

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL**

**RAFAEL CURY SADOCK DE FREITAS**

**TRATAMENTO DE EFLUENTES ORIUNDOS DA LAVAGEM DE VEÍCULOS**  
**DE COLETA DE RESÍDUOS SÓLIDOS**

**Rio de Janeiro – RJ**

**Fevereiro de 2013**

**RAFAEL CURY SADOCK DE FREITAS**

**TRATAMENTO DE EFLUENTES ORIUNDOS DA LAVAGEM DE VEÍCULOS  
DE COLETA DE RESÍDUOS SÓLIDOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação  
em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do  
Rio de Janeiro como requisito parcial à obtenção do  
título de Mestre em Engenharia Ambiental

Orientador:

Magali Christe Cammarota, D.Sc.

Rio de Janeiro – RJ

Fevereiro de 2013

Cury Sadock de Freitas, Rafael

Tratamento de Efluentes Oriundos da Lavagem de Veículos de Coleta de Resíduos Sólidos. Rafael Cury Sadock de Freitas. 2013.  
f.: il 72

Dissertação de mestrado - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica e Escola de Química, Programa de Engenharia Ambiental, Rio de Janeiro, 2013.

Orientador: Magali Christe Cammarota

1. Resíduos sólidos urbanos. 2. Coleta. 3. Caminhões compactadores. 4. Limpeza. 5. Tratamento. 6. Reuso. I. Cammarota. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Escola Politécnica e Escola de Química. III. Tratamento de Efluentes Oriundos da Lavagem de Veículos de Coleta de Resíduos Sólidos.

**RAFAEL CURY SADOCK DE FREITAS**

**TRATAMENTO DE EFLUENTES ORIUNDOS DA LAVAGEM DE VEÍCULOS  
DE COLETA DE RESÍDUOS SÓLIDOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação  
em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do  
Rio de Janeiro como requisito parcial à obtenção do  
título de Mestre em Engenharia Ambiental

Banca Examinadora:

\_\_\_\_\_  
Profa. Magali Christe Cammarota, D.Sc.  
(orientadora)

\_\_\_\_\_  
Prof. \_\_\_\_\_, D.Sc.

\_\_\_\_\_  
Prof. \_\_\_\_\_, D. Sc.

\_\_\_\_\_  
Prof. \_\_\_\_\_, D.Sc.

\_\_\_\_\_  
Prof. \_\_\_\_\_, D.Sc.

Rio de Janeiro – RJ

Fevereiro de 2013

**“Você faz aquilo que pode enquanto puder;  
e quando finalmente não puder,  
faz a próxima coisa possível.**

**Você retrocede, mas não desiste!”**

**(Chuck Yeager)**

## **AGRADECIMENTOS**

“Há tempo de nascer e tempo de morrer; tempo de plantar e de colher;” ... “Há tempo de ficar triste e tempo de se alegrar; tempo de chorar e tempo de dançar;” (Ec 3:2, 4).

À Deus por ter iluminado o meu caminho e meus pensamentos ao longo de minha vida. Por ter chegado o tempo de colher, de se alegrar e de dançar por mais uma vitória.

À professora Magali Christe Cammarota pela orientação, atenção, paciência, dedicação, confiança e por todas as contribuições durante esse estudo. Uma professora brilhante.

Aos funcionários do Laboratório de Tecnologia Ambiental (LTA) pelo apoio. Em especial à técnica Suzana Oliveira pela execução das leituras dos parâmetros analisados neste estudo.

À minha melhor amiga e esposa por todo seu incentivo, paciência e compreensão, principalmente, nos momentos da escrita dessa dissertação. Uma mulher fantástica e dedicada.

À minha filha pelos momentos de distração e “descanso”. Um verdadeiro anjo que chegou para ser o centro das atenções. É impossível não amá-la. Um verdadeiro presente divino.

À toda minha família pela presença e apoio em todos os momentos, além das orações e do carinho. Cada um teve sua participação especial: meus pais - exemplo de criação e paternidade/maternidade; minhas irmãs - exemplo de companheirismo; minha avó: exemplo de vida; minhas tias e tios: exemplo de vida e caráter; meus primos e primas - exemplo de amizade.

À empresa pela liberação para assistir as aulas e realizar os experimentos e pelo fornecimento das amostras de efluentes e produtos químicos utilizados.

Aos amigos e colaboradores do setor de Engenharia da empresa pela ajuda nas coletas dos efluentes, cobertura nos dias de liberação durante o período dedicado ao mestrado e pelos momentos de diversão.

## RESUMO

CURY, Rafael Sadock de Freitas. Tratamento de efluentes oriundos da lavagem de veículos oriundos da coleta de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Escola Politécnica/Escola de Química - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

Entre a coleta dos resíduos sólidos urbanos e os processos de compactação e transporte decorrem mais de 24 horas, tempo suficiente para que se inicie o processo de biodegradação dos resíduos, havendo liberação de água contaminada. Este líquido acumula nos veículos, durante o transporte, sendo descarregado nas estações de transbordo e/ou nos aterros sanitários. No entanto, parte dos resíduos e do líquido permanece nos caminhões compactadores, que precisam ser limpos periodicamente. A higienização dos caminhões requer de 400 a 500 L de água limpa por veículo, gerando um efluente com características similares às do lixiviado liberado nos aterros sanitários e elevado potencial poluidor. Na empresa de coleta e transporte de resíduos sólidos selecionada para este estudo, a Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) consiste em um tanque de equalização, seguido de gradeamento, caixa de areia, separador água-óleo, tratamento físico-químico (coagulação/floculação) e desinfecção com hipoclorito de sódio. Em função da elevada quantidade de produtos químicos e do custo envolvido no tratamento do efluente gerado na lavagem dos caminhões, o objetivo deste estudo foi avaliar a possibilidade de redução da quantidade de produtos químicos e do tempo de tratamento, sem redução da eficiência. Verificou-se que a redução dos tempos de mistura (de 15 para 5 min a 120 rpm) e sedimentação (de 5 para 1h), assim como das concentrações de coagulante (de 250 para 150 mg/L) e floculante (de 24 para 12 mg/L), contribuíram para menores custos mensais de operação da ETE (redução de R\$ 48.771,90 para R\$ 30.106,80) e menor quantidade de produtos químicos descartados no meio ambiente, sem perda da eficiência de remoção de turbidez, DBO<sub>5</sub> e DQO, o que possibilitou o reuso do efluente para nova lavagem dos veículos. Os resultados também foram empregados para se obter uma relação entre uma característica do efluente bruto (DQO) e a concentração de coagulante necessária para se atingir o padrão de descarte (200 mg/L), de forma a tornar o processo mais econômico.

Palavras-chave: Resíduos sólidos urbanos; Coleta; Caminhões compactadores; Lavagem; Tratamento; Reuso.

### ABSTRACT

CURY, Rafael Sadock de Freitas. Treatment of wastewater from washing of vehicles from the collection of solid waste. Rio de Janeiro, 2013. Dissertation (M.Sc. in Environmental Engineering). Polytechnic School and School of Chemistry. Federal University of Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

From collection, truck compression and crushing, the urban garbage takes more than 24 hours to be disposed, time enough to start biodegradation process and contaminated liquid release. Such liquid is readily accumulated inside the garbage trucks and then, disposed on transfer stations or landfill. However, remains of the residues and liquids on trucks must be cleared out from time to time. A total amount of 400 to 500L of clean water is required to the trucks 'sanitization, producing an effluent with the same characteristics of the pollutant leachate produced on landfills and high pollution potential. In the effluent treatment station of the company selected to this study, there is a equalization tank, followed by grit, sandbox, box of water and oil separator, physical-chemical treatment (coagulation / flocculation) and disinfection with sodium hypochlorite. Taking account the high amount of chemical products and cost of the trucks sanitization, we aim to evaluate a possible reduction of time and chemical products amount without loss of efficiency. It was observed that the reduction of the mixing time (from 15 to 5 min at 120 rpm) and sedimentation (from 5 to 1 h), as well as the coagulant (from 250 to 150 mg/L) and flocculant (from 24 to 12mg/mL) contributed to monthly savings (reduction from R\$ 48.771,90 to R\$ 30.106,80). Additionally, fewer amounts of chemicals disposed on the environment, without loss of efficiency on turbidity, OBD and ODQ reduction, allowing the water reuse on the new trucks sanitization. Such results were also employed to augment the process efficiency, obtaining the ratio of the concentration of the coagulant and the ODQ to obtain the standard discard pattern (200 mg/mL), in order to make the process more economical

Keywords: Urban solid waste; Garbage collection; Garbage compacter trucks; Wash; Reuse.



## LISTA DE FIGURAS

- Figura 2.1 – Comparação entre os anos 2010 e 2011 na geração de RSD total e per capita no Brasil. Fontes: ABRELPE (2010, 2011) e IBGE (2011).....5
- Figura 2.2 – (A) Gradeamento e (B) caixa de retenção de sólidos grosseiros da ETE em estudo.....25
- Figura 2.3 – (C) Caixas separadoras de óleos e graxas, (D) Calha Parshall, (E) Tanque de coagulação, (F) Tanque de floculação e (G) Tanque de sedimentação da ETE em estudo.....26
- Figura 2.4 – Esquema da Estação de Tratamento de Efluentes da Empresa objeto deste estudo.....28
- Figura 4.1 – (A) Efluente bruto; (B) Início da coagulação/floculação (Jar Test).....44
- Figura 4.2 – (A) Início da sedimentação; (B) Final da Sedimentação; (C) Efluente tratado.....44
- Figura 4.3 – Correlação entre DQO final e concentração de coagulante.....49
- Figura 4.4 – Correlação entre DQO inicial e final para concentrações de coagulante de 100, 150 e 200 mg/L.....49

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 2.1 – Quantidade de RSD gerados por região no Brasil.<br>Fonte: ABRELPE (2010, 2011).....   | 6  |
| Tabela 2.2 – Quantidade de RSD gerados no Estado do Rio de Janeiro.<br>Fonte: ABRELPE (2010, 2011).....  | 6  |
| Tabela 2.3 – Características do lixiviado gerado em diferentes idades de decomposição dos resíduos. Fonte: Farquhar (1989); Birks e Eyles (1997).....    | 8  |
| Tabela 2.4 – Variação da composição química de lixiviados de diferentes aterros sanitários.....  | 9  |
| Tabela 2.5 – Variação de pH, DQO e DBO <sub>5</sub> em lixiviados gerados em aterros com diferentes idades.....  | 10 |
| Tabela 2.6 – Capacidade das ETE da CEDAE com o fornecimento de água de reuso. Fonte: adaptado de Colella (2006) e Lorenzi (2008).....                    | 13 |
| Tabela 2.7 – Relação DBO/DQO no tanque de equalização. Fonte: Fonseca (2006).....  | 22 |
| Tabela 2.8 – Eficiência de redução de DQO após o tratamento físico-químico e biológico. Fonte: Fonseca (2006).....                                       | 23 |
| Tabela 4.1 – Caracterização das águas de lavagem dos veículos de coleta e transporte de resíduos sólidos domiciliares.....                               | 37 |
| Tabela 4.2 – Variação dos tempos de coagulação (120 rpm) e floculação (40 rpm) com 250 mg FeCl <sub>3</sub> /L, 24 mg PAC /L e pH 7.....                 | 39 |
| Tabela 4.3 – Variação do pH com 250 mg FeCl <sub>3</sub> /L (120 rpm, 5 min), 24 mg PAC / L (40 rpm, 60 min) e tempo de sedimentação de 1 h.....         | 40 |
| Tabela 4.4 – Variação da concentração de coagulante (120 rpm, 5 min) com 24 mg PAC / L (40 rpm, 60 min), pH 7 e tempo de sedimentação de 1h.....         | 41 |
| Tabela 4.5 – Variação da concentração de PAC (40 rpm, 60 min) com 150 mg FeCl <sub>3</sub> /L (120 rpm, 5 min), pH 7 e tempo de sedimentação de 1 h..... | 43 |
| Tabela 4.6 – Consumo e custo de produtos químicos e energia em cada batelada de 9.000 L na ETE nas condições da empresa e indicadas neste estudo...46    | 46 |

|  |    |
|--|----|
| Tabela 4.7 – Correlação entre diferentes concentrações de cloreto férrico e DQO..... | 48 |
|--|----|

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|          |   |
|----------|---|
| ABNT     | Associação Brasileira de Normas Técnicas                                  |
| ABRELPE  | Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais |
| CEDAE    | Companhia Estadual de Águas e Esgotos                                     |
| CNRH     | Conselho Nacional de Recursos Hídricos                                    |
| CONAMA   | Conselho Nacional do Meio Ambiente  |
| COT      | Carbono Orgânico Total  |
| CTR      | Central de Tratamento de Resíduos   |
| DBO      | Demanda Bioquímica de Oxigênio  |
| dil      | Diluição da Amostra   |
| DP       | Desvio Padrão   |
| DQO      | Demanda Química de Oxigênio   |
| ETE      | Estação de Tratamento de Efluentes  |
| FEEMA    | Fundação Estadual de Engenharia e Meio Ambiente                           |
| IBGE     | Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística                           |
| INEA     | Instituto Estadual do Ambiente  |
| LO       | Licença de Operação   |
| MBAS     | Surfactantes Reativos ao Azul de Metileno                                 |
| NKT      | Nitrogênio Kjeldahl Total   |
| NT       | Nitrogênio Total  |
| O&G      | Óleos e Graxas  |
| OD       | Oxigênio Dissolvido   |
| PAC      | Policloreto de Alumínio   |
| PEAD     | Polietileno de Alta Densidade   |
| pH       | Potencial Hidrogeniônico  |
| PNRS     | Política Nacional de Resíduos Sólidos                                     |
| PROSAB   | Programa de Saneamento Básico, do Governo Federal                         |
| PVC      | Cloreto de Polivinila   |
| RNFT     | Resíduos Não filtráveis Totais  |
| RSD      | Resíduo Sólido Domiciliar   |
| SAO      | Separador Água/Óleo   |
| SDT      | Sólidos Dissolvidos Totais  |
| SLAP     | Sistema de Licenciamento de Atividades Poluidoras                         |
| SS       | Sólidos Sedimentáveis   |
| SST      | Sólidos Suspensos Totais  |
| TC       | Tempo de Coagulação   |
| TF       | Tempo de Floculação   |
| $\alpha$ | Coeficiente Angular da Curva-padrão                                       |

## SUMÁRIO

|   |      |
|---|------|
| <b>RESUMO</b> .....   | vii  |
| <b>ABSTRACT</b> .....   | viii |
| <b>LISTA DE FIGURAS</b> .....   | ix   |
| <b>LISTA DE TABELAS</b> .....   | x    |
| <b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS</b> .....   | xi   |
| <b>1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS</b> .....  | 1    |
| 1.1. Introdução .....   | 1    |
| 1.2. Objetivos .....  | 4    |
| <b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....   | 5    |
| 2.1. Resíduos Sólidos Domiciliares .....  | 5    |
| 2.2. Efluente Gerado na Lavagem dos Caminhões de Coleta e<br>Transporte de RSD.....             | 7    |
| 2.3. Tratamento Efluente Gerado na Lavagem dos Caminhões de Coleta<br>e Transporte de RSD ..... | 11   |
| 2.3.1. Reuso de água: definições e histórico.....   | 12   |
| 2.3.2. Legislação pertinente ao controle de efluentes líquidos.....                             | 14   |
| 2.3.3. Operações unitárias de tratamento de efluentes.....                                      | 15   |
| 2.3.4. O processo de Coagulação/Floculação.....   | 16   |
| 2.3.5. Tratamento de efluentes da lavagem de caminhões de coleta<br>e transporte de RSD.....    | 21   |
| 2.4. A Estação de Tratamento de Efluentes Estudada .....  | 25   |
| <b>3. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....   | 29   |
| 3.1. Funcionamento da Frota de Caminhões de Coleta e Transporte de RSD.....                     | 29   |
| 3.2. Amostragem e Caracterização da Água de Lavagem dos Caminhões.....                          | 29   |
| 3.3. Tratamento Físico-Químico da Água de Lavagem dos Caminhões.....                            | 30   |
| 3.3.1. Avaliação dos tempos de coagulação/floculação e sedimentação.....                        | 31   |
| 3.3.2. Avaliação do pH.....   | 31   |
| 3.3.3. Avaliação da concentração de coagulante e floculante.....                                | 31   |
| 3.4. Análise de Custos.....   | 31   |
| 3.5. Correlação entre DQO e Quantidade de FeCl <sub>3</sub> .....                               | 32   |
| 3.6. Métodos Analíticos.....  | 32   |
| 3.6.1. Potencial Hidrogeniônico (pH).....   | 32   |

|   |           |
|---|-----------|
| 3.6.2. Temperatura.....   | 33        |
| 3.6.3. Cor.....   | 33        |
| 3.6.4. Demanda Química de Oxigênio.....   | 33        |
| 3.6.5. Demanda Bioquímica de Oxigênio.....  | 34        |
| 3.6.6. Óleos e Graxas.....  | 35        |
| 3.6.7. Sólidos Sedimentáveis.....   | 36        |
| 3.6.8. Resíduos Não Filtráveis Totais.....  | 36        |
| 3.6.9. Turbidez.....  | 36        |
| <b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>   | <b>37</b> |
| 4.1. Caracterização do Efluente Oriundo da Lavagem dos Caminhões de Coleta e Transporte de RSD..... | 37        |
| 4.2. Tratamento Físico-Químico das Águas de Lavagem.....  | 38        |
| 4.2.1. Avaliação dos tempos de coagulação/floculação e sedimentação.....                            | 38        |
| 4.2.2. Avaliação do pH.....   | 40        |
| 4.2.3. Avaliação das concentrações de coagulante e floculante.....                                  | 41        |
| 4.3. Análise de Custos.....   | 45        |
| 4.4. Correlação entre DQO e Quantidade de FeCl <sub>3</sub> .....                                   | 46        |
| <b>5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....</b>   | <b>51</b> |
| 5.1. Conclusões.....  | 51        |
| 5.2. Sugestões.....   | 51        |
| <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>  | <b>52</b> |

## 1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

### 1.1. INTRODUÇÃO

O Brasil possui 12% de toda a água doce superficial do mundo e paradoxalmente não atende o abastecimento da mesma em várias regiões. Como é de conhecimento público, a distribuição desigual das fontes de água no planeta é a maior causa de sua escassez. A escassez de água com um padrão mínimo de qualidade vem aumentando cada vez mais, devido ao lançamento das águas consumidas, sem tratamento, diretamente nos rios e oceanos. A quantidade total de água líquida no mundo é praticamente constante. O problema é a oferta de água potável, que a cada dia diminui mais, enquanto que a demanda cresce, devido ao crescimento populacional (Fonseca, 2006).

Segundo Nogueira e Ávila (2011), o fornecimento de água para a Região Metropolitana do Rio de Janeiro é feito principalmente através do sistema Guandu (45,0 m<sup>3</sup>/s). As outorgas de uso da água, já concedidas, superam a disponibilidade hídrica deste rio. O crescimento populacional e os períodos de seca tornam real a possibilidade de desabastecimento de água na região, e o emprego de novos corpos hídricos esbarra em questões sócio-ambientais. O trabalho Balanço Hídrico da Bacia Hidrográfica do rio Guandu com as Novas Demandas por Água (Coelho, 2010) mostra um saldo hídrico negativo de 16 m<sup>3</sup>/s.

Diante deste quadro é primordial que quaisquer atividades geradoras de resíduos que possam contaminar os corpos hídricos, especialmente os que permeiam grandes centros urbanos, precisam ser rigorosamente controladas pelos órgãos ambientais com relação ao tratamento e descarte destes resíduos. Dentre estas atividades está a coleta de resíduos sólidos domiciliares (RSD), essencial para a manutenção das cidades.

Os RSD são considerados um dos maiores problemas ambientais do planeta, junto com o desmatamento, aquecimento global e escassez de água. A geração de resíduos sólidos faz parte do cotidiano da humanidade, já que o modo de vida,

atualmente, está baseado na produção e no consumo cada vez mais rápidos de bens (SANTOS, 2008).

As atividades de coleta e transporte de RSD, em geral, são conduzidas com caminhões compactadores, que proporcionam maior economia de combustível e espaço de armazenamento, na medida em que podem transportar uma quantidade maior de resíduos. Entre a coleta dos resíduos e os processos de compactação e transporte decorrem mais de 24 horas, tempo suficiente para que se inicie o processo de biodegradação dos resíduos, havendo liberação de água já contaminada (GIORDANO, 2003). Este líquido vai acumulando durante o transporte nos veículos, sendo descarregado, juntamente com os resíduos, nas estações de transbordo e/ou nos aterros sanitários.

No entanto, partes dos resíduos e do líquido permanecem nos caminhões compactadores, que precisam ser higienizados periodicamente. Na empresa de coleta e transporte de resíduos domiciliares selecionada para este estudo, a higienização dos caminhões requer de 400 a 500 L de água limpa por veículo, gerando um efluente com características similares às do lixiviado gerado em aterros sanitários.

Este efluente apresenta altas concentrações de matéria orgânica (DQO) e sólidos suspensos totais (SST) e baixa razão  $DBO_5/DQO$ , podendo-se deduzir que a matéria orgânica se encontra em sua maioria na forma particulada, o que justifica um tratamento por coagulação/floculação.

Comparando-se os dados de caracterização do efluente com os de diferentes lixiviados encontrados na literatura, podem-se ressaltar algumas similaridades: com poucas exceções, o pH dos lixiviados varia de 5,5 a 8,0; grande parte dos sólidos suspensos são voláteis; as relações  $DBO_5/DQO$  são baixas, especialmente em lixiviados de aterros antigos (LEMA et al., 1988; LISK, 1991; CAMMAROTA et al., 1994). No entanto, diferentemente do lixiviado resultante de um processo de biodegradação avançada nos aterros, o efluente gerado na lavagem dos veículos de coleta constitui um material ainda não submetido a uma biodegradação mais intensa. Daí, os maiores teores de sólidos suspensos,  $DBO_5$  e DQO e o pH ainda próximo da neutralidade (MORAIS et al., 2006; CARVALHO et al., 2006).



Assim, os efluentes gerados nas garagens de veículos de coleta de resíduos sólidos possuem um elevado potencial poluidor, havendo necessidade de um tratamento adequado antes de seu descarte no ambiente. Vale ressaltar que a literatura relacionada ao tratamento de efluentes gerados na lavagem de caminhões de resíduos sólidos é escassa.

Na empresa de coleta e transporte de resíduos sólidos domiciliares selecionada para este estudo, a Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) consiste em um tanque de equalização, seguido de gradeamento e caixa de areia, para retenção de sólidos grosseiros e para evitar depósitos indesejáveis nos compartimentos posteriores de tratamento, principalmente nas bombas da ETE. Em seguida, o efluente é direcionado para um separador água-óleo (SAO), no qual os óleos e graxas são separados por diferença de densidade. O líquido livre de óleos e graxas segue para um tratamento físico-químico (coagulação/floculação) e, após sedimentação dos flocos formados, o líquido clarificado é encaminhado para um tanque de armazenagem, onde recebe a adição de hipoclorito de sódio ( $\text{NaClO}$ ) para evitar o crescimento de micro-organismos.

Caso o efluente tratado apresente características que atendam ao estabelecido pelo órgão ambiental local, este pode ser descartado no ambiente ou utilizado como água de reuso para lavagem da frota de caminhões de coleta e transporte de RSD, enquanto os sólidos separados no tratamento são enviados para uma Central de Tratamento de Resíduos (empresa privada) ou para uma empresa pública de saneamento.

No sistema a ser estudado, o efluente passa por um tratamento físico-químico que emprega uma elevada quantidade de produtos químicos, independente das características apresentadas pelo efluente. Assim, a possibilidade de reduzir a quantidade de produtos químicos, relacionando alguma característica apresentada pelo efluente bruto com a quantidade necessária de produtos, seria interessante sob vários aspectos: ambiental – reduzindo a quantidade de produtos transportados, estocados e descartados no ambiente; técnico – otimizando a operação de tratamento, sem redução da eficiência; e econômico – reduzindo custos com produtos químicos e energia, ao reduzir dosagens e tempos de tratamento.

## 1.2. OBJETIVOS

O objetivo principal deste estudo foi avaliar a possibilidade de redução da quantidade de produtos químicos e tempos de coagulação/floculação/sedimentação empregados no tratamento da água de lavagem de caminhões coletores de resíduos sólidos domiciliares, sem perda da eficiência, a fim de reduzir custos de tratamento e o uso e descarte de produtos químicos no meio ambiente.

Para tal, os seguintes objetivos específicos foram delineados:

- coletar e caracterizar as águas residuárias geradas na lavagem dos caminhões coletores de resíduos sólidos domiciliares;
- realizar ensaios de coagulação/floculação da água de lavagem, em escala de bancada, sob diferentes concentrações de coagulante e floculante, assim como diferentes valores de pH e tempos de coagulação/floculação/sedimentação;
- analisar a eficiência do tratamento sob as novas condições e a qualidade do efluente final tratado, em conformidade com os parâmetros estabelecidos na NT 202 R10 (INEA);
- avaliar os custos com produtos químicos e energia antes e após as modificações propostas no tratamento da água de lavagem;
- obter uma relação entre uma característica representativa do efluente bruto e a quantidade necessária de produtos químicos para se atingir o padrão de descarte de forma mais econômica.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. RESÍDUOS SÓLIDOS DOMICILIARES

De acordo com a definição da Lei Federal nº 12.305/10 (Política Nacional de Resíduos Sólidos - PNRS), resíduos sólidos domiciliares (RSD) são resíduos originários de atividades domésticas em residências urbanas que podem ser materiais, substâncias, objetos ou bens descartados, resultantes de atividades humanas em sociedade, cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnicas ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível.

Segundo dados da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2011), a geração de RSD, no Brasil, registrou crescimento de 1,8%, de 2010 para 2011, índice percentual que é superior à taxa de crescimento populacional urbano do país, que foi de 0,9% no mesmo período (IBGE, 2011), conforme demonstram os dados apresentados na Figura 2.1.

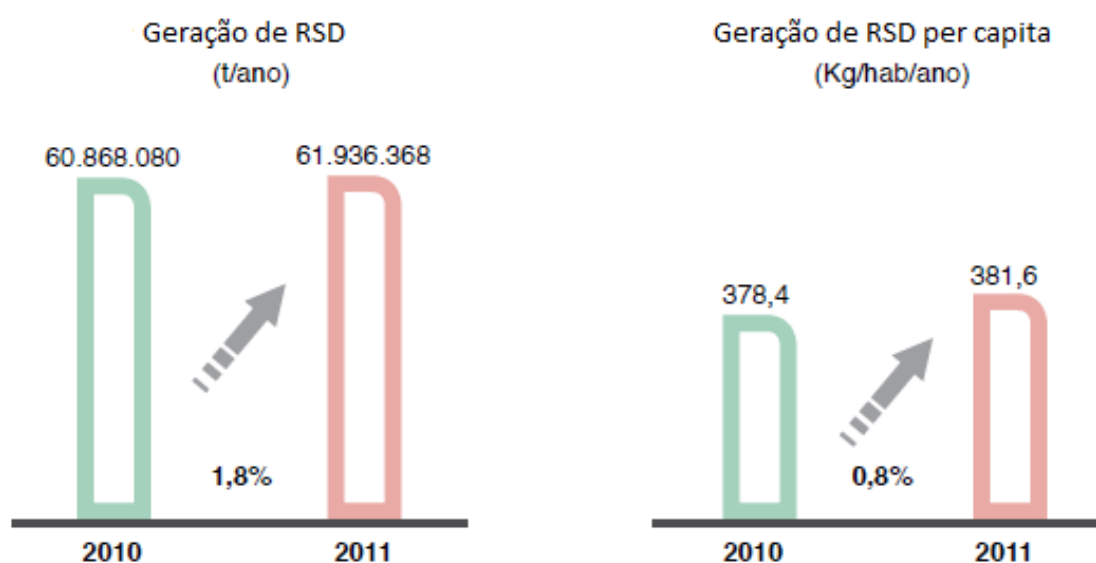


Figura 2.1 – Comparação entre os anos 2010 e 2011 na geração de RSD total e per capita no Brasil. Fontes: ABRELPE (2010, 2011) e IBGE (2011).

Ainda segundo a ABRELPE, a quantidade de RSD gerados em 2011 cresceu em todas as regiões, em comparação aos dados de 2010 (ABRELPE, 2011). A região Sudeste continua respondendo por mais de 50% dos RSD gerados e apresenta o maior percentual de cobertura dos serviços de coleta no país, conforme a Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Quantidade de RSD gerados por região no Brasil.

Fonte: ABRELPE (2010, 2011).

| Região        | 2010              | 2011                                      |  |
|---------------|-------------------|---|--|
|               | RSD Total (t/dia) | Equação                                   |  |
| Norte         | 10.623            | RSD = 0,000293 (pop urb /1000) + 0,801841 |  |
| Nordeste      | 38.118            | RSD = 0,000214(pop urb /1000) + 0,875800  |  |
| Centro-Oeste  | 13.967            | RSD = 0,000266 (pop urb /1000) + 0,938780 |  |
| Sudeste       | 92.167            | RSD = 0,000155 (pop urb /1000) + 0,862273 |  |
| Sul           | 18.708            | RSD = 0,000306(pop urb /1000) + 0,716148  |  |
| <b>BRASIL</b> | <b>173.583</b>    |   |  |
|               |                   | <b>177.995</b>                            |  |

O Estado do Rio de Janeiro registrou um crescimento de 2,2% na geração de RSD (t/dia), de 2010 para 2011, conforme demonstrado na Tabela 2.2, índice percentual semelhante ao Nacional, registrado em 2,5%.

Tabela 2.2 – Quantidade de RSD gerados no Estado do Rio de Janeiro.

Fonte: ABRELPE (2010, 2011).

| População Urbana |            | RSD Coletado |       |         |        | RSD Gerado (t/dia) |        |
|------------------|------------|--------------|-------|---------|--------|--------------------|--------|
|                  |            | (kg/hab/dia) |       | (t/dia) |        |                    |        |
| 2010             | 2011       | 2010         | 2011  | 2010    | 2011   | 2010               | 2011   |
| 15.466.996       | 15.580.702 | 1,295        | 1,303 | 20.024  | 20.305 | 20.465             | 20.913 |

No município de Duque de Caxias / RJ, onde se localiza a garagem da empresa com a ETE que higieniza toda a frota dos veículos de coleta e transporte de RSD, objeto do presente estudo, verificou-se um aumento de 10% na geração de RSD. No ano de 2010, o município gerou 824,5 t/dia de RSD, enquanto que em 2011 a geração foi de 907,0 t/dia (ABRELPE (2010, 2011)).

O Município de Duque de Caxias possui quarenta bairros e está dividido, administrativamente, em quatro distritos: 1º distrito – Centro; 2º distrito – Campos Elíseos; 3º distrito – Imbariê; 4º distrito – Xerém. A coleta e o transporte de RSD, nos quatro distritos, são realizados diariamente, divididos em três turnos. Para atender todos os bairros no município, são realizadas escalas ao longo da semana. Existem bairros onde a coleta e o transporte de RSD são realizados segundas-feiras, quartas-feiras e sextas-feiras, e outros onde esses serviços são realizados terças-feiras, quintas-feiras e sábados. Em bairros de maior movimentação comercial e não residencial, os serviços de coleta e transporte de RSD são realizados diariamente, em horários alternativos para evitar o congestionamento na região.

A coleta e o transporte de RSD são realizados em caminhões compactadores tocos ou trucados, os quais podem transportar de 8 até 21 toneladas de RSD por viagem, dependendo do modelo e tamanho dos caminhões.

## **2.2. EFLUENTE GERADO NA LAVAGEM DOS CAMINHÕES DE COLETA E TRANSPORTE DE RSD**

O efluente resultante da lavagem de caminhões de coleta de resíduos sólidos domiciliares contém, basicamente, altas concentrações de matéria orgânica. A definição deste efluente não é muito clara e, segundo a literatura, os efluentes com características mais próximas são o do lixiviado de aterros novos, chegando a valores de DBO entre 2750 e 20287 mg/L (Al-Jayyousi, 2003).

Por não haver, na literatura pesquisada, dados de caracterização dos efluentes gerados na lavagem de caminhões de coleta e transporte de resíduos sólidos domiciliares, será feito um comparativo de suas características com as de lixiviados gerados em diversos tipos de aterros de disposição destes resíduos.

Para tal comparativo, foi selecionado o lixiviado de aterros novos, pois apresentam caracterização semelhante às do efluente estudado, conforme demonstrado na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Características do lixiviado gerado em diferentes idades de decomposição dos resíduos. Fonte: Farquhar (1989); Birks e Eyles (1997).

| Parâmetro  | Idade do resíduo |             |              |
|------------|------------------|-------------|--------------|
|            | 0 – 5 anos       | 5 – 10 anos | 10 – 20 anos |
| <b>SDT</b> | 10000-25000      | 5000-10000  | 2000-5000    |
| <b>pH</b>  | 5                | 6 - 7       | 7 - 7,5      |
| <b>DBO</b> | 10000-25000      | 1000-4000   | 50-100       |
| <b>DQO</b> | 15000-40000      | 10000-20000 | 1000-5000    |

SDT = sólidos dissolvidos totais, DBO = demanda bioquímica de oxigênio, DQO = demanda química de oxigênio. Valores, à exceção do pH, em mg/L.

O lixiviado é um líquido escuro contendo alta carga poluidora e com forte odor, devido à decomposição dos resíduos sólidos domiciliares. A presença de água exerce grande influência na decomposição dos resíduos sólidos, pois facilita a redistribuição de nutrientes e micro-organismos no substrato orgânico. Conforme Serafim et al. (2003), o chorume é gerado de três diferentes fontes:

- Da umidade natural do lixo, aumentando no período chuvoso;
- Da água de constituição da matéria orgânica, liberada durante o processo de decomposição;
- Das bactérias existentes no lixo, que excretam enzimas, que dissolvem a matéria orgânica com formação de líquido (hidrólise).

Os fatores acima mencionados variam consideravelmente de um aterro para outro. Assim, não é incomum constatar-se sensíveis variações nas características físicas e químicas dos lixiviados. Os resultados de vários estudos indicam que elevados teores de poluentes orgânicos predominam nos estágios de decomposição ativa, diminuindo gradualmente à medida que o aterro sanitário se estabiliza. Por outro lado, as substâncias minerais continuam a ser lixiviadas por várias décadas (Levine et al., 1985; O’Leary e Tansen, 1986). A Tabela 2.4 mostra a variação da composição química de lixiviados gerados em diferentes aterros.

Tabela 2.4 – Variação da Composição Química de Lixiviados de Diferentes Aterros Sanitários.

| Parâmetros | Referências |
|------------|-------------|
|------------|-------------|

|                    | 1         | 2           | 3           | 4     | 5             |
|--------------------|-----------|-------------|-------------|-------|---------------|
| SDT                | 584-5500  | 725-5500    | 2680-5580   | 27281 | 5710-6720     |
| Condutividade      | 480-7250  | 960-1630    | 8500-12000  | -     | 9580-11670    |
| DBO <sub>5</sub>   | 19500     | 5-75        | -           | 580   | -             |
| DQO                | 6,6-9900  | 50-9000     | 489-1670    | 7000  | -             |
| COT                | 4000      | 50-9000     | -           | 1290  | -             |
| pH                 | 3,7-8,9   | 3,5-8,5     | 7,2 - 8,0   | 8,2   | 7,45-7,7      |
| Alcalinidade Total | 1505      | 0,1-20350   | -           | 9110  | -             |
| Dureza             | 0,1-2250  | 0,1-3600    | -           | -     | -             |
| Cloreto            | 2,0-1137  | 30-5000     | 464-1337    | 9090  | -             |
| Cálcio             | 3,0-2500  | -           | -           | -     | 41,11-80,4    |
| Sódio              | 12-6010   | 20 - 7600   | 484 - 1190  | -     | -             |
| Ferro              | 4000      | 200 -5500   | 1,14 - 3,25 | 15,3  | 4,903-9,89    |
| Potássio           | 3200      | 35 - 2300   | 270 - 632   | -     | -             |
| Magnésio           | 4,0-780   | 3 -15600    | 35 - 63     | 150,7 | 17,54-36,22   |
| Amônia             | 1200      | 0,1 - 2000  | 594 - 1610  | -     | 955           |
| Sulfato            | 1850      | 25 - 500    | -           | 1855  | -             |
| Alumínio           | 85        | -           | -           | -     | 0,2651-0,779  |
| Zinco              | 731       | 0,6 - 220   | 0,24 - 2,55 | 0,50  | 0,0639-0,1679 |
| Manganês           | 400       | 0,6 - 41    | 0,05 - 0,24 | 0,25  | 0,0583-0,1295 |
| Fósforo Total      | 234       | 0,1 - 150   | 2,72 - 14,1 | -     | 1,304-3,336   |
| Bário              | 12,5      | -           | -           | -     | 0,0581-0,2674 |
| Níquel             | 7,5       | 0,2 - 79    | 0,07 - 0,18 | 0,74  | 0,1529-0,2475 |
| Nitrato            | 250       | 0,1 - 45    | 0,06 - 0,31 | -     | 120           |
| Chumbo             | 14,2      | 0,001 -1,44 | 0,03 - 0,12 | -     | -             |
| Cromo              | 5,6       | 0,02 - 18   | 0,03 - 0,15 | 1,6   | 0,0399-0,0505 |
| Cobre              | 9,0       | 0,1 - 9,0   | <0,05       | 0,25  | 0,0142-0,0362 |
| Arsênio            | 70,2      | -           | -           | -     | -             |
| Molibdênio         | 0,01-1,43 | -           | -           | -     | 0,0766-0,0362 |
| Nitrito            | 1,46      | -           | -           | -     | -             |
| Selênio            | 1,85      | -           | -           | -     | -             |
| Cádmio             | 0,4       | 0 - 0,375   | <0,01       | 0,09  | 0,0265-0,0390 |
| Prata              | 1,96      | -           | -           | -     | -             |
| Berílio            | 0,36      | -           | -           | -     | 0,0022-0,0023 |
| Mercúrio           | 3,0       | 0 - 0,16    | -           | -     | -             |

Obs.: Todos os parâmetros são apresentados em mg/L, exceto pH e condutividade (mmho/cm). COT = carbono orgânico total; SDT = sólidos dissolvidos totais; DBO<sub>5</sub> = demanda bioquímica de oxigênio; DQO = demanda química de oxigênio.

Fontes: 1) Variações de acordo com Bagchi (1990); 2) Variações segundo EPA (1987); 3) Aterro de Junk Bay/China – Chu et al. (1994); 4) Aterro de Gramacho/RJ – Barbosa (1994); 5) Aterro do Jockey Club/DF (Santos, 1996) *apud* Cammarota (2006).

Comparando-se os dados de caracterização de diferentes lixiviados reportados na literatura (Tabela 2.4), pode-se ressaltar que: (a) com poucas exceções, o pH dos lixiviados varia de 5,5 a 8,0; (b) grande parte dos sólidos suspensos totais (SST) são voláteis; (c) grande parte do Nitrogênio Kjeldahl Total (NKT) está na forma de nitrogênio amoniacal; (d) os níveis de fosfato geralmente são baixos; e (e) existem elevadas concentrações de Mn e Zn (este último provavelmente advindo de cosméticos).

A idade do aterro sanitário é decisiva na determinação da fração orgânica do lixiviado. A explicação mais simples para isto está no fato de que nos aterros antigos grande parte da matéria orgânica já foi fermentada, de modo que a matéria orgânica que está sendo lixiviada provem do resíduo novo, que à medida que o aterro cresce se constitui numa fração progressivamente menor do todo. A Tabela 2.5 apresenta uma comparação nos parâmetros como pH, DQO e DBO<sub>5</sub> de lixiviados em aterros sanitários, aterros controlados e lixões de diferentes idades.

Tabela 2.5 – Variação de pH, DQO e DBO<sub>5</sub> em lixiviados gerados em aterros de diferentes idades.

| Aterros Sanitários /<br>Aterros Controlados /<br>Lixões | Parâmetros |               |                            |                 |
|---|------------|---------------|----------------------------|-----------------|
|   | pH         | DQO<br>(mg/L) | DBO <sub>5</sub><br>(mg/L) | Idade<br>(anos) |
| Guajuviras<br>Canoas/RS <sup>a</sup>                    | 8,6        | 3639          | 1380                       | > 20            |
| Murimbeca<br>Recife/PE <sup>b</sup>                     | 7,8        | 1230          | 275                        | > 20            |
| Gramacho<br>Rio de Janeiro/RJ <sup>c</sup>              | 8,1        | 6400          | 625                        | > 20            |
| Jangurussu<br>Fortaleza/CE <sup>d</sup>                 | 8,5        | 6027          | 409                        | > 15            |
| Bauru<br>Bauru/SP <sup>e</sup>                          | 7,3        | 60000         | 15000                      | < 5             |

Fontes: <sup>a</sup>Castro (2011); <sup>b</sup>Melo (2003); <sup>c</sup>Giordano (2002); <sup>d</sup>Oliveira e Mota (1998); <sup>e</sup>Segato e Da Silva (2000).



Uma análise detalhada da fração orgânica dos lixiviados mostra que os ácidos graxos voláteis representam uma grande porcentagem da DQO total (34-84%). Outras importantes frações consistem de proteínas (10 - 26%), carboidratos e aromáticos hidroxilados. A proporção relativa destas frações depende da idade do aterro: a contribuição dos ácidos voláteis para a DQO total diminui gradualmente, enquanto que a de proteínas e outras substâncias resistentes à degradação aumentam com a idade do aterro (Lema et al., 1988).

Também compõem os lixiviados compostos aromáticos (Lema et al., 1988), ácidos húmicos e fúlvicos originários da decomposição vegetal (D'Almeida e Villena, 2000), além de uma larga faixa de compostos orgânicos tóxicos, incluindo hidrocarbonetos alifáticos e aromáticos, halogenados orgânicos e outras classes (Khare e Dondero, 1977).

Assim, pressupõe-se que os efluentes gerados nas garagens de veículos de coleta e transporte de resíduos sólidos domiciliares possuem características similares aos lixiviados de aterros novos, como pH ácido, compostos orgânicos como proteínas, lipídeos, carboidratos, pigmentos e outros, derivados da matéria orgânica presente no lixo após processos físicos (extração) e químicos (solubilização) e uma baixa relação DBO<sub>5</sub>/DQO. Diferentemente dos lixiviados, estes efluentes apresentam uma maior concentração de sólidos suspensos, pois a massa de lixo no aterro serve de meio de filtração, e de Óleos e Graxas, oriundos da lubrificação das engrenagens dos caminhões.

### **2.3. TRATAMENTO DE EFLUENTES GERADOS NA LAVAGEM DOS CAMINHÕES DE COLETA E TRANSPORTE DE RSD**

Em vista da carência de bibliografia específica para o tema “efluente de atividade de lavagem de caminhões coletores de resíduos sólidos”, buscou-se trabalhos que abordassem o tratamento de lixiviados de aterros sanitários novos e de águas acinzentadas, conhecidas como *greywaters*. Além disto, considerando que o tratamento avaliado tem como premissa o reuso do efluente tratado na própria lavagem dos caminhões, a questão do reuso de águas também foi abordada neste trabalho.

### 2.3.1. Reuso de água: definições e histórico

Os dias atuais demandam uma necessidade crescente de suprir as carências de água para os mais diversos fins. Para tal, o reuso de águas vem sendo estudado e incentivado pelo poder público. Além disso, com a globalização, tornou-se imperiosa a necessidade de redução nos custos do tratamento da água (Fonseca, 2006).

Metcalf e Eddy (1995) apresentam as seguintes definições relacionadas à recuperação e ao reuso de águas:

- Água servida de reuso: é a água usada que, após tratamento, pode ser usada na agricultura, na indústria, e no comércio, dentre outros;
- Água reciclada: é a água que, após o seu uso, retorna ao processo sem tratamento. Por exemplo, água de circuito fechado de refrigeração;
- Recuperação de águas servidas: é o tratamento dado às águas servidas que permitem o seu reuso.

A reutilização das águas começou na Europa e nos Estados Unidos por volta do ano de 1900, quando se irrigava o solo com as águas de esgoto. Mais tarde, em função do aumento da demanda de água, outros projetos foram se tornando populares, como na cidade de São Francisco (EUA), em 1912, quando se iniciou o reuso das águas tratadas, provenientes das estações de tratamento de efluentes, para a rega dos gramados e jardins (Metcalf e Eddy, 1995).

Em 1926, no Grand Canyon National Park (Arizona - EUA), a água de reuso foi utilizada nos vasos sanitários, em *sprinklers* e em torres de resfriamento (Metcalf e Eddy, 1995).

Em 1942, a Companhia Siderúrgica de Bethlem (EUA) começou a usar água de reuso no processo de fabricação do aço. Em 1960, na cidade de Colorado Spring (EUA) foi implantada a primeira rede de fornecimento de água de reuso para limpeza de avenidas e parques, rega de jardins, e outros (Metcalf e Eddy, 1995).

A maior parte dos estados americanos já utiliza águas de reuso para lavagem de pátios e logradouros, abastecimento de descarga de vasos sanitários, irrigação de alimentos não hortaliços e água de incêndio. Estados como Arizona, Califórnia, Colorado, Flórida, Havaí, Nevada, Nova Jersey, Oregon, Texas, Utah e Washington têm extensa regulamentação que prevê exigências para diferentes usos finais da água tratada (EIA/DOE, 2010).

No Brasil ainda não existe uma legislação específica para água de reuso. A Resolução nº 54 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH), de 2005, sobre o reuso de água para agricultura, ainda não foi editada.

Do conjunto das Estações de Tratamento de Efluentes (ETE) da Companhia Estadual de Águas e Esgotos (CEDAE), que abastece o Rio de Janeiro, apenas uma ETE fornece água de reuso, conforme Tabela 2.6.

Convencionalmente os tratamentos de águas servidas mais aplicados são os biológicos aeróbios e anaeróbios, com limitações que impedem o reuso da água. Dessa forma, o tratamento físico-químico dos efluentes se justifica, principalmente pela possibilidade do reuso de água para diversas finalidades (Fonseca, 2006).

Tabela 2.6 – Capacidade das ETE da CEDAE com o fornecimento de água de reuso.

Fonte: adaptado de Colella (2006) e Lorenzi (2008).

| ETEs               | Capacidade instalada<br>(l/s) | Fornecer água de reuso |     |
|--------------------|-------------------------------|------------------------|-----|
|                    |                               | SIM                    | NÃO |
| Penha              | 1600                          | X                      |     |
| Alegria            | 5000                          |                        | X   |
| Ilha do Governador | 525                           |                        | X   |
| Pavuna             | 1000                          |                        | X   |
| Sarapuí            | 1000                          |                        | X   |
| São Gonçalo        | 765                           |                        | X   |
| Total CEDAE        | 9.890                         | 1                      | 5   |

Ramos (2005) concluiu que o efluente da ETE Penha, após desinfecção, pode ser utilizado nas aplicações internas da estação, para uso industrial e no serviço municipal de limpeza urbana.

Já Romano (2010), definiu a possibilidade de filtração e desinfecção dos efluentes das ETE, após o tratamento secundário, para atender aos parâmetros de qualidade para água de reuso estabelecidos no âmbito do PROSAB (Programa de Saneamento Básico, do Governo Federal), e que se integravam às primeiras versões da Resolução nº 54 do CNRH.

### **2.3.2. Legislação pertinente ao controle de efluentes líquidos**

Por ser uma substância essencial, a água está se tornando um bem de valor incalculável, principalmente se suas características se enquadrarem em padrões satisfatórios para consumo. Como exemplo, pode-se citar os contaminantes biológicos, que podem estar presentes até em águas de fontes naturais, mas que podem ser removidos por processos de tratamento químicos e físicos.

Para o uso seguro das águas recuperadas faz-se necessário atingir alguns parâmetros de controle. Como exemplos, no Estado do Rio de Janeiro, têm-se a Diretriz da FEEMA Dz – 215 R.4 (2007), que trata do controle de carga orgânica biodegradável em efluentes líquidos de origem não industrial e a Norma Técnica FEEMA NT – 202 R.10 (1986), que trata dos padrões para lançamento de efluentes. Já em âmbito nacional, tem-se a Resolução CONAMA 357 (2005), que dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento.

A NT 202 R.10 (1986) objetiva estabelecer critérios e padrões para o lançamento de efluentes líquidos, como parte integrante do Sistema de Licenciamento de Atividades Poluidoras (SLAP). Esta NT aplica-se aos lançamentos diretos ou indiretos de efluentes líquidos, provenientes de atividades poluidoras, em águas interiores ou costeiras, superficiais ou subterrâneas do Estado do Rio de Janeiro, através de quaisquer meios de lançamento, inclusive da rede pública de esgotos.

Atualmente, o Instituto Estadual do Ambiente (INEA), na condicionante nº 13 da Licença Ambiental de Operação (LO) nº FE 013899, obriga a empresa objeto deste estudo a analisar, trimestralmente, parâmetros como DBO (redução de no mínimo 70%), DQO (máx 200 mg/L), surfactantes reativos ao azul de metileno - MBAS (máx 2

mg/L), pH (entre 5 e 9), Temperatura (inferior a 40°C), Óleos e Graxas (máx. 20 mg/L) e resíduos não filtráveis totais - RNFT (máx. 40 mg/L), segundo a NT 202 R10 da FEEMA.

### 2.3.3. Operações unitárias de tratamento de efluentes

Os processos de tratamento utilizados para o efluente proveniente da lavagem de caminhões coletores de resíduos sólidos domiciliares pode assemelhar-se, em certos aspectos, ao aplicado ao lixiviado de aterros novos, bem como às águas acinzentadas, mais conhecidas como *greywater*. *Greywater*, segundo Al-Jayyousi (2003), são águas provenientes do chuveiro, banheira, lavatório de banheiros e lavanderias. Não estão incluídas nessa classificação as águas provenientes da lavagem de louça nem as das bacias sanitárias.

Conforme Jordão e Pessoa (1995), os processos de tratamento de efluentes são formados, em última análise, por uma série de operações unitárias, empregadas para a remoção de substâncias indesejáveis, ou para a transformação destas substâncias em outras de forma aceitável.

Segundo Braile e Cavalcanti (1993), os métodos de tratamento podem ser divididos em quatro: físicos, químicos, físico-químicos e biológicos, os quais são apresentados brevemente, a seguir:

- Métodos físicos: são aqueles empregados para a remoção de sólidos flutuantes de grandes dimensões e de sólidos em suspensão, areias, óleos e gorduras. Para essa finalidade, utilizam-se grades, peneiras, caixas de areia, decantadores, caixas separadoras de água e óleo, e filtros de areia.
- Métodos químicos: são aqueles utilizados para remover material coloidal, cor, turbidez, odor, metais pesados e óleos. Além disso, reagentes químicos também são utilizados para neutralizar ácidos ou álcalis. A neutralização pode ser necessária, não só para se evitar o lançamento de águas ácidas ou alcalinas no

corpo de água receptor, bem como medida necessária para a proteção de tratamentos a jusante, tal como a depuração por métodos biológicos.

- Métodos biológicos: são processos que dependem da ação de micro-organismos. Os principais processos biológicos de tratamento são divididos em aeróbios e anaeróbios. Nos aeróbios, a degradação dos efluentes é realizada por micro-organismos aeróbios e facultativos. Já nos processos anaeróbios, os micro-organismos responsáveis são os facultativos e anaeróbios.

As instalações de tratamento de efluentes são classificadas em quatro etapas, a saber (Jordão,1995):

- Tratamento preliminar: Remoção de sólidos grosseiros; Remoção de gorduras; Remoção de areia.
- Tratamento primário: Sedimentação; Flotação; Digestão do lodo primário; Secagem do lodo primário; Sistemas compactos (sedimentação e digestão e fossa tipo Imhoff); Sistemas anaeróbios (lagoa anaeróbia e reator de fluxo ascendente).
- Tratamento secundário: Filtração biológica; Processos de lodos ativados; Decantação intermediária ou final; Lagoas de estabilização aeróbias (facultativa e aerada).
- Tratamento terciário: Lagoas de maturação; Desinfecção; Troca iônica; Processos de remoção de nutrientes; Filtração por membranas.

#### **2.3.4. O processo de Coagulação/Floculação**

O processo de coagulação/floculação foi empregado no presente trabalho para tratamento do efluente da lavagem dos caminhões, sendo a seguir apresentados os fundamentos deste processo.

A coagulação é o processo em que pequenas partículas coloidais e sólidos em suspensão (como turbidez, bactérias, plâncton, emulsões, ferro e manganês oxidados) e algumas substâncias que se encontram dissolvidas (como sais de cálcio e magnésio, ferro e manganês não oxidados) aglutinam-se em pequenas massas, chamadas de flocos, com peso específico superior ao da água (SILVA, 2002).

Finas partículas sólidas dispersas no efluente transportam cargas elétricas superficiais negativas, que impedem a aglutinação e formação de grupos maiores. A coagulação química desestabiliza essas partículas coloidais através da introdução de coagulantes positivamente carregados que, então, reduzem a carga de partículas negativas. Quando a carga é reduzida, as partículas livres formam grupos maiores. Em seguida, um floculante aniônico é introduzido à mistura. Como o floculante reage contra a mistura de carga positiva, neutraliza os grupos de partículas ou cria pontes entre eles, para ligar as partículas em grupos maiores, o que facilita a aglutinação das partículas por adsorção (SILVA, 2002).

Em resumo, a coagulação corresponde ao fenômeno de desestabilização da suspensão coloidal, enquanto que a floculação limita-se às ações de transporte das partículas coaguladas para provocar colisões entre elas promovendo a sua aglomeração. Após grandes grupos de partículas serem formados, a sedimentação pode ser usada para remover as partículas da mistura. Este processo clarifica o efluente pela condensação de finas partículas em flocos (TCHOBANOGLIOUS et al., 2003).

A adequada coagulação permite economizar produtos químicos e tempo de agitação para a floculação da água em tratamento (VIANNA, 1992). Os agentes empregados para os processos de coagulação são geralmente classificados em três categorias:

- Coagulantes: compostos geralmente de ferro ou alumínio. Capazes de produzir hidróxidos gelatinosos insolúveis e englobar as impurezas;
- Alcalinizantes: capazes de conferir a alcalinidade necessária à coagulação (cal viva - óxido de cálcio; hidróxido de cálcio; hidróxido de sódio – soda cáustica; carbonato de sódio – barrilha);

- Coadjuvantes: capazes de formar partículas mais densas e tornar os flocos mais lastrados (argila, sílica ativa, polieletrólitos).

De acordo com Vaz (2009), o mecanismo de coagulação/floculação é sensível a diversos fatores, a citar: tipo e dosagem de coagulante, pH do efluente, natureza das substâncias que conferem cor e turbidez, tempos de mistura e agitação (a – Rápida: realiza a dispersão do coagulante a fim de que a reação para a coagulação aconteça em toda extensão da massa líquida; b – Lenta: formação dos flocos, aglomeração de material gelatinoso em partículas maiores, que decantam mais rapidamente) e a temperatura (a coagulação ocorre de forma melhor em temperatura mais elevada).

Embora existam tabelas que relacionem a turbidez da água com a quantidade de coagulante empregado, apenas ensaios conduzidos em Jar Test (Teste de Jarros) podem inferir a quantidade exata de coagulante a ser adicionada, assim como os melhores tempos de mistura e sedimentação. O processo global de coagulação inclui duas fases separadas e sequenciais: formação das espécies do coagulante e desestabilização das partículas, e colisões (PEDROSO et al., 2012). A etapa de Coagulação é conduzida sob mistura rápida e curta, enquanto a etapa de Floculação é conduzida sob mistura lenta e tem duração maior.

A formação das espécies do coagulante e desestabilização das partículas ocorre por meio de processos químicos, e dependem principalmente do pH em que se realizam, enquanto que as colisões entre as partículas (suspensas em estado coloidal) são resultantes de um fenômeno físico de transporte, realizado pela difusão e movimento do fluido e controlado por características físicas e químicas do meio (DIMATTEO, 1992).

Os sais de alumínio e ferro são os agentes mais utilizados no tratamento de efluentes, por serem de baixo custo e terem capacidade coagulante já comprovada. O sulfato ferroso é muito útil para tratar efluentes com pH elevado, entre 8,5 e 11, o sulfato férrico é conveniente para tratamento de efluentes altamente coloridos ou ácidos e é efetivo na faixa de pH entre 5,0 a 11,0, enquanto o cloreto férrico produz bons flocos nessa mesma faixa de pH (VIANNA, 1992). Já o aluminato de sódio, considerado um coagulante básico, é usado em casos especiais ou como um aditivo para a coagulação secundária de efluentes altamente coloridos.



A coagulação/floculação, quando realizada com sais de alumínio e ferro, resulta em dois fenômenos: o primeiro, que é essencialmente químico, consiste nas reações do coagulante com a água, formando espécies hidrolisadas com carga positiva. Depende da concentração do metal presente, da temperatura, da quantidade de impurezas e do pH final da mistura. O segundo, fundamentalmente físico, consiste no transporte dessas espécies hidrolisadas para que haja contato com as impurezas presentes no efluente (DI BERNARDO, 1993).

Segundo BORBA (2001), os coagulantes clássicos ou convencionais mais utilizados para o tratamento de efluentes são:

- Sulfato de alumínio  $[Al_2(SO_4)_3]$  - é um sal obtido pela reação entre o ácido sulfúrico  $[H_2SO_4]$  e o hidróxido de alumínio  $[Al(OH)_3]$  ou entre o mesmo ácido e o alumínio metálico. A única diferença é que na primeira reação ocorre a formação de água enquanto que na segunda o outro produto é o gás hidrogênio. É um sólido cristalino de cor branca-acinzentada, contendo aproximadamente 17% de  $Al_2O_3$  solúvel em água. É disponível em pedra, em pó ou em soluções concentradas.
- Cloreto Férrico  $[FeCl_3]$  - é apresentado como uma solução aquosa de caráter ácido e coloração castanho-escura. Contém cerca de 40% em peso do Cloreto Férrico (produto químico inorgânico de fórmula  $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ ). A preparação industrial do Cloreto Férrico é feita através da reação de materiais ferrosos selecionados (minério de ferro, limalha ou sucata de aço-carbono) com ácido clorídrico e/ou cloro. Pode também ser preparado a partir de soluções ácidas de íons de ferro, por oxidação com cloro. A acidez do cloreto férrico é necessária para manter em solução os íons de Fe III, responsáveis pelo caráter coagulante/oxidante do produto.
- Sulfato Ferroso  $[FeSO_4 \cdot 7H_2O]$  - pó cristalino verde claro ou cristais verde-azulados, inodoros, de sabor adstringente, eflorescentes ao ar seco. Oxida-se rapidamente em contato com ar úmido, formando sulfato férrico básico amarelo-amarronzado.

Entre as dificuldades que se podem apresentar em um processo de floculação estão: formação de flocos pequenos de baixa velocidade de sedimentação; formação muito lenta dos flocos; flocos frágeis que se fragmentam no processo de condicionamento (das lamas); e formação de microflocos que passam através dos filtros. Para eliminar estas dificuldades e obter flocos grandes e bem formados de fácil sedimentação utilizam-se substâncias e procedimentos muito variados. Segundo Trindade e Manuel (2006), os mais utilizados são:

- Oxidantes: como a percloração, que em parte oxida a matéria orgânica e rompe as ligações nos colóides naturais, ajudando posteriormente para uma melhor floculação.
- Adsorventes: as águas muito coradas e de baixa mineralização em que os flocos de alumínio ou ferro possuem muito baixa densidade, coagulam muito bem ao adicionar-se argila, que adsorve essas substâncias e origina flocos mais pesados e de fácil sedimentação. Outros adsorventes muito usados são a cal pulverizada, sílica em pó e o carvão ativado.
- Sílica Ativada: Alguns compostos inorgânicos podem ser polimerizados em água para formar polímeros floculantes inorgânicos. Este é o caso da sílica ativada, que apresenta uma elevada eficiência como auxiliar do tratamento com sulfato de alumínio.
- Polieletrólitos: São polímeros orgânicos com carga elétrica. Inicialmente usaram-se os de origem natural como a celulose e gomas de polissacarídeos. Atualmente, emprega-se uma grande variedade de polieletrólitos sintéticos. Podem atuar isoladamente ou como coadjuvantes para floculação. Os polieletrólitos podem classificar-se em: a) Catiônicos: carregados positivamente; b) Aniônicos: carregados negativamente; c) não iônicos: não são polieletrólitos em sentido estrito ainda que exibam em solução muitas das propriedades floculantes dos anteriores.

Para o processo de floculação, os produtos mais utilizados são:

- Policloreto de Alumínio (PAC) - tem o processo de produção baseado na reação do ácido clorídrico com alumina hidratada, sob temperatura e pressão, sendo a solução em seguida resfriada e filtrada. O PAC é um sal de alumínio pré-polimerizado com pontes de oxigênio entre os alumínios. O PAC apresenta vantagens na floculação em relação aos demais floculantes (PAVANELLI, 2001).
- Polímeros Acrilamida [ $C_3H_5NO$ ] – a acrilamida é um intermediário químico que apresenta-se como um sólido cristalino de cor branca, usado principalmente na fabricação de polímeros que podem ser modificados para usos específicos, como aditivos para o tratamento da água e efluentes.

### **2.3.5. Tratamento de efluentes da lavagem de caminhões de coleta e transporte de RSD**

Os sistemas de tratamento de efluentes são baseados na transformação dos poluentes dissolvidos e em suspensão em gases inertes e/ou sólidos sedimentáveis para a posterior separação das fases sólida/líquida. Sendo assim, se não houver a formação de gases inertes ou lodo estável, não se pode considerar que houve tratamento. A Lei de Lavoisier, sobre a conservação da matéria, é perfeitamente aplicável, observando-se apenas que ao remover as substâncias ou materiais dissolvidos e em suspensão na água estes sejam transformados em materiais estáveis ambientalmente. A poluição não deve ser transferida de forma e lugar. É necessário conhecer o princípio de funcionamento de cada operação unitária utilizada, bem como a ordem de associação dessas operações que definem os processos de tratamento (GIORDANO 2003).

Os efluentes gerados na lavagem de caminhões de resíduos sólidos apresentam elevado potencial poluidor, havendo necessidade de um tratamento adequado antes de seu descarte no ambiente. No entanto, a literatura sobre este tema é escassa, tendo sido encontrado um único trabalho de pesquisa relacionado ao tratamento deste efluente.

Fonseca (2006) caracterizou efluentes do processo de lavagem de caminhões de coleta de RSD e constatou, pelos resultados do monitoramento da estação, uma grande flutuação nos valores dos parâmetros avaliados, ressaltando a elevada concentração de material particulado, o que dificulta sua degradação. Pela relação DBO/DQO do efluente bruto (em geral, menor que 0,5), verificou-se a dificuldade de degradação biológica, conforme demonstrado na Tabela 2.7.

Tabela 2.7 – Relação DBO/DQO no tanque de equalização. Fonte: Fonseca (2006).

| Parâmetros    | Estudo de Caracterização |      |      |      |      |      |
|---------------|--------------------------|------|------|------|------|------|
|               | DBO, mg/L                | 1947 | 1058 | 1087 | 1023 | 3088 |
| DQO, mg/L     | 4780                     | 2351 | 3399 | 2751 | 4433 | 2857 |
| Razão DBO/DQO | 0,41                     | 0,45 | 0,32 | 0,37 | 0,70 | 0,40 |

No estudo conduzido por Fonseca (2006), cujos objetivos eram analisar a eficiência da ETE da empresa e adequar o efluente tratado aos limites da legislação, o mesmo concluiu que a ETE em questão apresentava baixo desempenho. Na adequação da ETE, utilizaram-se os processos de clarificação química (utilizando cloreto férrico) e lodos ativados (processo biológico). O melhor resultado obtido com cloreto férrico foi com uma concentração de 300 mg/L, porém a redução de DQO ficou entre 35,7% e 73%, com valor médio de 54%. Apenas com a clarificação, não foi possível atingir os padrões exigidos pela legislação (DQO máxima = 200 mg/L). O efluente só conseguiu alcançar os padrões exigidos pela legislação, quando utilizou-se o processo de clarificação química combinado com o lodo ativado, conforme demonstrado na Tabela 2.8.

Em vários estudos relativos à tratabilidade do lixiviado de aterros, os pesquisadores têm investigado uma série de diferentes opções de tratamento incluindo métodos de tratamento químico, físico-químico e biológico. Alguns desses métodos são: tratamento químico (processos envolvendo hidrólise enzimática e hidrólise ácida); tratamentos físico-químicos (usando-se materiais como cal, cloreto férrico, sulfato férrico e carvão ativado, entre outros); e tratamento biológico aeróbio e anaeróbio (Cook e Foree, 1974; Boyle e Ham, 1974; Cameron e Koch, 1980; Schalch, 1984; Comlurb/Feema, 1984; Kennedy et al., 1988; Iza et al., 1991; Imai et al., 1995;). Os

vários métodos apresentados oferecem vantagens e desvantagens que devem ser avaliadas quando da escolha da técnica de tratamento mais adequada.

Tabela 2.8 – Eficiência de redução de DQO após o tratamento físico-químico e biológico. Fonte: Fonseca (2006).

| Ensaio                 | Efluente Bruto | Efluente Clarificado | Remoção % | Efluente Biológico | Remoção % |
|------------------------|----------------|----------------------|-----------|--------------------|-----------|
| 1                      | 5980           | 3545                 | 40,7%     | 313                | 91,2%     |
| 2                      | 2405           | 649                  | 73,0%     | 59                 | 90,9%     |
| 3                      | 3001           | 1149                 | 61,7%     | 87                 | 92,4%     |
| 4                      | 3300           | 1420                 | 57,0%     | 64                 | 95,5%     |
| 5                      | 3920           | 2521                 | 35,7%     | 64                 | 97,5%     |
| 6                      | 13990          | 6376                 | 54,4%     | 103                | 98,4%     |
| Média da remoção (%)   |                |                      |           |                    | 94,3%     |
| Desvio padrão $\sigma$ |                |                      |           |                    | 3,3%      |

A eficiência do processo físico-químico de coagulação/floculação com diversos agentes coagulantes foi avaliada para o tratamento do lixiviado gerado no Aterro de Gramacho (Duque de Caxias – RJ). Diferentes dosagens de coagulante e diferentes valores de pH foram testados (Cammarota et al., 1994). O tratamento se mostrou relativamente eficaz (remoções de DQO de 43 a 47%) com cloreto férrico ( $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) como agente coagulante a um valor de pH de 4,0 e dosagem de 400-500 mg/L, o que demanda elevado consumo do agente coagulante, além de problemas de corrosão do material de construção dos reatores e bombas e de formação de espuma (formada pela liberação de  $\text{CO}_2$  a partir de carbonatos e bicarbonatos presentes no chorume, com pH ácido).

Silva et al. (2000), em seus ensaios de coagulação com uma dosagem de cloreto férrico de 1500 mg/L, removeram 57% da DQO do lixiviado em pH 5. Cheibub (2009)

constatou a efetividade da coagulação/floculação seguida de decantação como tratamento primário de lixiviado de aterro sanitário estabilizado, removendo 50% de DQO, em condições de pH 4,0 e 1228 mg/L de cloreto férrico. Nagashima et al. (2009) desenvolveram estudos envolvendo as etapas de coagulação/floculação e decantação, com pH 6,5 e 2250 mg/L do coagulante à base de tanino. Os autores obtiveram 38% de remoção de DQO, 37% para cor aparente e 30% para turbidez. Segundo Castilho Jr. et al. (2010), alguns estudos envolvendo o processo de coagulação/floculação demonstram boa eficiência na redução da carga poluente, entre outros parâmetros.

Knupp et al. (2009) conduziram experimentos em escala de bancada em equipamento Jar Test. O lixiviado foi tratado com  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  na faixa de concentração de 1 a 15 g/L e com  $\text{FeCl}_3$  na faixa de 0,5 a 6 g/L. Os resultados obtidos antes e após o tratamento indicaram que o coagulante  $\text{FeCl}_3$  foi mais eficiente na remoção dos contaminantes que o coagulante  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ . O primeiro apresentou eficiências de remoção de DQO de 73% a 93%; enquanto o último de 82% a 92%. Tempos de sedimentação de 1 e 2 h foram mais adequados para o tratamento com  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  e  $\text{FeCl}_3$ , respectivamente.

Coelho et al. (2002) obteve eficiência de remoção de DQO entre 15% e 52% com concentrações de coagulantes que variaram entre 500 e 4500 mg/L. A melhor faixa de pH para o processo esteve entre os valores de 7 e 8. As maiores eficiências de remoção de DQO foram observadas com o aumento da concentração de coagulante para 4500 mg/L.

Canepa et al. (2008) trabalharam com misturas de coagulantes e os coagulantes tradicionais [ $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  e cloreto férrico] em cinco concentrações diferentes (75, 150, 225, 300 e 375 mg/L), com o lixiviado sob agitação de 25 rpm por 25 min para promover a formação dos flocos. Os coagulantes puros (sulfato de alumínio e cloreto férrico) apresentaram maiores níveis de remoção de DQO que qualquer mistura de coagulantes, na faixa de pH entre 7,0 e 7,5.

## 2.4. A ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE EFLUENTES ESTUDADA

No sistema estudado, o efluente oriundo da lavagem de caminhões de coleta e transporte de RSD passa por um tratamento físico-químico que emprega uma elevada quantidade de produtos químicos, independente das características apresentadas pelo efluente gerado.

A empresa estudada presta serviços, entre outros, de coleta e transporte de resíduos sólidos domiciliares, e possui, em suas instalações, um lavatório, com quatro boxes, para higienização de sua frota de veículos. Neste processo, necessita de cerca de 45 m<sup>3</sup>/dia de água para lavagem diária de toda sua frota.

Tendo em vista a quantidade necessária de água, sua escassez, a consciência ecológica, a política ambiental da empresa e a visão sustentável, a mesma capta todo o efluente gerado na higienização de sua frota e o encaminha até sua Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) localizada ao lado dos lavatórios. Posteriormente, a empresa reaproveita a água tratada, que retorna para uma nova lavagem.

A primeira etapa do tratamento consiste em um gradeamento e uma caixa de retenção de sólidos grosseiros – caixa de areia (conforme apresentado na Figura 2.2) com volume e dimensões calculados para permitir que, ao passar por estas unidades, partículas de areia e outros sólidos grosseiros sejam retidos, evitando depósitos indesejáveis nos compartimentos posteriores de tratamento.



Figura 2.2 – (A) Gradeamento e (B) caixa de retenção de sólidos grosseiros da ETE em estudo.

A saída desta caixa se faz por uma tubulação de PVC com diâmetro de 200 mm até as caixas separadoras de óleos e graxas – O&G (Figura 2.3). Por diferença de densidade, os óleos e graxas são separados e conduzidos a uma caixa de gordura, onde a limpeza é realizada semanalmente por uma empresa devidamente licenciada pelo INEA.

O líquido, já separado dos óleos e graxas, passa por um medidor de vazão - *Calha Parshall* (Figura 2.3) e, em seguida, por diferença de nível, é conduzido a uma caixa de transferência. A transferência deste líquido é feita por uma bomba centrífuga submersa de 5 hp com acionamento automático, sendo o mesmo transferido para o primeiro reservatório suspenso através de um tubo flexível de polietileno de alta densidade (PEAD) com diâmetro de 50 mm. Este reservatório possui uma capacidade de armazenamento de 9.000 litros ou 9 m<sup>3</sup> (Figura 2.3).



Figura 2.3 – (C) Caixas separadoras de óleos e graxas, (D) Calha Parshall, (E) Tanque de coagulação, (F) Tanque de floculação e (G) Tanque de sedimentação da ETE em estudo.



Antes que o processo físico-químico de tratamento tenha início, o pH é ajustado, com hidróxido de sódio (NaOH), para valores entre 6,0 e 7,0. Após o ajuste do pH, inicia-se o processo de coagulação, no qual são adicionados 50 litros de Cloreto Férrico ( $\text{FeCl}_3$  – QUIMIFACTOR, 99% de pureza) a 5% (m/v) em cada batelada. Na coagulação, cada batelada tem duração de 15 minutos. Nesta etapa, o reagente será misturado ao efluente através de uma bomba centrífuga de 2 hp para transferência, instalada ao pé do reservatório. A mistura é realizada por um agitador instalado no reservatório, com rotação de 120 rpm (rotações por minuto).

A floculação é a etapa seguinte, onde a transferência do efluente já coagulado para o próximo reservatório suspenso é realizada através da mesma bomba centrífuga. O processo para adicionar o floculante é realizado da mesma maneira que na etapa anterior. Nesta etapa utiliza-se o polímero policloreto de alumínio CP (PANFLOC – PAN AMERICANA S A, 99% de pureza). Na floculação, cada batelada tem duração de 60 minutos. A mistura é feita por um agitador instalado no reservatório, com rotação de 40 rpm (rotações por minuto).

Após a floculação, o líquido é encaminhado para um terceiro reservatório – denominado tanque de repouso. Este tanque tem como objetivo deixar o efluente tratado em repouso para a sedimentação dos flocos formados. O tempo de repouso do líquido é de 5 horas. Na Figura 2.3 são apresentados os tanques de coagulação, floculação e sedimentação.

Para evitar o aparecimento de micro-organismos indesejáveis no efluente tratado, é realizada a adição de Hipoclorito de Sódio ( $\text{NaClO}$ ), de acordo com as especificações do fabricante, que também ajudará na clarificação do efluente. Depois de tratado, o efluente está de acordo com a legislação pertinente, podendo ser descartado na rede de coleta ou ser reusado na lavagem da frota de caminhões de coleta de resíduos sólidos domiciliares.

Os sólidos separados no tratamento são enviados para uma Central de Tratamento de Resíduos (empresa pública) ou para uma empresa privada de saneamento.

Caso o efluente tratado não esteja enquadrado nos limites estabelecidos na NT 202 R.10 FEEMA, este poderá retornar ao processo, passando por todas as etapas novamente. Na Figura 2.4 é apresentado um desenho esquemático de todo o sistema de tratamento.

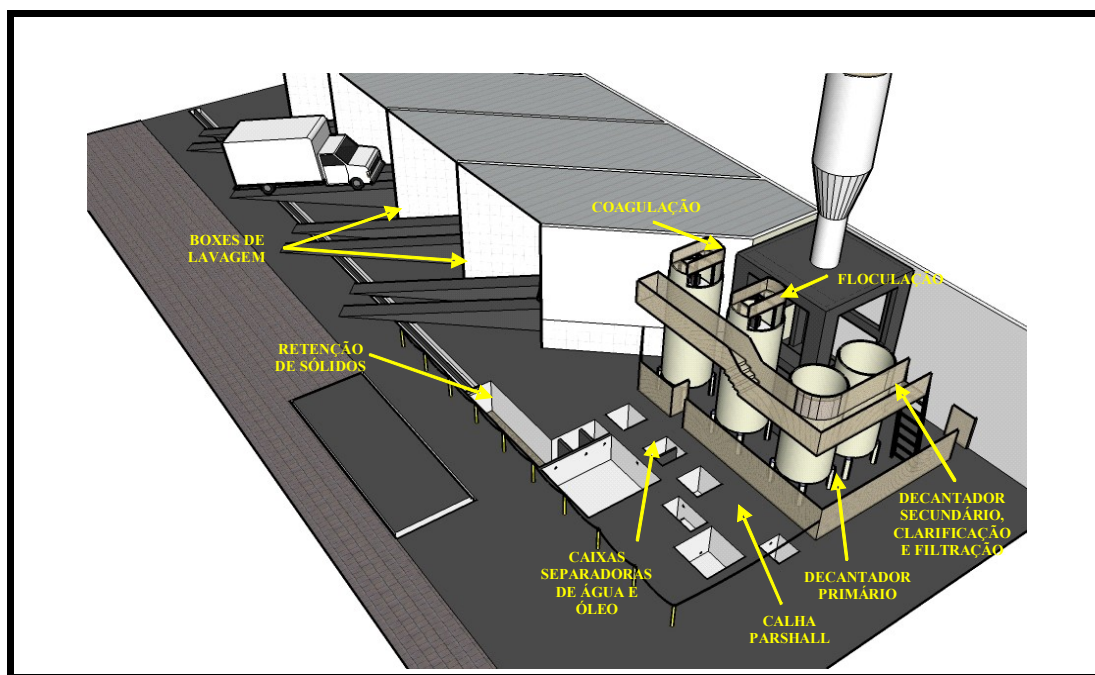


Figura 2.4 – Esquema da Estação de Tratamento de Efluentes da empresa objeto deste estudo.

Portanto, o processo de tratamento do efluente em questão emprega diversos produtos químicos, como Hidróxido de Sódio ( $\text{NaOH}$ ), Cloreto Férrico ( $\text{FeCl}_3$ ), um polímero e Hipoclorito de Sódio ( $\text{NaClO}$ ). As concentrações de substâncias poluidoras presentes no efluente não são constantes. Dependendo do dia da semana e da rota que a frota realiza, as concentrações dessas substâncias podem variar, porém, são utilizadas sempre as mesmas concentrações de produtos químicos no processo de tratamento.

Cabe salientar que a quantidade de produtos utilizada pela empresa foi calculada para tratar um efluente em condições extremas, garantindo, assim, o perfeito tratamento do mesmo, e atingindo os parâmetros exigidos pelo Instituto Estadual do Ambiente (INEA). No entanto, a elevada quantidade de produtos químicos e o custo envolvido no tratamento do efluente gerado na lavagem dos caminhões motivaram o estudo conduzido nesta dissertação.

### **3. MATERIAIS E MÉTODOS**

#### **3.1. FUNCIONAMENTO DA FROTA DE CAMINHÕES DE COLETA E TRANSPORTE DE RSD**

A empresa selecionada para este estudo possui, em sua sede, uma frota de 33 veículos para coleta e transporte de resíduos sólidos domiciliares. Diariamente, cerca de 900 toneladas de resíduos são coletadas e transportadas para uma Central de Tratamento de Resíduos (CTR) e para uma Estação de Transbordo que, posteriormente, são encaminhados para uma CTR de maior capacidade, em outro município.

Após cada roteiro de viagem estabelecido para os veículos de coleta, estes retornam à empresa para o procedimento de higienização, que se repete por três vezes ao dia. Os efluentes gerados são armazenados em um tanque de equalização e enviados para a Estação de Tratamento de Efluente (ETE), que opera em batelada, e trata 27000 L de efluente em três bateladas diárias de 9000L cada.

#### **3.2. AMOSTRAGEM E CARACTERIZAÇÃO DA ÁGUA DE LAVAGEM DOS CAMINHÕES**

Para estabelecer as características do efluente gerado diariamente na lavagem dos caminhões compactadores, foram coletadas amostras do efluente em dias da semana intercalados, durante dois meses, respeitando-se a seguinte sequência:

- dias de coleta da 1ª semana: segunda-feira, quarta-feira e sexta-feira;
- dias de coleta da 2ª semana: terça-feira, quinta-feira e sábado.

As coletas foram realizadas sempre após a primeira lavagem de caminhões do dia, quando as frotas retornavam para a garagem, após o primeiro roteiro de viagem.

Amostras homogeneizadas de todas as lavagens realizadas no dia foram coletadas na caixa de equalização, já livre de sólidos grosseiros, em recipientes de

plástico de 5 L e armazenadas sob refrigeração até a realização das análises. Parâmetros como Demanda Bioquímica de Oxigênio ( $DBO_5$ ), Demanda Química de Oxigênio (DQO), pH, temperatura, cor, Óleos e Graxas, Sólidos Sedimentáveis (SS) e Resíduos Não Filtráveis Totais (RNFT) foram determinados segundo procedimentos padrão (APHA, 2005). Temperatura e pH foram medidos no momento da coleta, no próprio local.

### **3.3. TRATAMENTO FÍSICO-QUÍMICO DA ÁGUA DE LAVAGEM DOS CAMINHÕES**

O tratamento físico-químico foi conduzido em Teste de Jarros (*Jar Test*), da empresa Nova Ética, composto de seis pás de agitação, que permite a programação de rotação das hélices agitadoras. Adicionou-se o coagulante de forma a se obter a concentração desejada, sob agitação a 120 rpm, o pH foi ajustado rapidamente para o valor desejado, com solução de NaOH 1% (m/v). Em seguida, a velocidade de agitação foi diminuída para 40 rpm durante o tempo determinado. Após o tempo de agitação lenta, a mistura foi deixada em repouso para sedimentação dos flocos formados. Após esse período, retirou-se uma amostra do sobrenadante para análises.

As seguintes variáveis foram avaliadas: concentrações de coagulante ( $FeCl_3$ , QUIMIFACTOR LTDA., 99% grau de pureza) e floculante (policloreto de alumínio - PAC, PANFLOC CP, PAN-AMERICANA S.A., 99% grau de pureza), tempos de coagulação/floculação, tempos de sedimentação e pH. As velocidades de agitação das etapas de coagulação e floculação foram mantidas nos mesmos valores adotados na empresa (120 e 40 rpm, respectivamente).

Todos os ensaios foram conduzidos em duplicata para cada condição avaliada, sendo analisados turbidez, DQO e  $DBO_5$  dos sobrenadantes e apresentados os valores médios e respectivos desvios-padrão obtidos.

### **3.3.1. Avaliação dos tempos de coagulação/floculação e sedimentação**

Para avaliação dos tempos de coagulação/floculação e sedimentação, fixou-se o pH em 7,0 e as concentrações de  $\text{FeCl}_3$  e PAC em 250 mg/L e 24 mg/L, respectivamente, sendo estudados diferentes tempos de coagulação a 120 rpm (5, 10 e 15 min), de floculação a 40 rpm (20 e 60 min) e de sedimentação (1, 3 e 5 h).

### **3.3.2. Avaliação do pH**

O pH representa as condições de acidez ou alcalinidade de um meio. A concentração de íons  $\text{H}^+$  é um dos fatores mais influentes sobre a velocidade das reações bioquímicas. Para avaliação de diferentes valores de pH (5, 6, 7, 8 e 9), mantiveram-se as concentrações de  $\text{FeCl}_3$  e PAC em 250 mg/L e 24 mg/L, e adotou-se os tempos de coagulação/floculação e sedimentação que levaram às melhores remoções de turbidez, DQO e  $\text{DBO}_5$  nos ensaios anteriores (item 3.3.1).

### **3.3.3. Avaliação da concentração de coagulante e floculante**

Para avaliação da concentração de  $\text{FeCl}_3$ , manteve-se a concentração de PAC em 24 mg/L, o pH em 7 e os tempos de coagulação/floculação e sedimentação estabelecidos nos ensaios anteriores. Avaliou-se diferentes concentrações de  $\text{FeCl}_3$ : 50, 150, 250, 350, 450 e 550 mg/L a 120 rpm por 5 min.

Mantendo-se a concentração de  $\text{FeCl}_3$  no valor indicado nestes primeiros ensaios, variou-se a concentração de PAC em 12; 24; 48; 72; 96 e 120 mg/L (40 rpm por 60 min).

## **3.4. ANÁLISE DE CUSTOS**

Para a análise de custos, foi feito um levantamento do valor dolitro de cada um dos produtos químicos ( $\text{NaOH}$ ,  $\text{FeCl}_3$ , PAC e  $\text{NaClO}$ ) que a empresa paga aos seus

fornecedores. Os valores (R\$/L) adotados foram R\$2,80; R\$2,85; R\$2,90 e R\$0,90, respectivamente.

Para o levantamento do valor de energia elétrica gasto na operação do sistema de tratamento, foi feito um levantamento da potência dos motores de agitação dos tanques de coagulação e floculação, do valor do Kwh pago pela empresa ao fornecedor e o tempo de mistura. Como os dois agitadores possuem a mesma potência (1,49 Kwh), o valor (R\$/Kwh) adotado para ambos foi de R\$ 21,70.

### **3.5. CORRELAÇÃO ENTRE DQO E QUANTIDADE DE FeCl<sub>3</sub>**

Uma série de 12 ensaios com amostras coletadas em diferentes dias foi conduzida com ajuste de pH para 7; 100, 150 ou 200 mg FeCl<sub>3</sub>/L (120 rpm , 5 min); 12 mg PAC/L (40 rpm, 60 min) e sedimentação (60 min), a fim de se verificar se haveria uma correlação entre a DQO inicial do efluente bruto e a quantidade de FeCl<sub>3</sub> adicionado, mantendo-se a qualidade do efluente tratado. Foram avaliados a remoção de DBO<sub>5</sub> e DQO nestes ensaios.

### **3.6. MÉTODOS ANALÍTICOS**

#### **3.6.1. Potencial Hidrogeniônico (pH)**

Na empresa, o pH do efluente bruto foi medido através de fitas indicadoras de pH (papel tornassol), sendo a cor obtida comparada com as cores de uma tabela do fornecedor, que variam de vermelho escuro (ácido) ao roxo (alcalino/básico).

No laboratório, o pH do efluente tratado foi medido por leitura direta em potenciômetro QUIMIS, modelo Q400A, após calibração do eletrodo com soluções tampão adequadas.

### 3.6.2. Temperatura

A temperatura do efluente bruto foi medida no próprio local, no mesmo horário da realização das coletas, através de um termômetro de mercúrio.

### 3.6.3. Cor

A cor das amostras foi medida através de leituras de absorvância em comprimento de onda de 254 nm em espectrofotômetro Hach DR2000, empregando-se cubetas de 1 cm de caminho ótico (MANUAL HACH, 1995).

### 3.6.4. Demanda Química de Oxigênio

Na determinação da DQO foi empregado o método colorimétrico padrão de refluxo fechado (Hach), com  $K_2Cr_2O_7$  em meio ácido, contendo  $Ag_2SO_4$  como catalisador e  $HgSO_4$  para eliminar a interferência de cloretos presentes na amostra. As amostras foram diluídas (quando necessário) de forma adequada para as faixas de DQO contempladas pelo método.

Logo em seguida foram adicionadas as soluções para o ensaio, sendo os tubos colocados no digestor Hach a uma temperatura de 150°C durante 2 horas. Após resfriamento à temperatura ambiente, é realizada a leitura direta da absorvância em espectrofotômetro. Os brancos são preparados com água destilada substituindo as amostras. Os valores de absorvância a 600 nm são convertidos em DQO através de uma curva padrão previamente preparada utilizando-se biftalato de potássio como substância padrão (APHA, 2005) e a equação a seguir.

$$DQO = \frac{(Abs600)}{\alpha} \times dil$$

Onde:

DQO = demanda química de oxigênio (mg O<sub>2</sub>/L)

Abs600 = absorvância da amostra a 600 nm

$\alpha$  = coeficiente angular da curva-padrão (DQO x Abs)

dil = diluição da amostra

### 3.6.5. Demanda Bioquímica de Oxigênio

A um balão volumétrico de 1000 ml foram adicionados 500 ml de água destilada e 1ml das seguintes soluções: sulfato de magnésio 1M, cloreto de cálcio 1M, cloreto férrico 1M e tampão fosfato pH 7,0. A mistura formada, denominada água de diluição, foi agitada vigorosamente para saturá-la de oxigênio dissolvido (O.D.) e posteriormente avolumada para 1 L.

As amostras do efluente foram diluídas convenientemente nesta água de diluição e transferidas cuidadosamente para 3 frascos de DBO de modo a se evitar a entrada de ar. A leitura da concentração inicial de O.D. era feita através de oxímetro Digimed, modelo DM-4 (15 minutos após seu preparo) e os frascos incubados durante 5 dias a 20°C no escuro.

Após este período a concentração de O.D. era novamente determinada. As diluições que apresentaram uma concentração residual de O.D. de pelo menos 1 mg/l e um esgotamento (consumo de O.D. no período de 5 dias) de pelo menos 2 mg/l foram consideradas na determinação da DBO, calculada pela equação a seguir:

$$DBO = \frac{(O.D_{ia} - O.D_{fa})}{D}$$

Onde:

DBO = demanda bioquímica de oxigênio (mg O<sub>2</sub>/L)

O.D.<sub>ia</sub> = O.D. da amostra diluída 15 minutos após seu preparo

O.D.<sub>fa</sub> = O.D. da amostra diluída após a incubação

D = fração decimal de amostra usada



### 3.6.6. Óleos e Graxas

A determinação do teor de O&G nas amostras foi feita através de extração em Soxhlet, utilizando hexano como solvente, de acordo com procedimento padrão (APHA, 2005). As amostras foram acidificadas com 5 ml/L de HCl diluído (1:1 v/v) e filtradas em disco de papel de filtro Whatman número 4, coberto com uma camada de diatomita, obtida pela filtração de uma suspensão aquosa (5% m/v) de terra diatomácea. Todo o conjunto (papel de filtro + diatomita + resíduo retido) foi embrulhado e colocado dentro de um cartucho de extração de celulose previamente descontaminado pela extração com hexano por 2 horas. Os cartuchos com as amostras foram colocados em estufa a temperatura de 105°C por 30 minutos para secar.

A análise foi realizada utilizando-se balões limpos com pérolas de vidro, previamente tarados após secagem a 105°C e resfriamento em dessecador, obtendo-se  $P_1$ . Em cada balão eram colocados 200 mL de hexano, sendo estes conectados ao extrator Soxhlet contendo o cartucho com a amostra.

A extração com hexano foi realizada a uma velocidade de 20 ciclos por hora durante 4 horas. Após esse período, o hexano foi evaporado em rotoevaporador e o balão contendo o resíduo oleoso colocado para secar em estufa a 105°C até peso constante e, após resfriamento, pesado, obtendo-se  $P_2$ . O teor de O&G da amostra foi determinado pela equação a seguir:

$$O \& G = \frac{(P_2 - P_1) \cdot 10^6}{V_a}$$

Onde:

O&G = teor de óleos e graxas (mg/L)

$P_1$  = peso do balão + pérolas de vidro (g)

$P_2$  = peso do balão + pérolas de vidro + resíduo gorduroso (g)

$V_a$  = volume da amostra filtrada (ml)

### 3.6.7. Sólidos Sedimentáveis

Um litro da amostra foi transferido para Cone de Imhoff e deixou-se os sólidos sedimentando por 45 min. Em seguida, empregou-se um bastão de vidro para desprender os sólidos aderidos à parede interna do cone e esperou-se mais 15 min para sedimentar. Fez-se a leitura do volume de sólidos sedimentados, obtendo-se os sólidos sedimentáveis em ml/L.

### 3.6.8. Resíduos Não-Filtráveis Totais

Cápsulas de porcelana foram taradas em mufla por 30 minutos a temperatura de 550°C e resfriadas em dessecador. Filtros de fibra de vidro, secos em estufa a 105°C e resfriados em dessecador, foram inseridos nas cápsulas e o conjunto pesado, obtendo-se  $P_1$ . Volumes conhecidos de amostra foram filtrados à vácuo no filtro de fibra de vidro. Após rinsagem com água destilada, o filtro contendo o resíduo retido era transferido para a cápsula e secos em estufa (105°C) por uma noite, obtendo-se  $P_2$ . Os RNFT eram então calculados de acordo com a equação a seguir:

$$RNFT = \frac{(P_2 - P_1) \cdot 10^6}{V_a}$$

Onde:

RNFT = resíduos não filtráveis totais (mg/L)

$P_1$  = peso do conjunto (cápsula + filtro) limpos (g)

$P_2$  = peso do conjunto (cápsula + filtro + resíduo) depois da estufa (g)

$V_a$  = volume de amostra filtrada (ml)

### 3.6.9. Turbidez

A turbidez das amostras foi medida através de leituras de absorvância em comprimento de onda de 450 nm em espectrofotômetro Hach DR2000, empregando-se cubetas de 3 cm de caminho ótico (MANUAL HACH, 1995).

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DO EFLUENTE ORIUNDO DA LAVAGEM DOS CAMINHÕES DE COLETA E TRANSPORTE DE RSD

O efluente coletado apresentou as características apresentadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Caracterização das águas de lavagem dos veículos de coleta e transporte de resíduos sólidos domiciliares.

| Variável                        | Média ± DP   |
|---------------------------------|--------------|
| pH                              | 6,00 ± 0,03  |
| T (°C)                          | 27,0 ± 1,2   |
| Cor (PtCo)                      | 65 ± 4       |
| DQO (mg/L)                      | 21734 ± 164  |
| DBO <sub>5</sub> (mg/L)         | 1455 ± 233   |
| O&G (mg/L)                      | 2101 ± 297   |
| Sólidos Sedimentáveis (ml/L)    | 11,3 ± 0,4   |
| Sólidos Suspensos Totais (mg/L) | 17410 ± 2685 |

DP = desvio-padrão entre três réplicas (n=3)

Os resultados obtidos demonstram o potencial de poluição do efluente, que apresenta alta concentração de matéria orgânica (DQO), de difícil degradação biológica, pois a razão DBO<sub>5</sub>/DQO é extremamente baixa (0,07). Outra característica é a elevada concentração de sólidos suspensos totais (SST). Neste efluente, a matéria orgânica se encontra em sua maioria na forma particulada, o que justifica um tratamento por coagulação / floculação.

Na caracterização do efluente da lavagem de caminhões de uma empresa coletora de resíduos sólidos domiciliares, Fonseca (2006) obteve valores de pH (5,2 – 5,9) e DBO (1023 - 3088 mg/L) similares. Por outro lado, foram obtidos menores valores de DQO (2351 - 4780 mg/L), O&G (57 – 278 mg/L) e SST (292 – 1984 mg/L) e maiores razões DBO/DQO (0,32 - 0,70). Tais resultados podem ser devido a procedimentos de operação e limpeza diferenciados entre as duas empresas, assim como os resíduos sólidos coletados, o ano de fabricação e o desgaste dos veículos.

Comparando-se os dados de caracterização do efluente com os de diferentes lixiviados encontrados na literatura, pode-se ressaltar algumas similaridades: com poucas exceções, o pH dos lixiviados varia de 5,5 a 8,0; grande parte dos sólidos suspensos são voláteis; as relações  $DBO_5/DQO$  são baixas, especialmente em lixiviados de aterros antigos (LEMA et al., 1988; LISK, 1991; CAMMAROTA et al., 1994). No entanto, diferentemente do lixiviado resultante de um processo de biodegradação avançada nos aterros, o efluente gerado na lavagem dos veículos de coleta constitui um material ainda não submetido a uma biodegradação mais intensa. Daí, os maiores teores de sólidos suspensos,  $DBO_5$  e  $DQO$  e o pH ainda próximo da neutralidade (MORAIS et al., 2006; CARVALHO et al., 2006).

Fonseca (2006) apresenta uma tabela de caracterização de lixiviados produzidos em aterros com diferentes idades. O efluente da lavagem de caminhões apresenta valores médios de pH e  $DQO$  dentro das faixas de valores obtidos para o lixiviado de um aterro com 1 ano de idade: pH (5,2 – 6,4) e  $DQO$  (10000 – 40000 mg/L). No entanto, a concentração de SST no lixiviado (100 – 700 mg/L) é bem menor que no efluente da lavagem de caminhões, pois os constituintes orgânicos são em sua maioria solúveis.

## **4.2 TRATAMENTO FÍSICO-QUÍMICO DAS ÁGUAS DE LAVAGEM**

### **4.2.1 Avaliação dos tempos de coagulação/floculação e sedimentação**

Os resultados referentes aos ensaios de variação dos tempos de coagulação e floculação no tratamento físico-químico conduzido em Jar-test encontram-se na Tabela 4.2 a seguir.

Tabela 4.2 - Variação dos tempos de coagulação (120 rpm) e floculação (40 rpm) com 250 mg  $FeCl_3/L$ , 24 mg PAC /L e pH 7.

| Ensaio | TC<br>(min) | TF<br>(min) | Turbidez<br>(Pt-Co) | DQO<br>(mg/L) | DBO <sub>5</sub><br>(mg/L) |
|--------|-------------|-------------|---------------------|---------------|----------------------------|
| 1      | 5           | 20          | 26,5 ± 4,9          | 1121 ± 189    | 224 ± 15                   |
| 2      | 10          | 20          | 23,5 ± 2,1          | 1520 ± 33     | 335 ± 38                   |
| 3      | 15          | 20          | 24,5 ± 0,7          | 1197 ± 1      | 280 ± 8                    |
| 4      | 5           | 60          | 27,5 ± 0,7          | 325 ± 37      | 9 ± 1                      |
| 5      | 10          | 60          | 26 ± 0,0            | 298 ± 6       | 10 ± 1                     |
| 6      | 15          | 60          | 25,0 ± 4,2          | 292 ± 8       | 9 ± 1                      |

TC = tempo de coagulação, TF = tempo de floculação, Valores de turbidez, DQO, DBO<sub>5</sub> (média ± desvio-padrão entre duas réplicas) foram determinados no sobrenadante após 1 h de sedimentação.

Na Tabela 4.2, verifica-se que as condições adotadas no ensaio 6 (15 min de coagulação e 60 min de floculação, como adotado pela empresa) levaram a um sobrenadante de melhor qualidade do que nos outros ensaios, com menores valores de DQO e DBO<sub>5</sub> no sobrenadante. No entanto, os resultados obtidos no ensaio 4 apresentaram valores muito similares de turbidez, DQO e DBO<sub>5</sub> no sobrenadante, com menores tempos de coagulação (5 min) e sedimentação (1 h).

Dos tempos avaliados, o tempo de floculação parece ser a variável de maior influência nos resultados, pois para os mesmos tempos de coagulação, verificaram-se remoções muito superiores de DQO e DBO<sub>5</sub> no maior tempo de floculação. Assim, decidiu-se manter o tempo de floculação empregado na empresa (60 min).

Outros floculantes poderiam ser avaliados, de forma a se obter boas remoções de DQO e DBO<sub>5</sub> com tempos menores. Mesmo assim, a redução do tempo de coagulação já permite uma redução de custos com energia elétrica. Com relação aos tempos de sedimentação avaliados (1, 3 e 5 h), verificaram-se resultados similares no sobrenadante obtido em cada um dos três tempos, optando-se por um tempo de sedimentação de 1 h, cinco vezes menor que o adotado na empresa (5 h).

Com esses valores, a empresa gastaria menos energia elétrica e as máquinas apresentariam menos desgastes, reduzindo, também, o custo de manutenção, tanto em material quanto em mão de obra. E com apenas a redução nos tempos de coagulação e sedimentação, o efluente ainda estaria dentro dos parâmetros definidos na condicionante da licença ambiental de operação da empresa.

#### 4.2.2 Avaliação do pH

Na Tabela 4.3 são apresentados os resultados da variação do pH inicial do efluente mantendo-se as concentrações adotadas nos ensaios anteriores e os tempos de coagulação (15 min), floculação (60 min) e sedimentação (1 h) que levaram aos melhores resultados.

Tabela 4.3 - Variação do pH com 250 mg FeCl<sub>3</sub>/L (120 rpm, 5 min), 24 mg PAC / L (40 rpm, 60 min) e tempo de sedimentação de 1 h.

| Ensaio | pH | Turbidez<br>(Pt-Co) | DQO<br>(mg/L) | DBO <sub>5</sub><br>(mg/L) |
|--------|----|---------------------|---------------|----------------------------|
| 1      | 5  | 30,5 ± 0,7          | 351 ± 8       | 11 ± 3                     |
| 2      | 6  | 30,5 ± 2,1          | 339 ± 15      | 10 ± 1                     |
| 3      | 7  | 25,5 ± 0,7          | 321 ± 36      | 9 ± 1                      |
| 4      | 8  | 35,0 ± 1,4          | 363 ± 6       | 17 ± 2                     |
| 5      | 9  | 37,0 ± 1,4          | 387 ± 16      | 16 ± 2                     |

Valores de turbidez, DQO, DBO<sub>5</sub> (média ± desvio-padrão entre duas réplicas).

Segundo Santos et al. (2003), o pH exerce uma grande interferência na eficiência do tratamento por coagulação / floculação.

Verifica-se que menores valores de turbidez, DQO e DBO<sub>5</sub> foram obtidos no ensaio com pH 7 (neutro), sendo esta condição selecionada para os outros ensaios de variação das concentrações de coagulante e floculante. Porém, se o tratamento físico-químico for conduzido sem ajuste do pH, ou seja, no pH do efluente (pH 6, em média) bons resultados também são obtidos, com menor consumo de produtos químicos. Para valores de pH mais elevados (básico), havia redução da eficiência no tratamento.

Fonseca (2006) também obteve melhores resultados na clarificação de efluente de lavagem de caminhões de coleta com 300 mg FeCl<sub>3</sub>/L a pH 6,37.

#### 4.2.3 Avaliação das concentrações de coagulante e floculante

Nas Tabelas 4.4 e 4.5 são apresentados os resultados de variação da concentração do coagulante cloreto férrico e do floculante policloreto de alumínio.

Tabela 4.4 - Variação da concentração de coagulante (120 rpm, 5 min) com 24 mg PAC / L (40 rpm, 60 min), pH 7 e tempo de sedimentação de 1 h.

| Ensaio | FeCl <sub>3</sub><br>(mg/L) | Turbidez<br>(Pt-Co) | DQO<br>(mg/L) | DBO <sub>5</sub><br>(mg/L) |
|--------|-----------------------------|---------------------|---------------|----------------------------|
| 1      | 50                          | 27,5 ± 2,1          | 1168 ± 204    | 36 ± 8                     |
| 2      | 150                         | 21,5 ± 2,1          | 299 ± 15      | 10 ± 1                     |
| 3      | 250                         | 24,5 ± 0,7          | 308 ± 13      | 11 ± 1                     |
| 4      | 350                         | 33,5 ± 3,5          | 328 ± 40      | 10 ± 4                     |
| 5      | 450                         | 33,0 ± 1,4          | 308 ± 12      | 11 ± 4                     |
| 6      | 550                         | 40,0 ± 1,4          | 318 ± 9       | 9 ± 3                      |

Valores de turbidez, DQO, DBO<sub>5</sub> (média ± desvio-padrão entre duas réplicas)

Com relação à concentração do coagulante cloreto férrico, observa-se na Tabela 4.4 que os melhores resultados foram obtidos no ensaio com 150 mg/L do coagulante. Isso caracteriza uma redução de 100 mg/L de cloreto férrico por batelada, uma vez que a empresa utilizava 250 mg/L. Essa redução de 40% reflete em menos gasto com o tratamento do efluente, lançamentos de menores quantidades de produto químico no meio ambiente e mais espaço no almoxarifado, aumentando, assim, o espaço para armazenamento de outros materiais da empresa e facilitando a logística interna e externa. Verifica-se, ainda, que nos ensaios 3, 4, 5 e 6 a redução de DQO não se altera significativamente com o aumento da concentração do coagulante.

SILVA et al. (2000) ressaltaram que a eficiência da precipitação química depende da quantidade e do controle da dosagem do produto, citando valores de 80% a 90% de remoção de sólidos suspensos e 70% a 80% de DQO em lixiviados de aterro sanitário. Esses autores ainda sugeriram a aplicação de cloreto férrico como coagulante, ao invés de sulfato de alumínio, uma vez que o grau de impureza do sulfato de alumínio é elevado, levando à dificuldade de solubilização em elevadas concentrações.

Segundo HAMADA et al (2002), concentrações de cloreto férrico inferiores a 500 mg/l não promoveram alterações significativas na qualidade do sobrenadante após a coagulação de lixiviados de aterro sanitário novo (Aterro Sanitário de Bauru/SP). Tais

resultados diferem dos obtidos no presente estudo, já que observou-se que com valores menores que 500 mg/L de  $\text{FeCl}_3$ , havia reduções significativas na turbidez, DBO e DQO do efluente oriundo da lavagem de caminhões de coleta de RSD.

Guo et al. (2004) aprovou a superioridade do desempenho do cloreto férrico ( $\text{FeCl}_3$ ) perante o sulfato de alumínio  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  na remoção de colóides orgânicos presentes nos efluentes de reatores de lodos ativados tratando lixiviados. Este estudo mostra a importância do  $\text{FeCl}_3$  na coagulação de efluentes tratados biologicamente para uma etapa posterior de microfiltração.

Ainda esses autores demonstraram experimentalmente que os processos de coagulação e adsorção juntos podem ser adequados para remover 86% da demanda química de oxigênio dos esgotos domésticos. Em seus estudos, foram usados 40 mg/L de  $\text{FeCl}_3$  e 20 mg/L de carvão ativo granulado. No presente estudo, com uma concentração de 150 mg/L de  $\text{FeCl}_3$ , sem o processo de adsorção por carvão ativado, foi observada uma redução significativa na DQO do efluente da lavagem de caminhões de coleta de RSD.

Na Tabela 4.5 se verifica melhores resultados na menor concentração de floculante (12 mg/L), ou seja, houve uma redução de 50% daquela empregada pela empresa. Com essa redução na quantidade de floculante a empresa pode reduzir consideravelmente o custo do processo de tratamento.



Tabela 4.5 - Variação da concentração de PAC (40 rpm, 60 min) com 150 mg FeCl<sub>3</sub>/L (120 rpm, 5 min), pH 7 e tempo de sedimentação de 1 h.

| Ensaio | PAC<br>(mg/L) | Turbidez<br>(Pt-Co) | DQO<br>(mg/L) | DBO <sub>5</sub><br>(mg/L) |
|--------|---------------|---------------------|---------------|----------------------------|
| 1      | 12            | 22.0 ± 1.4          | 293 ± 21      | 10 ± 1                     |
| 2      | 24            | 23.5 ± 3.5          | 334 ± 12      | 11 ± 1                     |
| 3      | 48            | 23.5 ± 2.1          | 305 ± 8       | 11 ± 1                     |
| 4      | 72            | 26.5 ± 3.5          | 302 ± 3       | 10 ± 1                     |
| 5      | 96            | 22.5 ± 0.7          | 290 ± 31      | 10 ± 1                     |
| 6      | 120           | 21.5 ± 2.1          | 291 ± 20      | 9 ± 1                      |

Valores de turbidez, DQO, DBO<sub>5</sub> (média ± desvio-padrão entre duas réplicas).

Apesar de alguns ensaios, como 5 e 6, apresentarem maiores valores na redução de DQO, os mesmos possuem altíssimas concentrações de floculante, o que acarreta em mais custos e maior emissão de produtos químicos no meio ambiente, com o mesmo resultado final. A concentração aplicada no ensaio 1 apresentou o índice exigido na condicionante da licença ambiental de operação da empresa.

Fonseca (2006) obteve melhor eficiência na coagulação/floculação de efluente de lavagem de caminhões, avaliada pelo maior volume de lodo gerado (70 ml/L), quando empregou 300 mg FeCl<sub>3</sub>/L e 1,5 – 2,0 mg/L de polieletrólito a pH 6,37. A menor concentração de floculante pode ser devido à maior quantidade de coagulante adicionada, sendo necessário um estudo de custo/benefício, em cada empresa, para escolha da melhor alternativa.

Todas as condições das etapas do tratamento físico-químico do efluente estudado foram avaliadas quanto à forma de aplicação na empresa. Os valores obtidos para as concentrações de coagulante e floculante são menores que os aplicados na ETE da empresa, o que representa uma economia considerável com produtos químicos e menos lançamento desses ao meio ambiente.

Pode-se verificar que os padrões exigidos na legislação e na licença ambiental de operação da empresa foram atingidos, com maior eficiência e economia. No entanto, o efluente tratado não atingiu o valor máximo permitido para a DQO (200 mg/L), o que

demonstra que o processo de tratamento precisa ser melhorado neste aspecto. Nas Figuras 4.1 e 4.2 é apresentado o aspecto visual do efluente antes, durante e após o tratamento físico-químico. Percebe-se uma redução considerável da cor e turbidez do efluente.

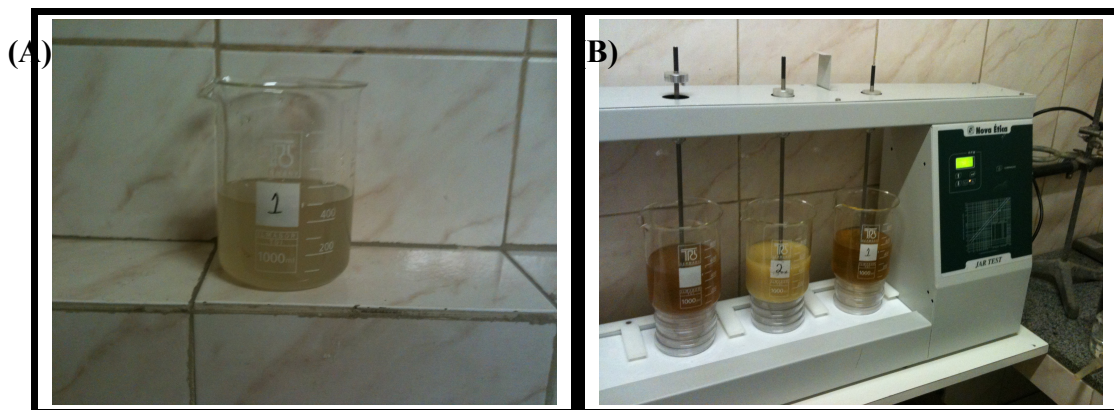


Figura 4.1 - (A) Efluente bruto; (B) Início da coagulação/floculação (Jar Test).

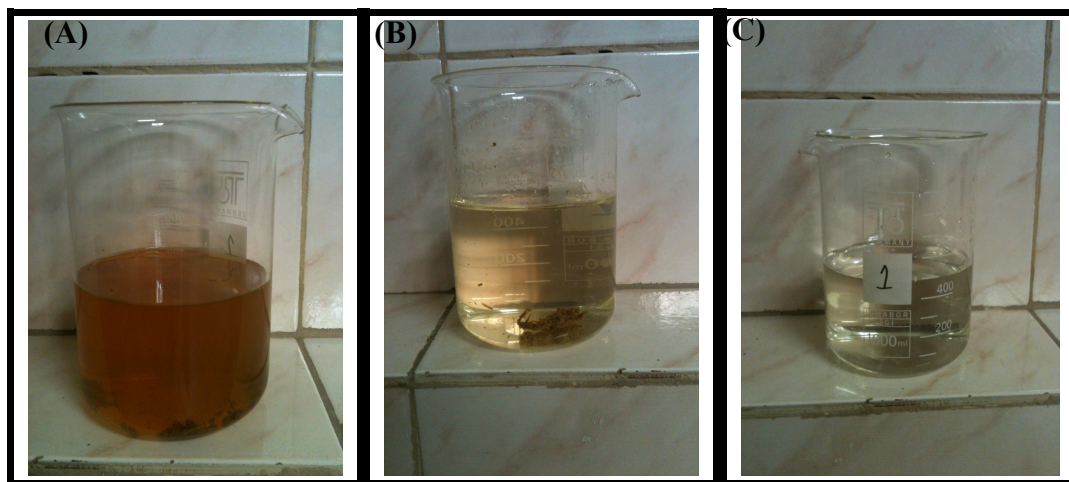


Figura 4.2 - (A) Início da sedimentação; (B) Final da Sedimentação; (C) Efluente tratado.

### 4.3 ANÁLISE DE CUSTOS

Considerando a quantidade de caminhões de coleta e transporte de resíduos sólidos domiciliares que a empresa possui e a quantidade de efluente gerado na higienização dos mesmos, a ETE realiza três bateladas por dia de 9.000 L cada batelada.

A empresa, no tratamento deste efluente, possuía um gasto mensal de 1350 L de hidróxido de sódio (NaOH 1% m/v), 4500 L de cloreto férrico (FeCl<sub>3</sub> 5% m/v), 9000 L de policloreto de alumínio (PANFLOC CP 0,24% m/v) e 2700 L de hipoclorito de sódio (NaOCl 2% m/v), o que levava a um custo total com produtos químicos de R\$ 45.135,00 por mês. Além do custo com produtos químicos, ainda possuía os custos mensais com energia elétrica (R\$ 3.636,90) e descarte final do lodo gerado (R\$ 3.020,00).

Uma análise de custos, considerando o consumo de produtos químicos e de energia elétrica no tratamento físico-químico em cada batelada, nas condições adotadas na empresa e nas apontadas neste estudo, é apresentada na Tabela 4.6.

Verifica-se uma economia por batelada de R\$ 207,39, o que gera uma redução de custo mensal de R\$ 48.771,90 para R\$ 30.106,80, que representa uma economia de R\$ 18.665,10 / mês para a empresa ao adotar as condições levantadas neste estudo.

Realizando uma análise mais detalhada e criteriosa, verifica-se uma melhora significativa na atuação do colaborador que opera a ETE, uma vez que o mesmo realiza seu serviço de maneira mais eficiente, em menos tempo, proporcionando-o finalizar o serviço dentro do horário de trabalho, aumentando sua qualidade de vida e gerando menos custo com hora extra para a empresa.

Tabela 4.6 - Consumo e custo de produtos químicos e energia em cada batelada de 9.000 L na ETE nas condições da empresa e indicadas neste estudo.

| Produtos/<br>Condição | R\$/kwh)          |       | R\$    | R\$/kwh)          |       | R\$    |
|-----------------------|-------------------|-------|--------|-------------------|-------|--------|
|                       | Na empresa        |       |        | Neste estudo      |       |        |
| Hidróxido de Sódio    | 15 L              | 2,80  | 42,00  | 15 L              | 2,80  | 42,00  |
| Cloreto Férrico       | 50 L              | 2,85  | 142,50 | 30L               | 2,85  | 85,50  |
| PAC                   | 100 L             | 2,90  | 290,00 | 50 L              | 2,90  | 145,00 |
| Hipoclorito de Sódio  | 30 L              | 0,90  | 27,00  | 30L               | 0,90  | 27,00  |
| Mistura rápida        | 1,49 Kwh<br>(15') | 21,70 | 8,08   | 1,49 Kwh<br>(5')  | 21,70 | 2,69   |
| Mistura lenta         | 1,49 Kwh<br>(60') | 21,70 | 32,33  | 1,49 Kwh<br>(60') | 21,70 | 32,33  |
| Total/batelada        |                   |       | 541,91 |                   |       | 334,52 |

#### 4.4 CORRELAÇÃO ENTRE DQO E QUANTIDADE DE $\text{FeCl}_3$

Para obtenção de uma relação entre uma característica representativa do efluente bruto, de fácil detecção, e a quantidade necessária de produtos químicos para se atingir o padrão de descarte de forma mais econômica, uma série de ensaios com amostras coletadas em diferentes dias foi conduzido. A característica escolhida para essa análise foi a DQO, sendo avaliada sua remoção com a variação da concentração de cloreto férrico.

Para todas as amostras foram utilizadas as condições de tratamento físico-químico mais eficientes encontradas no estudo realizado nesse trabalho, como: o pH foi ajustado para 7; utilizou-se a concentração de floculante de 12 mg PAC/L, tempo de coagulação de 5 minutos; tempo de floculação de 60 minutos e tempo de sedimentação de 1 h. E variou-se a concentração do coagulante cloreto férrico em: 100, 150 e 200 mg

FeCl<sub>3</sub>/L para a realização da correlação com a DQO, conforme demonstrado na Tabela 4.7.

Verificou-se que a remoção de DBO<sub>5</sub> nestes ensaios foi sempre acima de 91%, atendendo o padrão de descarte indicado na condicionante da licença ambiental de operação.

Enquanto valores de DQO menores ou iguais ao padrão de 200 mg/L foram obtidos com 153 a 186 mg FeCl<sub>3</sub>/L (Figura 4.3), corroborando com os resultados obtidos nos experimentos anteriores conduzidos nesse estudo.

Uma análise destes resultados possibilitou estabelecer um modelo matemático que correlaciona a DQO final e a concentração de cloreto férrico, cuja equação é apresentada a seguir. O coeficiente de correlação obtido (R<sup>2</sup>=0,9443) indica um bom ajuste dos dados ao modelo.

$$Y = 0,2095 x^2 - 70,95 x + 6152,2$$

Onde:

Y = DQO final (sobrenadante) (mg/L)

x = concentração de FeCl<sub>3</sub> (mg/L) empregada no tratamento

Tabela 4.7 - Correlação entre diferentes concentrações de cloreto férrico e DQO.

| Ensaio /<br>Variáveis | FeCl <sub>3</sub><br>(mg/L) | DQO inicial<br>(mg/L) | DBO inicial<br>(mg/L) | DQO final<br>(mg/L) | DBO final<br>(mg/L) |
|-----------------------|-----------------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------|---------------------|
| 1                     | 100                         |                       |                       | 1482                | 17                  |
|                       | 150                         | 20045                 | 1034                  | 315                 | 10                  |
|                       | 200                         |                       |                       | 391                 | 11                  |
| 2                     | 100                         |                       |                       | 1129                | 19                  |
|                       | 150                         | 21133                 | 946                   | 203                 | 8                   |
|                       | 200                         |                       |                       | 312                 | 13                  |
| 3                     | 100                         |                       |                       | 996                 | 17                  |
|                       | 150                         | 19850                 | 1437                  | 135                 | 9                   |
|                       | 200                         |                       |                       | 348                 | 10                  |
| 4                     | 100                         |                       |                       | 1482                | 17                  |
|                       | 150                         | 20249                 | 1137                  | 315                 | 10                  |
|                       | 200                         |                       |                       | 391                 | 11                  |
| 5                     | 100                         |                       |                       | 1129                | 19                  |
|                       | 150                         | 17866                 | 1013                  | 203                 | 8                   |
|                       | 200                         |                       |                       | 312                 | 13                  |
| 6                     | 100                         |                       |                       | 996                 | 17                  |
|                       | 150                         | 18354                 | 970                   | 135                 | 9                   |
|                       | 200                         |                       |                       | 348                 | 10                  |
| 7                     | 100                         |                       |                       | 1482                | 17                  |
|                       | 150                         | 22187                 | 1045                  | 315                 | 10                  |
|                       | 200                         |                       |                       | 391                 | 11                  |
| 8                     | 100                         |                       |                       | 1129                | 19                  |
|                       | 150                         | 19743                 | 914                   | 203                 | 8                   |
|                       | 200                         |                       |                       | 312                 | 13                  |
| 9                     | 100                         |                       |                       | 996                 | 17                  |
|                       | 150                         | 18970                 | 890                   | 135                 | 9                   |
|                       | 200                         |                       |                       | 348                 | 10                  |
| 10                    | 100                         |                       |                       | 1482                | 17                  |
|                       | 150                         | 19025                 | 1105                  | 315                 | 10                  |
|                       | 200                         |                       |                       | 391                 | 11                  |
| 11                    | 100                         |                       |                       | 1129                | 19                  |
|                       | 150                         | 18453                 | 920                   | 203                 | 8                   |
|                       | 200                         |                       |                       | 312                 | 13                  |
| 12                    | 100                         |                       |                       | 996                 | 17                  |
|                       | 150                         | 20256                 | 1180                  | 135                 | 9                   |
|                       | 200                         |                       |                       | 348                 | 10                  |

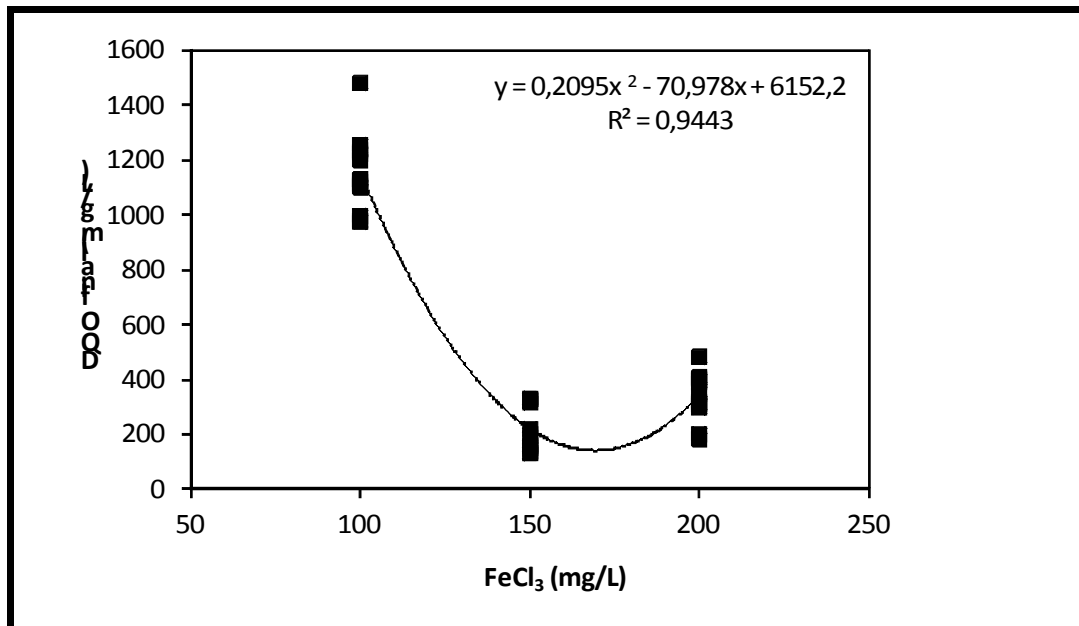


Figura 4.3 - Correlação entre DQO final e concentração de coagulante.

Verifica-se, na Figura 4.4, uma correlação entre a DQO inicial e final do efluente para concentrações de coagulante de 100, 150 e 200 mg/L, a serem adotadas no tratamento físico-químico.

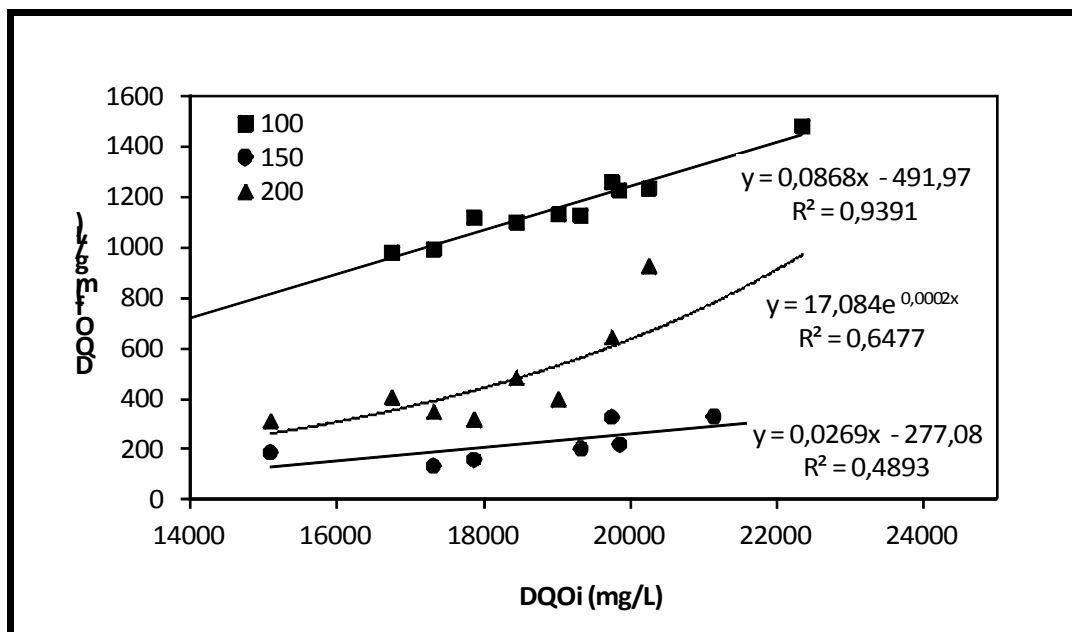


Figura 4.4 - Correlação entre DQO inicial e final para concentrações de coagulante de 100, 150 e 200 mg/L.

Verifica-se que apesar dos baixos coeficientes de regressão obtidos para as correlações da DQO final com 150 e 200 mg FeCl<sub>3</sub>/L, uma análise dos resultados permitiu estabelecer que só se consegue atingir uma DQO final menor ou igual a 200 mg/L com DQO inicial de até 7972, 17735 mg/L e 12300 mg/L com 100, 150 e 200 mg FeCl<sub>3</sub>/L, respectivamente.

Apesar dos menores valores de DQO final com 150 mg FeCl<sub>3</sub>/L para uma faixa mais ampla de DQO no efluente bruto, considerando que os valores de DQO do efluente bruto estão na faixa de  $21734 \pm 164$  mg/L, deve-se melhorar o tratamento para efluentes mais concentrados, a fim de também enquadrá-los nos padrão de descarte.



## 5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

### 5.1 CONCLUSÕES

Em função dos resultados encontrados nos experimentos realizados, pode-se concluir que a redução dos tempos de mistura do coagulante e de sedimentação, assim como das concentrações de coagulante e floculante resultou em eficiências de redução de turbidez, DBO e DQO satisfatórias no tratamento dos efluentes oriundos da lavagem de caminhões, atingindo-se os padrões de emissão exigidos pelo órgão ambiental competente, descritos na licença ambiental de operação da empresa.

Os resultados obtidos também proporcionaram uma calibragem na operação da ETE da empresa, reduzindo os custos de operação, tanto com produtos químicos quanto com mão de obra, além de lançar menos produtos químicos no meio ambiente. Com a melhora na eficiência do processo de tratamento do efluente, a empresa pode novamente empregar o efluente tratado como água de reuso para a lavagem dos caminhões.

Obteve-se uma relação entre DQO inicial e a quantidade de cloreto férrico (coagulante) necessária para se atingir o padrão de descarte de forma mais econômica.

### 5.2 SUGESTÕES

O presente estudo demonstrou que houve uma melhora significativa no tratamento do efluente, com a redução de diversos itens. Porém, em alguns experimentos, o parâmetro DQO não se enquadrou no limite de descarte de 200 mg/L. Tratamentos biológicos ou filtração em carvão ativado podem ser empregados como complemento ao tratamento físico-químico empregado na empresa.

Diferentes tipos de coagulante e/ou floculante podem ser empregados com a finalidade de reduzir ainda mais o custo de operação da ETE, sem perda da eficiência.

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. *Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil*, pp. 43-47, 2010.

ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. *Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil*, pp. 30-33, 2011.

Al-Jayyousi, O. R. Greywater reuse: towards sustainable water management. *Desalination*, n. 156, pp.181-192, 2003.

Apha/Awwa/Wef.Eaton, A.Detal. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 21<sup>a</sup>ed.Washington: American Public Health Association. pp.1082, 2005.

Birks, J.; Eyles, C.A. Leachate from landfill along the Niagara Escarpment. In: Eyles, N. (Ed.), *Environmental Geology of Urban Areas*. Geological Association of Canada, pp. 347-363, 1997.

Borba, L. R. Viabilidade do uso da *Moringa oleifera* Lam no tratamento simplificado de água para pequenas comunidades. *Dissertação de Mestrado*. Universidade Federal da Paraíba – UFPB, João Pessoa. 2001.

Boyle, W. C.; Ham, R. K. Biological treatability of landfill leachate. *Journal WPCF*. v.46. pp. 860-872, 1974.

Braile, P. M; Cavalcanti, J. E. W. A. Manual de Tratamento de águas Residuárias Industriais. *São Paulo: Cetesb*, 1993.

Cameron, R. D.; Koch, F. A. Trace metals and anerobic digestion of leachate. *Journal WPCF*. v.52. pp. 282-292, 1980.

Cammarota, M. C.; Russo, C.; Sant'anna Jr., G. L. Tratabilidade do chorume gerado no Aterro Sanitário Metropolitano do Rio de Janeiro. *Anais I Encontro Brasileiro de Ciências Ambientais*. v.2. pp. 453–473, 1994.

Cammarota, M. C. Processos híbridos aplicados ao tratamento de efluentes recalitrantes: estudo de caso com chorume de aterro antigo. *Proposta de projeto*. CNPq/Edital Universal 02/2006.

Canepa, J. R. L.; Arévalo, A. G.; Adams, R. H. Mezclas con potencial coagulante para tratamento de lixiviados de um relleno sanitário. *SciELO*, v.33. nº 1. 2008.

Carvalho, A. L.; Matos, A. T.; Hamakawa, P. J.; Azevedo, R. F. Produção de percolados por resíduos sólidos urbanos de diferentes idades, na presença de resíduos da construção civil e sob recirculação. *Engenharia na Agricultura*. v.14. nº 2. pp. 131-138, 2006.

Castilho Jr., A. B.; Dalsasso, R. L.; Rohers, F. Pré-tratamento de lixiviados de aterros sanitários por filtração direta ascendente e coluna de carvão ativado. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 15(4). pp. 385-392, 2010.

Castro L. E. S. Eficiência de coagulantes no tratamento primário de chorume do aterro sanitário Guajuviras. *Dissertação de Mestrado*. Centro Universitário La Salle. 2011.

Cheibub, D. M. Aplicação de processos combinados no tratamento do chorume. *Dissertação de Mestrado*. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

CNRH – Conselho Nacional de Recursos Hídricos. *Estabelece modalidades, diretrizes e critérios gerais para a prática de reuso direto não potável*. Brasil: Resolução nº 54 de 28 de novembro de 2005.

Coelho, M. G.; Andrade, S. M. A.; Santos, C. L. Caracterização e tratabilidade por coagulação-floculação de líquidos percolados provenientes de aterro sanitário municipal de Uberlândia. *Anais do XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária Y Ambiental*. 2002.

Coelho, F. M. Balanço hídrico da bacia hidrográfica do rio Guandu com as novas demandas por Água. *UniCEDAE 2010*, 2010.

Colella, F. M. Gerenciamento de Uso de Água na Indústria: Oportunidades e Benefícios. *Palestra no 5o Seminário de Assuntos Ambientais e de Segurança na Indústria de Tintas*, 2006.

Comlurb/Feema. Poluição por chorume de lixo e seu controle, 1984.

CONAMA. Classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento dos corpos de água superficiais, bem como as condições e padrões de lançamento de efluentes. Brasil: Resolução nº 357 de 17 de março de 2005.

Cook, E. N.; Foree, E. G. Aerobic biostabilization of sanitary landfill leachate. *Journal WPCF*. v. 46. pp. 380-392, 1974.

D'almeida, M. L. O.; Vilhena, A. Lixo Municipal. *Manual de Gerenciamento Integrado*. 2. ed., São Paulo: Editora IPT/CEMPRE, 2000.

Di Bernardo, L. Métodos e técnicas de tratamento de água. Rio de Janeiro: *ABES – Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental*. v. 1, 1993.

Dimatteo, M. L. Influência da pré-ozonização na coagulação – floculação utilizando o cloreto férrico como coagulante. *Dissertação de Mestrado*, FEC/UNICAMP, Campinas, SP, 1992.

Farquhar, G. J. Leachate: production and characterization. *Canadian Journal of Civil Engineering*. n. 16, pp. 317-325, 1989.

FEEMA. Critérios e padrões para lançamento de efluentes líquidos. Brasil: Norma Técnica NT 202 R.10 de 04 de dezembro de 1986.

FEEMA. Diretriz de controle de carga orgânica biodegradável em efluentes líquidos de origem não industrial. Brasil: Diretriz DZ 215 R.4, de 8 de novembro de 2007.

Fonseca, Z. J. S. Tratamento de efluente gerado nas atividades de limpeza de caminhões de lixo. *Dissertação de Mestrado*, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2006.

Giordano, G. Tratamento do chorume do aterro metropolitano de Gramacho. *Anais do XXVIII Congresso Internacional de Engenharia Sanitária e Ambiental*. 2002.

Giordano, G. Análise e formulação de processos para tratamento dos chorumes gerados em aterros de resíduos sólidos urbanos. *Tese de Doutorado*. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, RJ, 2003.

Guo, W. S.; Vigneswaran, S.; Ngo, H. H.; Chapman, H. Experimental investigation of adsorption-flocculation-microfiltration hybrid system in wastewater reuse. *Journal Membrane Science*. nº 242. pp. 27-35, 2004.

Hamada, J.; Castilho Filho, G. S.; Faria, S.; Cintra, F. H. Aplicabilidade de processos físico e físico-químico no tratamento do chorume de aterros sanitários. *Anais do VI Simpósio Luso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*. 2002.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística: banco de dados. *Censo 2011*. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br>, acesso em: 02.fev.2013.

Imai, A.; Onuma, K.; Inamori, Y.; Sudo, R. Biodegradation and adsorption in refractory leachate treatment by the biological activated carbon fluidized bed process. *Water Research*. v.29. pp. 687-694, 1995.

Independent Statistics & Analysis. *The Department of Energy*, 2011. Disponível em: [www.eia.gov](http://www.eia.gov), acessado em 2 fev. 2013.

Iza, J.; Keenan, P. J.; Switzenbaum, M. S. Anaerobic treatment of municipal solid waste landfill leachate: operation of a pilot scale hybrid UASB/AF reactor. *Anais do II Congresso Latino Americano de Biotecnologia*, São Paulo, 1991.

Jordão, E. P.; Pessoa, C. A. Tratamento de esgotos domésticos. 3. ed. Editora ABES, Rio de Janeiro, 1995.

Kennedy, K. J.; Hamoda, U. F.; Guiot, S. G. Anaerobic treatment of leachate using fixed film and sludge bed system. *Journal WPCF*. v.60. pp. 1675-1683, 1988.

Khare, M.; Dondero N. C. Fractionation and concentration from water of volatiles and organics on high vacuum system: Examination of sanitary landfill leachate. *Environment. Science. Technology*, n. 11, v. 8, pp. 814-819, 1977.

Knupp, A. M.; Machado, L. V.; Zdradek, C. P.; Borges, R. M. Tratamento de lixiviado de aterro sanitário por coagulação química. *Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Espírito Santo*, 2009.

Lema, J. M.; Mendez, R.; Blazquez, R. Characteristics of landfill leachates and alternatives for their treatment: a review. *Water, Air and Soil Pollution*, v.40, pp. 223–250, 1988.

Levine, A. D.; Tchobanoglous, G.; Copa, W. M.; Garzonetti, G. Improved industrial wastewater treatment through particle size management using leachate treatment as a case study. *40<sup>th</sup> Industrial Waste Conference*, 1985.

Lisk, D. J. Environmental effects of landfills. *The Science of the Total Environment*. v.100. pp. 415–468, 1991.

Lorenzi, J. L. S. Aquapolo Ambiental – Uma parceria de Sucesso. *Apresentação da Unidade de Negócios de Tratamento de Esgotos da SABESP*, 2008.

Manual Hach, 1995. Espectrofotômetro Hach DR2000. Disponível em: <http://www.hach.com/download>, acesso em: 02.fev.2013.

Melo, M. C. Uma análise de recalques associada a biodegradação no aterro de resíduos sólidos da Muribeca. *Dissertação de Mestrado*. Universidade Federal de Pernambuco. 2003.

Metcalf; Eddy. Wastewater Engineering: treatment, disposal and reuse. *New York: McGraw-Hill*. 3. ed., New Delhi, 1995.

Morais, J. L.; Sirtori, C.; Peralta-Zamora, P. G. Tratamento de chorume de aterro sanitário por fotocatalise heterogênea integrada a processo biológico convencional. *Química Nova*. v.29, nº1. pp.20-23, 2006.

Nagashima, L. A.; Júnior, C. B.; Fujimura, A. S.; Recanello T. D. Tratamento de lixiviado com coagulante orgânico derivado do tanino e caracterização do lodo gerado. *Anais do 25ª Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*. 2009.

Nogueira, L.H.R.; Ávila G.M. Uso de esgotos sanitários da ETE penha nas indústrias próximas. *Anais do VIII Congresso Nacional de Meio Ambiente*, 2011.

O’Leary, P.; Tansel B. Leachate control and treatment. *Waste Age*, v. 11, pp. 68-82, 1986.

Oliveira, M. R. L.; Mota, S. Caracterização do Percolado do Lixão do Jangurussu, Fortaleza/Ceará. *Revista Limpeza Pública – ABLP*. nº48. 1998.

Pavanelli, G. Eficiência de diferentes tipos de coagulantes na coagulação, floculação e sedimentação de água com cor ou turbidez elevada. *Dissertação de Mestrado*. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo-USP, São Carlos, 2001.

Pedroso, K.; Tavares, C. R. G.; Janeiro, V.; Da Silva, T. L.; Dias, P. Z. Avaliação do tratamento do lixiviado do aterro sanitário de Maringá, Paraná, por processo de coagulação/floculação com TANFLOC SG. *Revista Brasileira e Tecnologia*. v. 4, pp.87-98, 2012

Política Nacional de Resíduos Sólidos. Brasil: Lei Federal nº 12.305 de 02 de agosto de 2010.

Ramos, R.; Silva, L. A.; Aquino, F. S.; Paiva, T. O.; Costa, A. C. P. Estudo da viabilidade do reuso de efluentes sanitários tratados para fins não potáveis. 23º *Congresso Brasileiro de Eng. Sanitária e Ambiental ABES*, 2005.

Romano, M. Otimização econômica do uso do esgoto tratado: análise do tratamento das águas de reuso. *Dissertação de mestrado* – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE – Rio de Janeiro, 2010.

Santos, A. F. M. L.; Kato, M. T.; Florencio, L.; Avaliação da biodegradabilidade anaeróbia e do tratamento de chorume através de reator UASB em escala experimental. *Anais do 22º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*. 2003.

Santos, G. O. Resíduos sólidos domiciliares, ambiente e saúde: (Inter)relações a partir da visão dos trabalhadores do sistema de gerenciamento de resíduos sólidos de Fortaleza/CE. *Dissertação de Mestrado*. Universidade Federal do Ceará. 2008.

Schalch, V. Produção e características do chorume em processo de decomposição de lixo urbano. *Dissertação de Mestrado*. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo - USP. São Carlos, 1984.

Segato, L. M.; Da Silva, C. L. Caracterização do Chorume do Aterro Sanitário de Bauru. *XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental*, 2000.

Serafim, A. C.; Gussakov, K. C.; Silva, F.; Coneglian, C. M. R.; Brito, N. N.; Dragoni Sobrinho, G.; Tonso, S.; Pelegrini, R. Chorume, Impactos Ambientais e Possibilidades



de Tratamentos. *III Fórum de Estudos Contábeis, Faculdades Integradas Claretianas*, 2003.

Silva, A. C. Tratamento do Percolado de Aterro Sanitário e Avaliação da Toxicidade. *Dissertação de Mestrado* - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE - Rio de Janeiro, 2002.

Silva, S. M. C. P.; Fernandes, F.; Leone, G. Possibilidade se tratamento físico-químico para redução da carga orgânica e precipitação de metais pesados do chorume produzido em aterro sanitário. *Anais do IX Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*. 2000.

Tchbanoglous, G.; Burton, F. L.; Stensel, H. D. Wastewater engineering: treatment and reuse. *4th ed. New York: Metcalf & Eddy Inc.*, 2003.

Trindade, T.; Manuel R., Protocolo experimental: Ensaio de Tratabilidade em Águas Residuais (Tratamentos Físico-Químicos: Coagulação/Floculação). *Secção de Ambiente e Qualidade*. Lisboa, Portugal, 2006.

Vaz, L. G. L. Performance do processo de coagulação/floculação no tratamento do efluente líquido gerado na galvanoplastia. *Dissertação de Mestrado*. EQ/UNIOESTE, Toledo, PR, 2009.

Vianna, M. R. Hidráulica aplicada às estações de tratamento de água. *Belo Horizonte: Instituto de Engenharia Aplicada*, 2 ed., pp. 344, 1992.