com 100 % de enchimento de meio suporte



Fonte: Própria autora.

A porcentagem de remoção de sólidos totais observada nos ensaios em diferentes alturas de leito é apresentada na Tabela 58. Dentre os resultados obtidos, o melhor desempenho de remoção de sólidos totais foi obtido no leito que apresenta o enchimento do leito com altura de 0,50 m (50% de enchimento) com eficiência média de remoção entre 57,77% a 66,88%.

Tabela 58 - Eficiência de remoção de sólidos totais da água sintética tipo II com diferentes alturas de enchimento do leito

Enchimento do leito	Eficiência (%)			
	0 min	4 min	8 min	12 min
SM	46,42 ± 25,3	23,47± 41,3	23,35± 45,6	21,75± 37,4
EM25	23,34 ± 33,4	43,23± 23,7	38,98± 42,3	40,66± 29,2
EM50	57,77± 20,4	63,46± 15,7	66,88± 19,8	63,38± 18,7
EM75	34,94± 12,7	45,16± 16,2	58,67± 18,7	48,74± 10,7
EM100	44,21 ± 24,8	40,80± 14,9	50,15±11,0	25,59± 6,4

Fonte: Própria autora.

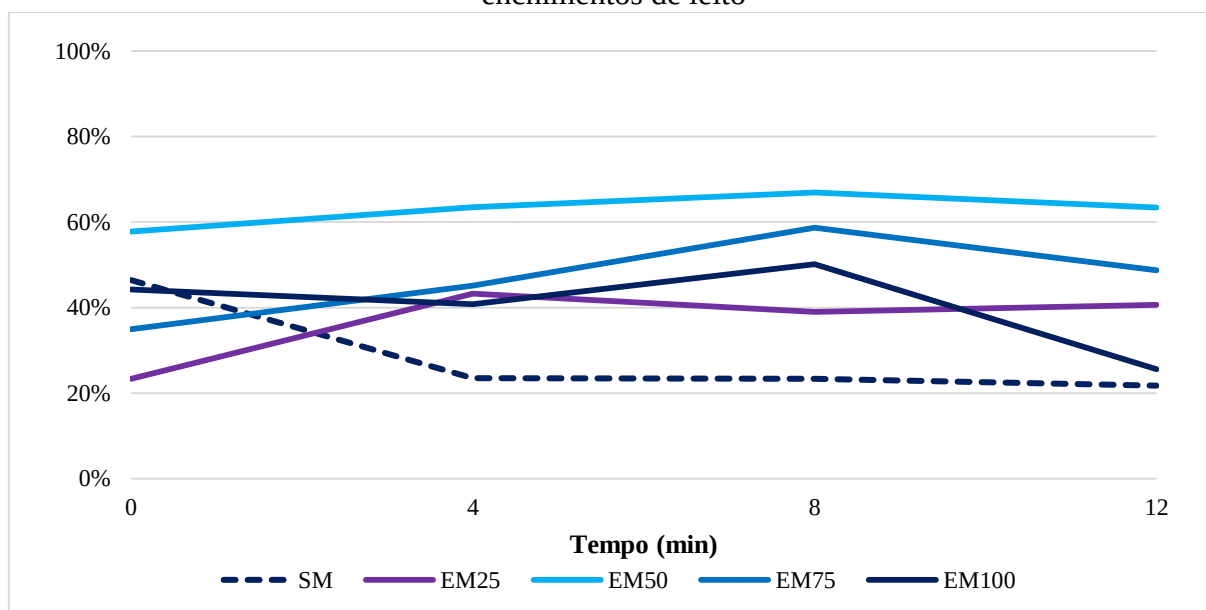
Em sequência, o segundo melhor desempenho foi apresentado pelo leito de enchimento de altura de enchimento de meio suporte de 75% com remoção entre 34,94% e 58,67%. Os leitos que tinham enchimento de 25% e 100% apresentaram, respectivamente, eficiência de remoção entre 23,34 % a 43,23 % e 25,59 % a 50,15 %. A eficiência de remoção de sólidos analisada no leito sem meio suporte apresenta uma remoção inicial média de 46,42%, decaindo a 21,75% ao fim do período analisado. A Figura 64 apresenta os dados dispostos na Tabela 58

com a curva de desempenho de remoção de sólidos totais para cada uma das situações analisadas.

Os resultados apresentados mostram a interferência do meio suporte na remoção dos sólidos totais presentes no aparato. O comportamento do leito sem meio suporte mostra que ao longo do tempo as partículas mais finas que não sedimentam devido a velocidade e peso da partícula, são carregadas até a saída do aparato apresentado dessa forma o declínio na eficiência da remoção ao longo do tempo.

Com a inserção do meio suporte no leito, esperava-se que o mesmo apresentasse melhoria na remoção das partículas. O meio suporte foi projetado para fixação de microrganismos, sendo uma das suas principais características a estrutura cheia de ranhuras e vazios (MAHTO; DAS, 2022). A capacidade da argila agregar-se ao meio suporte justifica a remoção de sólidos.

Figura 64- Eficiência de remoção de sólidos totais da água sintética tipo II entre diferentes enchimentos de leito



Fonte: Própria autora.

O desempenho de eficiência de remoção média de sólidos totais no leito sem meio suporte foi de 28,9%, enquanto que as configurações de 0,25, 0,50, 0,75 e 1,00 m de altura de camada de meio suporte apresentaram, respectivamente, 36,6%, 62,9%, 46,9% e 40,2% de eficiência na remoção dos sólidos totais.

Khan *et al.* (2022) analisaram a remoção de fármacos usando sistema MBBR de leito móvel e tratamento físico-químico de ozonização e processo de oxidação avançado. O sistema MBBR operou sobre um enchimento de 35%, TDH de 16 h e tempo de retenção de sólidos em

5 h. Na análise de remoção de SST o sistema MBBR apresentou uma eficiência de remoção semanal de 98,3% (KHAN *et al.*, 2022).

Clark *et al.* (2009) analisou a utilização de decantadores de alta taxa para remoção de partículas finas em águas de abastecimento público. Em seu estudo, concluiu que os decantadores com placas inclinadas foram capazes de remover partículas de 250 μm . Além disso, mostrou que essa configuração de decantadores é capaz de alta taxa de remoção de partículas com densidade próxima ao da areia (CLARK *et al.*, 2009).

A relação entre turbidez, taxa de escoamento superficial e tempo de detenção hidráulica foram analisados por Saady (2012) para projetar um decantador convencional modificado com placas inclinadas. Os resultados apontaram para uma taxa de escoamento superficial de 1,1 $\text{m}^3/\text{m}^2.\text{h}$, turbidez afluente 350 NTU e TDH 27 min, eficiência de remoção de turbidez ou sólidos suspensos de 11,38% nos ensaios com decantador convencional, 26,99% de eficiência de remoção de turbidez ou sólidos suspensos nos testes do decantador com placas inclinadas, 73,19% de eficiência de remoção de turbidez ou sólidos suspensos nos ensaios do decantador convencional com utilização de coagulantes de sulfato de alumínio e 88,78% de eficiência de remoção de turbidez ou sólidos suspensos no decantador com placas inclinadas com utilização de coagulantes de sulfato de alumínio (SAADY, 2012).

A eficiência de remoção a turbidez e sólidos totais ST da água sintética tipo II foram superiores, em todas configurações, aos obtidos por Saady (2012) em relação ao decantador convencional e ao decantador de alta taxa (placas inclinadas). Isso indica, uma possível viabilidade de utilização desse dispositivo em estações de tratamento de água e esgoto para a remoção de partículas finas.

Os resultados de ST mostram um melhor desempenho nos leitos com 50% e 75% de empacotamento. Acredita-se que, a movimentação do meio suporte no leito durante a trajetória do fluido, influencia na sedimentação das partículas no leito.

6 CONCLUSÕES

Com base nos resultados analisados, o decantador apresentou um desempenho satisfatório na remoção de partículas finas da água sintética. A água sintética com maior concentração de partículas apresentou melhores resultados de remoção. Em relação ao desempenho de remoção, nos diferentes empacotamentos do leito do decantador, foram obtidos resultados positivos, tanto nas amostras de turbidez, quanto nas amostras de ST, em todas configurações com meio suporte.

A investigação da influência da porcentagem de empacotamento no leito mostrou que o melhor desempenho geral foi obtido no leito com 50% de empacotamento. A eficiência da remoção da turbidez obtida no leito fixo da água sintética de menor concentração, como também no leito com 75% de empacotamento da água sintética de maior concentração mostra uma tendência de remoção de turbidez melhor em leitos mais preenchidos. Em contrapartida, a eficiência de remoção de ST apresentou melhor performance no leito com 75% de empacotamento, nas amostras de menor concentração de sólidos e no leito de 50%, nas amostras mais concentradas. Ademais, em ambos parâmetros, notou-se a inclinação do aparato em otimizar a eficiência de remoção de efluentes e/ou águas brutas mais concentradas com a redução do enchimento do leito em relação às águas menos concentradas.

A eficiência média de remoção de ST e turbidez no leito com 50% de empacotamento foi de 20,40% nos ensaios com a água sintética tipo I e de 62% nos ensaios com a água sintética tipo II. O reduzido número de dados pertinentes aos grupos, tornou as análises estatísticas inconclusivas, apresentadas apenas como uma tendência do comportamento das amostras ao longo do tratamento. O baixo TDH de operação do decantador mostra-se vantajoso no emprego do dispositivo em estações de tratamento água e/ou esgoto.

Com base nesses resultados, recomenda-se que seja feita uma análise mais detalhada, com N maior ou igual a 20, para validar estatisticamente os resultados encontrados. Recomenda-se também a análise do tamanho das partículas de entrada e saída do tratamento, a fim de avaliar o tamanho das partículas que estão sendo retidas pelo decantador.

Outra sugestão refere-se à execução dos ensaios utilizando as configurações com 50% e 75% de empacotamento em outras composições de água sintética e água bruta. O aprofundamento desse estudo acerca da relação existente entre a concentração de partículas do fluido e a capacidade de remoção para cada configuração seria um passo importante para entender se o empacotamento ideal, para demais composições de efluente, se refere ao encontrado nesse estudo.

REFERÊNCIAS

- ALAM, Sarfaraz; BORTHAKUR, Annesh; RAVI, Sujith; GEBREMICHAEL, Mekonnen; MOHANTY, Sanjay K.. Managed aquifer recharge implementation criteria to achieve water sustainability. **Science of The Total Environment**, Amsterdam, v. 768, p. 144992-144992, maio 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.144992>.
- ALMADA, Rafael Barreto. **Avaliação de reatores de leito móvel com biofilme (MBBR) em série para tratamento de diferentes efluentes de refinaria de petróleo visando ao reuso industrial**. 2012. 287 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Química, COPPE - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.
- ALMEIDA, Diego Wohlers da F; COSTA, Suzana Santos; FONTOURA, Sérgio A. B. da. Estudo de correlações de velocidade de sedimentação de partículas para fluidos não-newtonianos aplicados a problemas de limpeza de poços de petróleo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS, 4., 2007, Campinas. **Anais [...]** Campinas: ABPG, 2007. p. 2.2.0343-1 – 1 – 2.2.0343-1 – 9.
- ALMEIDA FILHO, Gerson Salviano de; HELLMEISTER JÚNIOR, Zeno. EROSÃO HÍDRICA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DO PEIXE, SÃO PAULO, BRASIL. In: MACHADO, Felipe Santana; MOURA, Aloysio Souza de. **Educação, Meio Ambiente e Território 3**. Belo Horizonte: Atena Editora, 2019. Cap. 18. p. 187-197. DOI: 10.22533/at.ed.44219210218. Acesso em: 30 maio 2021.
- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA). **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 23. ed. Washington, D.C.: American Public Health Association, 2017.
- AMIRTHARAJAH, Appiah. Some Theoretical and Conceptual Views of Filtration. **Journal - American Water Works Association**, Oxford, v. 80, n. 12, p. 36-46, dez. 1988. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/j.1551-8833.1988.tb03147.x>.
- ARABGOL, Raheleh; VANROLLEGHEM, Peter A.; DELATOLLA, Robert. Influence of MBBR carrier geometrical properties and biofilm thickness restraint on biofilm properties, effluent particle size distribution, settling velocity distribution, and settling behaviour. **Journal of Environmental Sciences**, Amsterdam, v. 122, p. 138-149, dez. 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jes.2021.09.029>.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12216**: rochas e solos: terminologia. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1995. 18 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502**: projeto de estação de tratamento de água para abastecimento público. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1992. 18 p.
- AYGUN, Ahmet; NAS, Bilgehan; BERKTAY, Ali. Influence of High Organic Loading Rates on COD Removal and Sludge Production in Moving Bed Biofilm Reactor. **Environmental Engineering Science**, New Rochelle, v. 25, n. 9, p. 1311-1316, nov. 2008. DOI: <http://dx.doi.org/10.1089/ees.2007.0071>.

BARWAL, Anjali; CHAUDHARY, Rubina. To study the performance of biocarriers in moving bed biofilm reactor (MBBR) technology and kinetics of biofilm for retrofitting the existing aerobic treatment systems: a review. **Reviews In Environmental Science and Bio/Technology**, New Rochelle, v. 13, p. 285-299, abr. 2014.

BIASE, Alessandro di; KOWALSKI, Maciej S.; DEVLIN, Tanner R.; OLESZKIEWICZ, Jan A.. Moving bed biofilm reactor technology in municipal wastewater treatment: A review. **Journal of Environmental Management**, Amsterdam, v. 247, p. 849-866, out. 2019.

CALDERÓN-FRANCO, David; APOORVA, Seeram; MEDEMA, Gertjan; VAN LOOSDRECHT, Mark C.M.; WEISSBRODT, David G.. Upgrading residues from wastewater and drinking water treatment plants as low-cost adsorbents to remove extracellular DNA and microorganisms carrying antibiotic resistance genes from treated effluents. **Science of The Total Environment**, Amsterdam, v. 778, p. 146364, jul. 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146364>.

CAMP, Thomas R. Applied hydraulic design of treatment plants. – Part 1. In: SEMINAR PAPERS ON WASTEWATER TREATMENT AND DISPOSAL. 1961, Boston. **Anais [...]** Boston: Boston Society of Civil Engineers, 1961. 231 p.

CHEN, Gang. *S. typhimurium* and *E. coli* O157: h7 retention and transport in agricultural soil during irrigation practices. **European Journal of Soil Science**, Chichester, v. 63, n. 2, p. 239-248, 12 mar. 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2389.2012.01430.x>.

CHEN, Sheng; SUN, Dezhi; CHUNG, Jong-Shik. Treatment of pesticide wastewater by moving-bed biofilm reactor combined with Fenton-coagulation pretreatment. **Journal of Hazardous Materials**, Amsterdam, v. 144, n. 1-2, p. 577-584, jun. 2007. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.10.075>.

CHEN, Sheng; SUN, Dezhi; CHUNG, Jong-Shik. Simultaneous removal of COD and ammonium from landfill leachate using an anaerobic–aerobic moving-bed biofilm reactor system. **Waste Management**, Oxford, v. 28, n. 2, p. 339-346, jan. 2008. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2007.01.004>.

CLARK, Shirley E.; ROENNING, Christopher D.; ELLIGSON, James C.; MIKULA, J. B.. Inclined Plate Settlers to Treat Storm-Water Solids. **Journal of Environmental Engineering**, Amsterdam, v. 135, n. 8, p. 621-626, ago. 2009. DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)ee.1943-7870.0000018](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)ee.1943-7870.0000018).

COBRAPE. **Subsídios Técnicos para o Plano Estadual de Recursos Hídricos 2020 -2023:** relatório final. São Paulo: FEHIDRO, 2020. 246 p. (TOMO I - Caracterização e Situação dos Recursos Hídricos).

COLARES, Carla Jovania Gomes; SANDRI, Delvio. Efficiency of sewage treatment with septic tanks followed by constructed wetlands with different support materials. **Ambiente e Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, Amsterdam, v. 8, n. 1, p. 172-185, 30 abr. 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.1047>.

COLLINS, Adrian L.; ANTHONY, Steven G.; HAWLEY, Julia; TURNER, Tony. The potential impact of projected change in farming by 2015 on the importance of the agricultural sector as a sediment source in England and Wales. **Catena**, Amsterdam, v. 79, n. 3, p. 243-250, dez. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2009.05.007>.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente. **Qualidade das águas interiores no estado de São Paulo**. São Paulo: CETESB, 2020. 246 p.

COUSTUMER, S. Le; BARRAUD, S.. Long-term hydraulic and pollution retention performance of infiltration systems. **Water Science and Technology**, London, v. 55, n. 4, p. 235-243, 1 fev. 2007. DOI: <http://dx.doi.org/10.2166/wst.2007.114>.

DI BERNARDO, Luiz; DANTAS, Angela Di Bernardo; VOLTAN, Paulo Eduardo Nogueira. **Métodos e técnicas de tratamento de água**. 3. ed. São Carlos: Ldibe, 2017. 1246 p.

DIAS, Joana; BELLINGHAM, Mell; HASSAN, Junaid; BARRET, Mark; STEPHESON, Tom; SOARES, Ana. Impact of carrier media on oxygen transfer and wastewater hydrodynamics on a moving attached growth system. **Chemical Engineering Journal**, Amsterdam, v. 351, p. 399-408, 1 nov. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.06.028>.

DODDS, Walter K.; WHILES, Matt R.. Properties of Water. **Freshwater Ecology**, New York, p. 21-48, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-813255-5.00002-8>.

DUYAR, Ahmet; CIFTCIOGLU, Vildan; CIRIK, Kevser; CIVELEKOGLU, Gokhan; URUŞ, Serhan. Treatment of landfill leachate using single-stage anoxic moving bed biofilm reactor and aerobic membrane reactor. **Science of The Total Environment**, Amsterdam, v. 776, p. 145919, jul. 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145919>.

FERREIRA, Daiane Bortolote; SANTANA, Ricardo Correa de; BARROZO, Marcos Antônio de Sousa; SOUZA, Davi Leonardo de; VIEIRA NETO, José Luiz; SANTOS, Kassia Graciele dos. Simulação de leito empacotado com misturas binárias de esferas de diâmetros diferentes empregando correlações e o Método de Elementos Discretos. **Research, Society And Development**, Itaboraí, v. 10, n. 10, p. 553101019012, 18 ago. 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v10i10.19012>.

FLEITE, Santiago N.; GARCÍA, Ana R.; SANTOS, Christian de Los; MISSONI, Leandro L.; TORRES, Rocío; LAGORIO, M. Gabriela; CASSANELLO, Miryan. Simulation and optimization of a lamella settler for cattle feedlot wastewater treatment and nutrients recovery. Experimental validation in the field. **Heliyon**, London, v. 6, n. 12, p. 05840, dez. 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05840>.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **The state of the world's land and water resources for food and agriculture: systems at breaking point**. Rome: FAO, 2021.

GEBARA, Dib. **Desempenho de um reator aeróbio de leito fluidizado no tratamento de esgoto sanitário**. 2006. 400 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Hidráulica e Sanitária, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

HEPP, Gerold; ZESSNER, Matthias. Assessing the Impact of Storm Drains at Road Embankments on Diffuse Particulate Phosphorus Emissions in Agricultural Catchments. **Water**, London, v. 11, n. 10, p. 2161-2161, 17 out. 2019. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/w11102161>.

GOMES, Samuel de Carvalho; ZHOU, John L.; ZENG, Xiaohui; LONG, Guangcheng. Water treatment sludge conversion to biochar as cementitious material in cement composite. **Journal of Environmental Management**, Amsterdam, v. 306, p. 114463, mar. 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114463>.

GUPTA, Bramha; GUPTA, Ashok Kumar; GHOSAL, Partha Sarathi; LAL, Saurabh; SAIDULU, Duduku; SRIVASTAVA, Ashish; UPADHYAY, Maharishi. Recent advances in application of moving bed biofilm reactor for wastewater treatment: insights into critical operational parameters, modifications, field-scale performance, and sustainable aspects. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, Amsterdam, v. 10, n. 3, p. 107742, jun. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jece.2022.107742>.

JIANG, Dalin; MATSUSHITA, Bunkei; PAHLEVAN, Nima; GURLIN, Daniela; LEHMANN, Moritz K.; FICHOT, Cédric G.; SCHALLES, John; LOISEL, Hubert; BINDING, Caren; ZHANG, Yunlin. Remotely estimating total suspended solids concentration in clear to extremely turbid waters using a novel semi-analytical method. **Remote Sensing of Environment**, Amsterdam, v. 258, p. 112386-112386, jun. 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2021.112386>.

JING, Jie Ying; FENG, Jie; LI, Wen Ying. Carrier effects on oxygen mass transfer behavior in a moving-bed biofilm reactor. **Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering**, Oxford, v. 4, n. 5, p. 618-623, 25 maio 2009. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/apj.302>.

JONES, Edward R.; VAN VLIET, Michelle T. H.; QADIR, Manzoor; BIERKENS, Marc F. P.. Country-level and gridded estimates of wastewater production, collection, treatment and reuse. **Earth System Science Data**, Goettingen, v. 13, n. 2, p. 237-254, 8 fev. 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.5194/essd-13-237-2021>.

KHAN, Nadeem A.; KHAN, Afzal Husain; AHMED, Sirajuddin; FAROOQI, Izharul Haq; ALAM, Shah Saud; ALI, Imran; BOKHARI, Awais; MUBASHIR, Muhammad. Efficient removal of ibuprofen and ofloxacin pharmaceuticals using biofilm reactors for hospital wastewater treatment. **Chemosphere**, Oxford, v. 298, p. 134243, jul. 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134243>.

KUMAR, Gopal; SENA, D.R.; RAO, B.K.; KUROTHE, R.s.; YADAV, Nyonand; BHATNAGAR, P.R.; MANDAL, Uday. Empirical evaluation of sand filters to evolve practical designs for artificial recharge through dry wells. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 593, p. 125839, fev. 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125839>.

KUMAR, Priyan Malarvizhi; HONG, Choong Seon. Internet of things for secure surveillance for sewage wastewater treatment systems. **Environmental Research**, Maryland Heights, v. 203, p. 111899, jan. 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envres.2021.111899>

KYRIAKIDIS, Y. N.; VIEIRA, L. G. M.; ROCHA, S. M. S. Estudo fluidodinâmico computacional de um reator de leito móvel para tratamento de efluente da indústria de celulose e papel. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA - COBEQ, 20., 2014, São Paulo. **Anais [...]** São Paulo: Blucher, 2015. p. 6249-6256

LEÃO, Susana; ROUX, Philippe; LOISEAU, Eléonore; JUNQUA, Guillaume; SFERRATORE, Agata; PENRU, Ywann; ROSENBAUM, Ralph K.. Prospective Water Supply Mix for Life Cycle Assessment and Resource Policy Support—Assessment of Forecasting Scenarios Accounting for Future Changes in Water Demand and Availability. **Environmental Science & Technology**, Washington, v. 53, n. 3, p. 1374-1384, 10 jan. 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.1021/acs.est.8b04071>.

LEVINE, Audrey D.; TCHOBANOGLOUS, George; ASANO, Takashi. Characterization of the Size Distribution of Contaminants in Wastewater: Treatment and Reuse Implications. **Journal (Water Pollution Control Federation)**, Alexandria, v. 57, n. 7, p. 805-16, jul. 1985. <http://www.jstor.org/stable/25042701>.

LI, Changwei; GU, Zhefeng; ZHU, Songming; LIU, Dezhaoh. 17 β -Estradiol removal routes by moving bed biofilm reactors (MBBRs) under various C/N ratios. **Science of The Total Environment**, Amsterdam, v. 741, p. 140381, nov. 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140381>.

LIU, Yiqian; LU, Hao; LI, Yudong; XU, Hong; PAN, Zhicheng; DAI, Pinyi; WANG, Hualin; YANG, Qiang. A review of treatment technologies for produced water in offshore oil and gas fields. **Science of The Total Environment**, Amsterdam, v. 775, p. 145485, jun. 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145485>.

LOPES, Ana Maria Beims. **Desenvolvimento de nova concepção autolimpante na conformação interna de decantadores de alta taxa do tipo tubular horizontal**. 2020. 240 f. Dissertação (Doutorado) - Curso de Engenharia Ambiental, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2020.

MAHTO, Kumari Uma; DAS, Surajit. Bacterial biofilm and extracellular polymeric substances in the moving bed biofilm reactor for wastewater treatment: a review. **Bioresource Technology**, Amsterdam, v. 345, p. 126476, fev. 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126476>.

MALLIKARJUNA, Challa; DASH, Rajesh Roshan. A review on hydrodynamic parameters and biofilm characteristics of inverse fluidized bed bioreactors for treating industrial wastewater. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, Amsterdam, v. 8, n. 5, p. 104233, out. 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jece.2020.104233>.

MANIKANDAN, Sivasubramanian; SUBBAIYA, Ramasamy; SARAVANAN, Muthupandian; PONRAJ, Mohanadoss; SELVAM, Masilamani; PUGAZHENDHI, Arivalagan. A critical review of advanced nanotechnology and hybrid membrane based water recycling, reuse, and wastewater treatment processes. **Chemosphere**, Oxford, v. 289, p. 132867, fev. 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132867>.

MARTINS, Cláudia Lavina. **Comportamento de reator de leito fluidizado trifásico aeróbio utilizando diferentes materiais suporte**. 2003. 153 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Ambiental, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

TCHOBANOGLIOUS, George; STENSEL, H. David; TSUCHIHASHI, Ryujiro; BURTON, Franklin. **Tratamento de efluentes e recuperação de recursos**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2016. 1980 p.

MUIRHEAD, Richard William; COLLINS, Robert Peter; BREMER, Philip James. Interaction of *Escherichia coli* and Soil Particles in Runoff. **Applied And Environmental Microbiology**, Washington, v. 72, n. 5, p. 3406-3411, maio 2006. DOI: <http://dx.doi.org/10.1128/aem.72.5.3406-3411.2006>.

OLIVEIRA, Gislayne A.; COLARES, Gustavo S.; LUTTERBECK, Carlos A.; DELL'OSBEL, Naira; MACHADO, Ênio L.; RODRIGUES, Lucia R.. Floating treatment wetlands in domestic wastewater treatment as a decentralized sanitation alternative. **Science of The Total Environment**, Amsterdam, v. 773, p. 145609-145609, 15 jun. 2021.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. Groundwater and Soil Moisture Conditions from GRACE-FO Data Assimilation for the Contiguous U.S. and Global Land: groundwater percentile maps. Groundwater Percentile Maps. 2022. Disponível em: <https://nasagrace.unl.edu/>. Acesso em: 20 set. 2022.

ØDEGAARD, Hallvard. Advanced compact wastewater treatment based on coagulation and moving bed biofilm processes. **Water Science and Technology**, London, v. 42, n. 12, p. 33-48, 1 dez. 2000. IWA Publishing. <http://dx.doi.org/10.2166/wst.2000.0235>.

ØDEGAARD, Hallvard; RUSTEN, Bjorn; WESTRUM, T. A new moving bed biofilm reactor - applications and results. **Water Science and Technology**, London, v. 29, n. 10-11, p. 157-165, out. 1994.

ÖZKAYA, Bestami; KAKSONEN, Anna H.; SAHINKAYA, Erkan; PUHAKKA, Jaakko A.. Fluidized bed bioreactor for multiple environmental engineering solutions. **Water Research**, Oxford, v. 150, p. 452-465, mar. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2018.11.061>.

PALOMINO, Angelica M.; SANTAMARINA, J. Carlos. Fabric map for kaolinite: effects of pH and ionic concentration on behavior. **Clays and Clay Minerals**, Basel, v. 53, n. 3, p. 211-223, 1 jun. 2005. DOI: <http://dx.doi.org/10.1346/ccmn.2005.0530302>.

PAN, Dandan; SHAO, Sicheng; ZHONG, Jinfeng; WANG, Minghui; WU, Xiangwei. Performance and mechanism of simultaneous nitrification–denitrification and denitrifying phosphorus removal in long-term moving bed biofilm reactor (MBBR). **Bioresource Technology**, Amsterdam, v. 348, p. 126726, mar. 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2022.126726>.

PROGRAMA DE DESENVOLVIMENTO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Objetivos de desenvolvimento sustentável**. [S. l.], 2021. Disponível em: <http://www.undp.org/content/undp/en/home/sustainable-development-goals.html>. Acesso em: 25 fev. 2021.

REMUND, D.; LIEBISCH, Frank; LINIGER, H.P.; HEINIMANN, A.; PRASUHN, Volker. The origin of sediment and particulate phosphorus inputs into water bodies in the Swiss Midlands – A twenty-year field study of soil erosion. **Catena**, Amsterdam, v. 203, p. 105290-105290, ago. 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2021.105290>.

REYES, Cristian; APAZ, Fernando; NIÑO, Yarko; BARRAZA, Belén; ARRATIA, Cristobal; IHLE, Christian F. A review on steeply inclined settlers for water clarification. **Minerals Engineering**, Oxford, v. 184, p. 107639, jun. 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107639>.

RISING, James; JOSSET, Laureline; TROY, Tara; LALL, Upmanu. The importance of infrastructure and national demand to represent constraints on water supply in the United States. **Global Environmental Change**, Oxford, v. 73, p. 102468, mar. 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2022.102468>.

RÜGNER, Hermann; SCHWIENTEK, Marc; BECKINGHAM, Barbara; KUCH, Bertram; GRATHWOHL, Peter. Turbidity as a proxy for total suspended solids (TSS) and particle facilitated pollutant transport in catchments. **Environmental Earth Sciences**, Heidelberg, v. 69, n. 2, p. 373-380, 17 fev. 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s12665-013-2307-1>.

RÜGNER, Hermann; SCHWIENTEK, Marc; EGNER, Marius; GRATHWOHL, Peter. Monitoring of event-based mobilization of hydrophobic pollutants in rivers: calibration of turbidity as a proxy for particle facilitated transport in field and laboratory. **Science of The Total Environment**, Amsterdam, v. 490, p. 191-198, ago. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.04.110>.

RUSTEN, Bjørn; MCCOY, Mike; PROCTOR, Robert; SILJUDALEN, Jon G.. The Innovative Moving Bed Biofilm Reactor/Solids Contact Reaeration Process for Secondary Treatment of Municipal Wastewater. **Water Environment Research**, Alexandria, v. 70, n. 5, p. 1083-1089, jul. 1998. Published by: Wiley.

SAADY, Noori M. Cata. Utilizing settling tests to design a conventional upflow settling tank modified with inclined plates. **Water Science And Technology**, London, v. 66, n. 4, p. 858-864, 1 ago. 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.2166/wst.2012.260>.

SAIDULU, Duduku; MAJUMDER, Abhradeep; GUPTA, Ashok Kumar. A systematic review of moving bed biofilm reactor, membrane bioreactor, and moving bed membrane bioreactor for wastewater treatment: comparison of research trends, removal mechanisms, and performance. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, Amsterdam, v. 9, n. 5, p. 106112, out. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jece.2021.106112>.

SAIDULU, Duduku; SRIVASTAVA, Ashish; GUPTA, Ashok Kumar. Enhancement of wastewater treatment performance using 3D printed structures: a major focus on material composition, performance, challenges, and sustainable assessment. **Journal of Environmental Management**, Amsterdam, v. 306, p. 114461, mar. 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114461>.

SANTOS, Andreia D.; MARTINS, Rui C.; QUINTA-FERREIRA, Rosa M.; CASTRO, Luis M. Moving bed biofilm reactor (MBBR) for dairy wastewater treatment. **Energy Reports**, Amsterdam, v. 6, p. 340-344, dez. 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egy.2020.11.158>.

SASIDHARAN, Salini; BRADFORD, Scott A.; HMĎNEK, Jiří; KRAEMER, Stephen R. Comparison of recharge from drywells and infiltration basins: a modeling study. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 594, p. 125720, mar. 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125720>.

SCHLEISS, Anton J.; FRANCA, Mário J.; JUEZ, Carmelo; CESARE, Giovanni de. Reservoir sedimentation. **Journal of Hydraulic Research**, Abingdon, v. 54, n. 6, p. 595-614, 20 set. 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/00221686.2016.1225320>.

SEWAK, Ravindra; BENA, Dan; SEWAK, Poonam; MAHAJAN, Shveta. Ground-tested principles of designing a robust drinking water treatment system. **Water Security**, [s. l.], v. 14, p. 100103, dez. 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasec.2021.100103>.

SHARMA, Manisha; MOHAPATRA, Titikshya; GHOSH, Prabir. Hydrodynamics, mass and heat transfer study for emerging heterogeneous Fenton process in multiphase fluidized-bed reactor system for wastewater treatment: A review. **Chemical Engineering Research and Design**, London, v. 171, p. 48-62, jul. 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cherd.2021.04.019>.

SILVA, Daniel C.V.R.; QUEIROZ, Lucas G.; MARASSI, Rodrigo J.; ARAÚJO, Cristiano V.M.; BAZZAN, Thiago; CARDOSO-SILVA, Sheila; SILVA, Gilmar C.; MÜLLER, M.; SILVA, Flávio T.; MONTAGNER, Cassiana C.. Predicting zebrafish spatial avoidance triggered by discharges of dairy wastewater: an experimental approach based on self-purification in a model river. **Environmental Pollution**, Oxford, v. 266, p. 115325-115325, nov. 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115325>.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. **Painel Informações de Saneamento no Brasil**. Brasília, DF: Secretaria Nacional de Saneamento, 2019. Disponível em: <http://snis.gov.br/painel-informacoes-saneamento-brasil/web/painel-setor-saneamento>. Acesso em: 25 fev. 2021.

SOTELO, Tiffany Joan; SATOH, Hiroyasu. Enhanced sewer self-purification with porous media: performance evaluation with various organic loading rates and flow intermittency. **Biochemical Engineering Journal**, Amsterdam, v. 168, p. 107932-107932, abr. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.bej.2021.107932>.

STEWART, Kenton M. Physical Properties of Water. **Encyclopedia of Inland Waters**, [s. l.], p. 148-154, 2009. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-012370626-3.00007-7>.

TANG, Kuok Ho Daniel; HADIBARATA, Tony. Microplastics removal through water treatment plants: Its feasibility, efficiency, future prospects and enhancement by proper waste management. **Environmental Challenges**, [s. l.], v. 5, p. 100264-100264, dez. 2021.

TANKERSLEY, Kenneth Barnett; DUNNING, Nicholas P.; CARR, Christopher; LENTZ, David L.; SCARBOROUGH, Vernon L. Zeolite water purification at Tikal, an ancient Maya city in Guatemala. **Scientific Reports**, London, v. 10, n. 1, p. 18021-18021, 22 out. 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.1038/s41598-020-75023-7>.

TARPAGKOU, Roza; PANTOKRATORAS, Asterios. The influence of lamellar settler in sedimentation tanks for potable water treatment: a computational fluid dynamic study. **Powder Technology**, Amsterdam, v. 268, p. 139-149, dez. 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2014.08.030>.

TCHOBANOGLIOUS, George. Environmental Engineering Forum. **Journal of Environmental Engineering**, Amsterdam, v. 121, n. 12, p. 844-845, dez. 1995. DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9372\(1995\)121:12\(844\)](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)0733-9372(1995)121:12(844)).

TITCHOU, Fatima Ezzahra; ZAZOU, Hicham; AFANGA, Hanane; GAAYDA, Jamila El; AKBOUR, Rachid Ait; HAMDANI, Mohamed. Removal of Persistent Organic Pollutants (POPs) from water and wastewater by adsorption and electrocoagulation process. **Groundwater For Sustainable Development**, Amsterdam, v. 13, p. 100575, maio 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.gsd.2021.100575>.

UNITED NATIONS CHILDREN'S FUND. **Progress on household drinking water, sanitation and hygiene 2000-2017**. Special focus on inequalities. New York: United Nations Children's Fund (UNICEF) and World Health Organization, 2019.

VIANNA, Marcos Rocha. **Hidráulica aplicada às estações de tratamento de água**. 5. ed. Nova Lima: Imprimatur, 2014. 618 p.

VON SPERLING, Marcos, **Introdução a qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**, 4a edição, Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, 2014.

WANG, C.; PARLANGE, J.-Y.; SCHNEIDER, R.L.; RASMUSSEN, E.W.; WANG, X.; CHEN, M.; DAHLKE, H.e.; TRUHLAR, A.M.; WALTER, M.T.. Release of Escherichia coli under raindrop impact: the role of clay. **Advances in Water Resources**, Oxford, v. 111, p. 1-5, jan. 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.advwatres.2017.10.028>.

WANG, Jing; YING, Xianbin; HUANG, Yonghao; CHEN, Yuqi; SHEN, Dongsheng; ZHANG, Xiang; FENG, Hua Jun. Numerical study of hydrodynamic characteristics in a moving bed biofilm reactor. **Environmental Research**, Maryland Heights, v. 194, p. 110614, mar. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envres.2020.110614>.

WANG, Rong-Chang; WEN, Xiang-Hua; QIAN, Yi. Influence of carrier concentration on the performance and microbial characteristics of a suspended carrier biofilm reactor. **Process Biochemistry**, London, v. 40, n. 9, p. 2992-3001, set. 2005. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.procbio.2005.02.024>.

WON, Jongmuk; KIM, Taehyeong; KANG, Minkyu; CHOE, Yongjoon; CHOI, Hangseok. Kaolinite and illite colloid transport in saturated porous media. **Colloids And Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, Amsterdam, v. 626, p. 127052, out. 2021. DOI: [//dx.doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.127052](http://dx.doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.127052).

WORD HEALTH ORGANIZATION. **Water, sanitation, hygiene and health: a primer for health professionals**. Geneva: WHO, 2019. 31 p.

YEHUDA, Tal; KALMAN, Haim. Geldart classification for wet particles. **Powder Technology**, Amsterdam, v. 362, p. 288-300, fev. 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2019.11.073>.

ZBIK, Marek S.; SMART, Roger St.C.; MORRIS, Gayle E. Kaolinite flocculation structure. **Journal of Colloid and Interface Science**, Philadelphia, v. 328, n. 1, p. 73-80, dez. 2008. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcis.2008.08.063>.