



**Universidade Federal de Alagoas - UFAL**  
**Centro de Tecnologia - CTEC**  
**Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e**  
**Saneamento – PPGRHS**  
Cidade Universitária – Campus A. C. Simões  
Tabuleiro do Martins – CEP 57072-970 – Maceió – Alagoas



ASSOCIAÇÃO DE TRATAMENTOS FÍSICO-QUÍMICOS PARA  
REMOÇÃO DE MATÉRIA ORGÂNICA E COR DE CHORUME  
ESTABILIZADO PRODUZIDO NO LIXÃO DA CIDADE DE MACEIÓ/AL

**VALESKA CAVALCANTE DA COSTA**

Maceió - AL  
Dezembro/2010



**Universidade Federal de Alagoas - UFAL**  
**Centro de Tecnologia - CTEC**  
**Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e**  
**Saneamento – PPGRHS**  
Cidade Universitária – Campus A. C. Simões  
Tabuleiro do Martins – CEP 57072-970 – Maceió – Alagoas



Valeska Cavalcante da Costa

ASSOCIAÇÃO DE TRATAMENTOS FÍSICO-QUÍMICOS PARA  
REMOÇÃO DE MATÉRIA ORGÂNICA E COR DE CHORUME  
ESTABILIZADO PRODUZIDO NO LIXÃO DA CIDADE DE MACEIÓ/AL

Orientadora: Professora Dra. Selêude Wanderley da Nóbrega

Co-Orientador: Professor Dr. Christiano Cantarelli Rodrigues

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento da Universidade Federal de Alagoas, como parte dos requisitos necessários à obtenção do Título de Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento.

Maceió - AL

Dezembro/2010

**Catálogo na fonte**  
**Universidade Federal de Alagoas**  
**Biblioteca Central**  
**Divisão de Tratamento Técnico**  
**Bibliotecária Responsável: Maria Auxiliadora G. da Cunha**

C837a Costa, Valeska Cavalcante da.  
Associação de tratamentos físico-químicos para remoção de matéria orgânica e cor de chorume estabilizado produzido no lixão da cidade de Maceió/AL / Valeska Cavalcante da Costa. – 2010.  
81 f. : il.

Orientador: Selêude Wanderley da Nóbrega.  
Co-Orientador: Christiano Cantarelli Rodrigues.  
Dissertação (mestrado em Engenharia : Recursos Hídricos e Saneamento) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2010.

Bibliografia: f. 76-79.

1. Bacias hidrográficas – Maceió (AL). 2. Riacho Reginaldo (AL). 3. Escoamento. 4. Urbanização. I. Título.

CDU: 556.18(813.5)



Universidade Federal de Alagoas – UFAL  
Centro de Tecnologia – CTEC  
Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamentos – PPGRHS  
Campus A. C. Simões, Av. Lourival de Melo Mota, S/N  
Tabuleiro do Martins – CEP 57072-970 – Maceió – Alagoas  
Tel/Fax: (82) 3214-1279  
E-mail: ppgrhs@yahoo.com  
Homepage://www.ctec.ufal.br/posgraduacao/ppgrhs

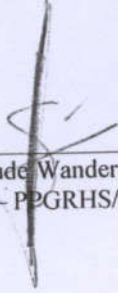


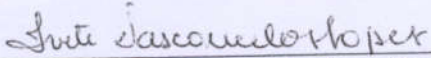
**ASSOCIAÇÃO DE TRATAMENTOS FÍSICO-QUÍMICOS PARA REMOÇÃO  
DE MATÉRIA ORGÂNICA E COR DE CHORUME ESTABILIZADO  
PRODUZIDO NO LIXÃO DA CIDADE DE MACEIÓ/AL**

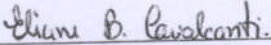
**VALESKA CAVALCANTE DA COSTA**

Dissertação submetida à banca examinadora do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento da Universidade Federal de Alagoas e aprovada no dia 20 de dezembro do ano de 2010.

Banca Examinadora:

  
\_\_\_\_\_  
Profª Drª Selêde Wanderley da Nóbrega  
Orientadora – PPGRHS/CTEC/UFAL

  
\_\_\_\_\_  
Profª Drª Ivete Vasconcelos Lopes Ferreira  
PPGRHS/CTEC/UFAL

  
\_\_\_\_\_  
Profª Drª Eliane Bezerra Cavalcanti  
(ITP/UNIT)

## DEDICATÓRIA

Dedico a todos que me incentivaram nesta caminhada, em especial ao meu filho Vitor Gabriel, significado do verdadeiro amor.

## **AGRADECIMENTOS**

A minha mãe e ao Valter pelo apoio e incentivo.

A minha orientadora Selêude, por toda força e confiança em mim depositada, as quais foram fundamentais para se chegar na reta final desta caminhada.

Ao co-orientador Cristiano, pela assistência dada durante a execução da dissertação.

Aos professores do PPGRH, em especial ao Prof<sup>o</sup> Roberaldo Carvalho de Souza, que sempre me incentivou e me orientou com seus sábios conselhos.

A Nélia e a todos os amigos da CASAL pela compreensão e incentivo.

A todos os colegas que me ajudaram (Diego, Florilda, Magaly Vieira, Alson, entre outros) que de forma direta ou indireta também contribuíram nesta batalha.

A DEUS por ter permitido este momento.

Enfim, meus sinceros agradecimentos.

## RESUMO

O aterro sanitário é o método mais empregado para a disposição final dos resíduos sólidos urbanos (RSU) no mundo. Ao serem enterrados os mesmos sofrem processos físico-químicos e biológicos, provocando a degradação da fração orgânica que, juntamente com água da chuva, são os responsáveis pela geração de um líquido altamente contaminado, denominado chorume. O tratamento desse efluente é um dos desafios do gerenciamento dos RSU, visto que o mesmo apresenta características de um poluidor em potencial, além de ser de difícil tratamento. Na tentativa de atenuar os problemas ambientais causados por este lixiviado, pesquisadores vêm estudando diferentes técnicas de tratamento. A escolha da técnica mais adequada depende de vários fatores, exigindo muitas vezes a associação de mais de uma técnica para que a qualidade do efluente final atinja os padrões requeridos. Neste estudo três tratamentos físico-químicos foram avaliados, isoladamente e combinados, na remoção da cor verdadeira e demanda química de oxigênio (DQO) do chorume. O chorume objeto do estudo foi coletado no lixão de Maceió, cuja caracterização mostrou que o mesmo é um poluidor em potencial, não podendo ser lançado em corpos d'água receptores, sem prévio tratamento, sob pena de gerar grandes impactos ambientais. Esses dados também mostraram que esse resíduo é recalcitrante, devido à baixa relação DBO/DQO e a alta concentração de nitrogênio amoniacal e, possivelmente, resistente ao tratamento biológico. Os tratamentos físico-químicos estudados, acidificação, coagulação e adsorção em carvão ativado, mostraram-se capazes de remover uma grande parcela de DQO e cor deste lixiviado. A análise dos resultados da combinação dos três processos mostrou que, para os níveis utilizados, todas as variáveis estudadas foram significativas sobre as respostas avaliadas. A combinação dos processos envolvidos que resultou em maior remoção de matéria orgânica e cor do chorume se deu em pH 5, concentração de PAC de 500 mg/L e concentração de carvão ativado de 5,0 g/L. Neste caso, as remoções experimentais de cor e DQO foram 99,9% e 88,1%, respectivamente, sugerindo que a combinação dos tratamentos aqui avaliados constitui uma promissora alternativa de tratamento para chorume oriundo de resíduos em estado avançado de degradação.

**Palavras-chaves:** chorume, coagulação, adsorção, acidificação.

## ABSTRACT

The sanitary landfill is the most used method for the final disposal of municipal solid wastes (MSW) in the world. As this waste is buried, it undergoes physicochemical and biological processes, causing degradation of the organic fraction, which combined with percolating rainwater, results in a highly liquid called leachate. The treatment of this effluent is one of the challenges of managing MSW, since it presents characteristics of a potential polluter and besides of the difficult of treatment. In attempt to reduce the environmental problems caused by this leachate, researchers have been studying different treatment techniques. The choice of the appropriate technique depends on several factors, often requiring the association of more than one treatment in order to the final effluent quality to reach the required standards. In this study three physicochemical treatments were evaluated, separately and combined, in the removal of true colour and chemical oxygen demand (COD) of the leachate. The leachate samples were collected at the landfill of Maceió, whose characterization showed that it is a potential polluter, for this reason cannot be released into surface water receivers without previous treatment, with the possibility to generate large environmental impacts. These data also showed that this residue is recalcitrant due to the low BOD/COD ratio and high ammonium nitrogen concentration and, possibly, resistant to biological treatment. The physicochemical treatments studied (acidification, coagulation and activated carbon adsorption) showed to be able to remove a large portion of COD and colour of the leachate. The results from the combination of the three cases showed that for the levels used, all variables were significant on the measured responses. The combination of the processes that resulted in higher removal of organic matter and colour of the leachate occurred at pH 5, concentration of PAC of 500 mg/L and activated carbon concentration of 5.0 g/L. In this case, experimental removals of colour and COD were 99.9% and 88.1%, respectively, suggesting that the combination of treatments evaluated here is a promising alternative treatment for leachate from the waste in an advanced state of degradation.

**Keywords:** leachate, coagulation, adsorption, acidification



## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Fotos do lixão de Maceió, localizado no bairro de Cruz das Almas - (a) 04/Set/2002; (b) 24/Out/2002; (c) 17/Jun/2004.....	10
Figura 4.1 - Ponto de coleta das amostras de chorume no lixão de Maceió - Al.....	24
Figura 4.2 - Sequência da combinação de processos no tratamento do chorume.....	28
Figura 4.3 - Procedimento experimental dos testes cuja combinação de tratamentos ocorria.....	30
Figura 5.1 - Comportamento dos parâmetros alcalinidade total e nitrogênio amoniacal em amostras de chorume.....	37
Figura 5.2 - Efeito da acidificação do chorume na remoção de DQO e cor (pH = 8,3).....	39
Figura 5.3 - Efeito da concentração de policloreto de alumínio (PAC) na remoção de DQO e cor do chorume (pH = 8,3).....	41
Figura 5.4 - Efeito da concentração de carvão ativado na remoção de DQO e cor do chorume (pH = 8,3).....	43
Figura 5.5 - Efeito da combinação da coagulação e da adsorção na remoção de DQO do chorume (pH = 8,3).....	44
Figura 5.6 - Efeito da combinação da coagulação e da adsorção na remoção de cor do chorume (pH = 8,3).....	45
Figura 5.7 - Remoção de cor do chorume pelos processos de coagulação e adsorção em carvão ativado, aplicados de forma isolada e associada.....	46
Figura 5.8 - Valores preditos pelo modelo comparados com aqueles obtidos experimentalmente para a remoção de DQO.....	50
Figura 5.9 - Valores preditos pelo modelo comparados com aqueles obtidos experimentalmente para a remoção de cor.....	50
Figura 5.10 - Influência da concentração do PAC e do carvão ativado, na remoção de DQO, para pH = 3,0.....	52
Figura 5.11 - Influência da concentração do PAC e do carvão ativado, na remoção de DQO, para pH = 5,0.....	52
Figura 5.12 - Influência da concentração do PAC e do carvão ativado, na remoção de DQO, para pH = 7,0.....	53
Figura 5.13 - Influência da concentração do PAC e do carvão ativado, na remoção de cor, para pH = 3,0.....	53

Figura 5.14 - Influência da concentração do PAC e do carvão ativado, na remoção de cor, para pH = 5,0.....	54
Figura 5.15 - Influência da concentração do PAC e do carvão ativado, na remoção de cor, para pH = 7,0.....	54
Figura 5.16 - Remoção de cor do chorume pelos processos de acidificação (pH = 3), coagulação e adsorção em carvão ativado, aplicados de forma combinada.....	55

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Caracterização do lixiviado produzido em função da idade dos resíduos.....	8
Tabela 4.1 - Análises físico-químicas, métodos analíticos e principais equipamentos.....	25
Tabela 4.2 - Características texturais do carvão ativado usado.....	26
Tabela 4.3 - Características químicas da amostra de carvão ativado.....	26
Tabela 4.4 - Níveis das variáveis dos processos físico-químicos avaliados e seus respectivos valores codificados...	28
Tabela 4.5 - Planilha dos ensaios do planejamento experimental $3^3$ .....	29
Tabela 5.1 - Resumo da caracterização das 31 amostras de chorume coletadas no período de Dezembro/2003 a Dezembro/2008.....	31
Tabela 5.2 - Características da amostra de chorume utilizada nos testes de tratamento.....	39
Tabela 5.3 - Coeficientes de regressão do modelo polinomial quadrático para a variável dependente remoção de DQO.....	48
Tabela 5.4 - Coeficientes de regressão do modelo polinomial quadrático para a variável dependente remoção de cor.....	49
Tabela A.1 - Resultados das caracterizações das amostras de chorume coletadas no lixão de Maceió.....	68
Tabela A.2 - Resultados experimentais do tratamento do chorume.....	71

## SUMÁRIO

<b>RESUMO</b> .....	iii
<b>ABSTRACT</b> .....	iv
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	v
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	vii
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	1
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	5
2.1 - Geral.....	5
2.2 - Específicos.....	5
<b>3 REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	6
<b>4 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	23
4.1 Chorume.....	23
4.1.1 Preservação das amostras de chorume.....	23
4.1.2 Caracterização das amostras de chorume.....	24
4.2 Adsorvente.....	25
4.3 Coagulante.....	26
4.4 Metodologia dos testes experimentais de tratamento..	27
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	31
5.1 Caracterização do chorume.....	31
5.2 Tratamento do chorume.....	38
5.2.1 Efeito da acidificação na remoção de DQO e cor do chorume.....	39
5.2.2 Efeito da coagulação na remoção de DQO e cor do chorume.....	40
5.2.3 Efeito da adsorção em carvão ativado na remoção de DQO e cor do chorume.....	42
5.2.4 Efeito da combinação dos tratamentos na remoção de DQO e cor do chorume.....	46
<b>6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES</b> .....	56
<b>7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	58
<b>APÊNDICE</b> .....	67

## 1 INTRODUÇÃO

O aterro sanitário, segundo El-Fadel et al. (1997), apud Kurniawan et al. (2006a), é o método mais amplamente empregado para disposição final dos resíduos sólidos urbanos (RSU), sendo mais de 95% dos RSU gerados em todo o mundo dispostos desta forma. Ao serem enterrados os resíduos sofrem processos físico-químicos e biológicos, provocando a degradação da fração orgânica que, juntamente com água da chuva que por ai percola, são os responsáveis pela geração de um líquido, comumente, denominado chorume.

Esse efluente líquido, altamente poluidor, gerado em locais de disposição de resíduos sólidos é consequência de uma complexa gama de interações entre fatores relacionados com o local de disposição do lixo, da composição do rejeito e da forma de disposição do mesmo. É um líquido escuro de odor desagradável e elevado poder de poluição. Sua composição é complexa, contendo contaminantes orgânicos e inorgânicos, o que confere ao mesmo características de um grande gerador de impactos ambientais.

A Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (PNSB), ano base de 2008, revela que são coletadas 183 mil toneladas de resíduos domiciliares e/ou públicos diariamente no Brasil. Observando-se a destinação final dos resíduos, os vazadouros a céu aberto (lixões) constituem o destino final dos resíduos sólidos em 50,8% dos municípios brasileiros. É possível ainda observar nesta pesquisa que os municípios com serviços de manejo dos resíduos sólidos situados na Região Nordeste registraram a maior proporção de destinação desses resíduos aos lixões (89,3%). Nesse sentido, destacaram-se negativamente os municípios dos Estados do Piauí, Maranhão e Alagoas, os quais respondem pelos seguintes percentuais de destinação em lixões, 97,8%, 96,3% e 96,1%, respectivamente (IBGE, 2010).

É bem verdade que os números apresentados pelo IBGE não retratam a real situação da destinação final dos resíduos no Brasil, uma vez que esses dados são compilados a partir de informações fornecidas pelas Prefeituras dos Municípios, as quais nem sempre apresentam as informações corretas, visto que a

realidade, muitas das vezes, é omitida por parte dos Prefeitos, ou por falta de informação ou para esconder problemas devidos a má administração na questão da disposição final dos resíduos. Ainda assim, deve-se ressaltar que a preocupação com a correta destinação do lixo vem aumentando, sobretudo nos grandes centros geradores, onde a opinião pública e a ação de órgãos fiscalizadores têm maior poder de interferência (Rodrigues, 2004).

Até pouco tempo o lixo da cidade de Maceió era disposto em um lixão a céu aberto localizado no bairro de Cruz das Almas que, segundo técnicos da Superintendência de Limpeza Urbana de Maceió (SLUM), recebia diariamente cerca de 1200 toneladas de lixo. Embora alguns o denominassem de aterro controlado, o mesmo não oferecia cobertura diária do lixo ali depositado. O chorume aí gerado não recebe qualquer tratamento, sendo apenas captado em lagoas naturais, que em períodos de chuva transbordam e, diluído pelas águas pluviais, é lançado num corpo receptor, o Riacho da Grota do Arroz, afluente do Riacho Águas do Férreo que por sua vez deságua na Praia de Cruz das Almas, o que eleva ainda mais a possibilidade de contaminação das águas subterrâneas e de superfície por este lixiviado. Essa constatação fere a legislação brasileira, visto que a Resolução CONAMA Nº 357/2005, estabelece no seu Art. 24 que os efluentes de qualquer fonte poluidora somente poderão ser lançados, direta ou indiretamente, nos corpos de água, após o devido tratamento e desde que obedeçam às condições, padrões e exigências dispostos nesta Resolução e em outras normas aplicáveis.

A desativação recente do antigo lixão de Maceió e a inauguração da primeira célula do Aterro Sanitário de Maceió projetam um futuro mais animador em relação aos resíduos sólidos desta capital. Contudo o gerenciamento do chorume em ambos os estabelecimentos devem contemplar o tratamento adequado do mesmo, haja vista que ambos são e continuarão sendo geradores de tal efluente por várias décadas.

A complexidade do chorume, que contém compostos orgânicos perigosos, metais pesados e microrganismos nocivos à saúde humana, reflete também no seu tratamento, uma vez que a

composição deste percolado é bastante variada, conforme pode ser observado na literatura (Sletten et al., 1995; Lo, 1996; Pessin et al., 1997; Bidone et al., 1997; Neto e Mota, 1999; Tatsi e Zouboulis, 2002, El-Fadel et al., 2002; Renou et al., 2008; Ghafari et al., 2009; Cotman e Gotvajn, 2010), tornando o seu tratamento um desafio.

O tratamento desse efluente é dessa forma um dos grandes desafios do gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos, visto que o mesmo apresenta características que o torna um poluidor em potencial, além de ser de difícil tratamento. Muitas vezes o seu tratamento exige a associação de processos físicos, químicos e biológicos, para um tratamento efetivo, visto que não existem processos economicamente viáveis que permitam reduzir todos os parâmetros ambientalmente relevantes da matriz do chorume (Morais et al., 2006), dada a complexidade e o alto grau poluidor deste efluente.

Em virtude destes aspectos peculiares, não existe ainda um tratamento eficiente e único, capaz de tratar o chorume de um modo geral, levando dessa forma os pesquisadores (Imai et al, 1995; Timur e Öztürk, 1999; Lin e Chang, 2000; Trebouet et al., 2001; Wang et al., 2002; Kruminis et al., 2002; Sancinetti et al., 2002; Couto e Braga, 2003; Campos et al., 2003; Santos e Coelho, 2003; Uygur e Kargi, 2004; Morais e Zamora, 2005; Ntampou et al., 2006; Silva Jr., 2007) a estudar as mais diversas técnicas de tratamento deste lixiviado.

Os processos biológicos de tratamento, aeróbios e anaeróbios, têm sido aplicados para reduzir efetivamente a carga poluidora de chorume gerado em aterros sanitários jovens. Entretanto, a principal fração de contaminantes de chorume oriundo de aterros maduros é composta de substâncias biologicamente refratárias como, por exemplo, as substâncias húmicas, exigindo, portanto, a associação de outras técnicas de tratamento para que a qualidade do efluente final adquira os padrões requeridos. Kurniawan et al (2006a) avaliaram o desempenho de diversas técnicas físico-químicas no tratamento de chorume para remoção de contaminantes recalcitrantes. Nesse estudo os autores evidenciaram que nenhuma das técnicas

aplicadas individualmente é universalmente aplicável ou altamente eficiente para a remoção de compostos recalcitrantes de chorume oriundo de resíduos estabilizados.

Dentro desse contexto, esta dissertação teve como objetivo geral estudar a tratabilidade do chorume gerado no lixão da cidade de Maceió/AL, através da combinação de processos físico-químicos. Mais especificamente, foram também objetivos deste estudo a caracterização de algumas amostras de chorume produzido no lixão de Maceió, através de determinações de parâmetros analíticos para identificar o seu potencial poluidor, assim como, a identificação do conjunto de níveis das variáveis de operação dos processos envolvidos (acidificação, coagulação e adsorção em carvão ativado), quando aplicados de forma combinada, que maximiza a remoção de matéria orgânica e cor verdadeira do chorume.



## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 GERAL**

Contribuir para um melhor controle da poluição ambiental provocada por lixiviados gerados em lixões e aterros sanitários, através do estudo da tratabilidade do chorume gerado no lixão de Maceió, mediante a associação de tratamentos físico-químicos.

### **2.2 ESPECÍFICOS**

- caracterizar amostras de chorume gerado no lixão da cidade de Maceió, de modo a identificar o seu potencial poluidor;

- avaliar o uso isolado e associado de tratamentos físico-químicos (acidificação, coagulação e adsorção em carvão ativado) na remoção de matéria orgânica e cor em chorume estabilizado, visando a identificação dos níveis das variáveis destes tratamentos, pH do meio, concentração de coagulante e concentração de carvão ativado, respectivamente, que maximizam essas remoções.

### 3 REVISÃO DA LITERATURA

O rápido desenvolvimento econômico dos últimos anos tem tido como uma das suas consequências negativas a geração excessiva de resíduos sólidos urbanos (RSU), a qual tem sido identificada como um dos mais sérios problemas ambientais em todo o mundo, que necessita de solução urgente visando à proteção ambiental (Kurniawan e Lo, 2009).

O gerenciamento destes resíduos é um dos grandes desafios dos órgãos responsáveis pela sua administração, haja vista que os mesmos apresentam composição bastante heterogênea, produção constante e, via de regra, cada dia crescente. Uma das principais problemáticas relacionadas a esses resíduos é a escolha do método de tratamento e de disposição final adequada dos mesmos, além do inconveniente da geração de lixiviados nos aterros sanitários e lixões.

Os aterros sanitários continuam a ser largamente aceitos e usados em vários países do mundo como forma de disposição final dos resíduos sólidos urbanos. Este método geralmente oferece baixo custo de operação e manutenção quando comparado com outros. Contudo, a migração de lixiviados do aterro sanitário poderá ser uma fonte potencial de contaminação das águas de superfície e subterrâneas.

O potencial de formação de chorume pode ser determinado através do balanço hídrico no aterro, que corresponde à soma de quantidades de água que entram e a subtração de quantidades de água que são consumidas nas reações químicas além da quantidade de água que deixa o aterro como vapor. O potencial corresponde, portanto, à quantidade de água que excede a capacidade de retenção de umidade da massa aterrada (Hamada, 1997).

Num lixão, de forma simplificada, a quantidade de lixiviado gerado depende especialmente de dois fatores: da massa de água que ingressa no lixão na forma de umidade dos resíduos e da massa de água advinda do meio externo, como por exemplo, aquela resultante da precipitação pluviométrica. Somados a estes dois fatores tem-se também a geração líquida de água proveniente dos processos bioquímicos de decomposição dos resíduos ali

presentes.

O primeiro fator é função especialmente da composição dos resíduos sólidos gerados pela comunidade em questão, bem como das condições climáticas locais, uma vez que períodos de intensa precipitação pluviométrica podem incrementar severamente o teor de umidade dos resíduos, devido à forma de acondicionamento destes nos locais de geração.

Os resíduos sólidos produzidos em Maceió, segundo um estudo realizado por Cavalcante et al. (1997), possuem uma umidade média de 48,6%, o que para uma geração de 1.200 ton/dia, significa uma contribuição de algo em torno de 583 ton/dia de água, apenas em função deste fator.

O segundo fator depende da hidrologia, climatologia, da operação do lixão além da existência de obras de engenharia relacionadas à drenagem de águas no local.

A literatura apresenta resultados de caracterização de lixiviados gerados em diferentes aterros no Brasil e no mundo, conforme exemplificado nos trabalhos de Imai et al. (1995), Pessin et al. (1997), Neto e Mota (1999), Tatsi e Zouboulis (2002) e Renou et al. (2008).

É possível constatar destes estudos que as características do chorume apresentam uma variação muito ampla, cujos fatores relacionados a este fato são os mais diversos. A Tabela 3.1, adaptada de Renou et al. (2008), apresenta um resumo das principais características do chorume em função da idade dos resíduos. Dessa tabela é possível verificar que à medida que o aterro vai envelhecendo as características do lixiviado gerado vão se alterando e dessa forma necessitando de tratamentos diferenciados.

Em virtude destes aspectos peculiares não existe ainda um tratamento eficiente e único capaz de tratar o chorume de um modo geral, levando dessa forma os pesquisadores a estudar as mais diversas técnicas de tratamento de águas residuárias para o tratamento deste lixiviado.

Filho et al. (2001) comentam que no Brasil o chorume, em geral, é coletado nos aterros sanitários e transportado, em caminhões pipa, para Estações de Tratamento de Esgotos (ETEs),

onde é submetido à degradação microbiológica, sendo posteriormente lançado, juntamente com o esgoto tratado em águas superficiais. Segundo eles, uma vez que as identidades dos compostos presentes no chorume são desconhecidas, não há como prever se este tratamento é eficiente.

O chorume objeto desse estudo foi gerado no lixão da cidade de Maceió, cujos parágrafos seguintes irão dar uma breve visão desse lixão assim como uma perspectiva da atual realidade dos resíduos sólidos urbanos desta cidade.

Tabela 3.1 - Caracterização do lixiviado produzido em função da idade dos resíduos

<b>Parâmetro</b>	<b>Novo</b>	<b>Intermediário</b>	<b>Velho</b>
Idade (anos)	< 5	5 - 10	> 10
pH	6,5	6,5 - 7,5	> 7,5
DQO (mg/L)	> 10000	4000 - 10000	< 4000
DBO <sub>5</sub> /DQO	> 0,3	0,1 - 0,3	< 0,1
Compostos orgânicos	80 % de ácidos graxos voláteis	5 - 30 % de ácidos graxos voláteis + ácidos húmicos e fúlvicos	Ácidos húmicos e fúlvicos
Biodegradabilidade	Importante	Média	Baixa

Adaptada de Renou et al. (2008)

O lixo coletado na cidade de Maceió (algo em torno de 1200 toneladas ao dia) era disposto, até o início deste ano, em condições impróprias no "lixão" de Cruz das Almas. Essa forma de destinação final, ou seja, o lançamento a céu aberto (lixão) na qual os resíduos são simplesmente descarregados sobre o solo, sem medidas de proteção ao meio ambiente ou à saúde pública, facilita a proliferação de vetores (moscas, mosquitos, baratas e ratos), geração de maus odores e a poluição das águas superficiais e subterrâneas.

Segundo Calheiros et al. (2004), o lixo de Maceió vinha sendo disposto neste vazadouro, que ocupa uma área de 33 ha, há mais de três décadas. Neste estudo foram identificados sérios problemas ambientais, aliados àqueles de ordem social, tais como:

- Presença de catadores de lixo trabalhando em condições sub-humanas;
- Ausência de cobertura dos resíduos sólidos ali depositados;
- Existência de taludes de lixo descoberto de significativa altura e de elevada inclinação;
- Presença de vetores e micro-vetores transmissores de doenças;
- Presença de aves (urubus), equinos e suínos que se alimentam dos resíduos;
- Ausência de redes de drenagem de percolado e de gases;
- Possível contaminação do subsolo por inexistência de impermeabilização na base do vazadouro;
- Emissão de odores desagradáveis (fogo, fumaça, etc);
- Existência de área alagada, devido à inexistência de tanques de contenção de lixiviado, propiciando assim o acúmulo de percolado na base do vazadouro.

Muitos dos problemas relatados por Calheiros et al. (2004) foram observados quando da execução desse projeto e de outros realizados em anos anteriores, conforme pode ser visto na Figura 3.1. Essas fotos foram tiradas no lixão de Maceió, onde é possível se observar, a queima espontânea do lixo, a falta de um sistema adequado de drenagem do lixiviado, além da presença de animais e catadores, entre eles crianças.

Diante dos problemas de ordem social e ambiental provocados pelo lixão, além da própria exaustão do mesmo, a Superintendência de Limpeza Urbana de Maceió (SLUM) deparou-se com a necessidade de buscar uma nova e correta forma de disposição desses resíduos. Após a realização de estudo de impacto ambiental e de grandes discussões acerca dessa problemática, uma nova área para disposição dos resíduos sólidos urbano da cidade de Maceió foi escolhida, cuja tecnologia adotada foi a do aterro sanitário.

Em abril do presente ano foi inaugurada a primeira célula do aterro sanitário de Maceió, localizado no bairro do Benedito Bentes, ocorrendo em paralelo a desativação do lixão de Cruz das

Almas. O atual aterro foi projetado para receber 1400 toneladas de lixo/dia com uma vida útil prevista de 20 anos. O projeto prevê a construção de quatro células, cada uma com vida útil de 5 anos, e contempla também a transformação do antigo lixão em um Parque Sócio Ambiental (Calheiros et al., 2004).

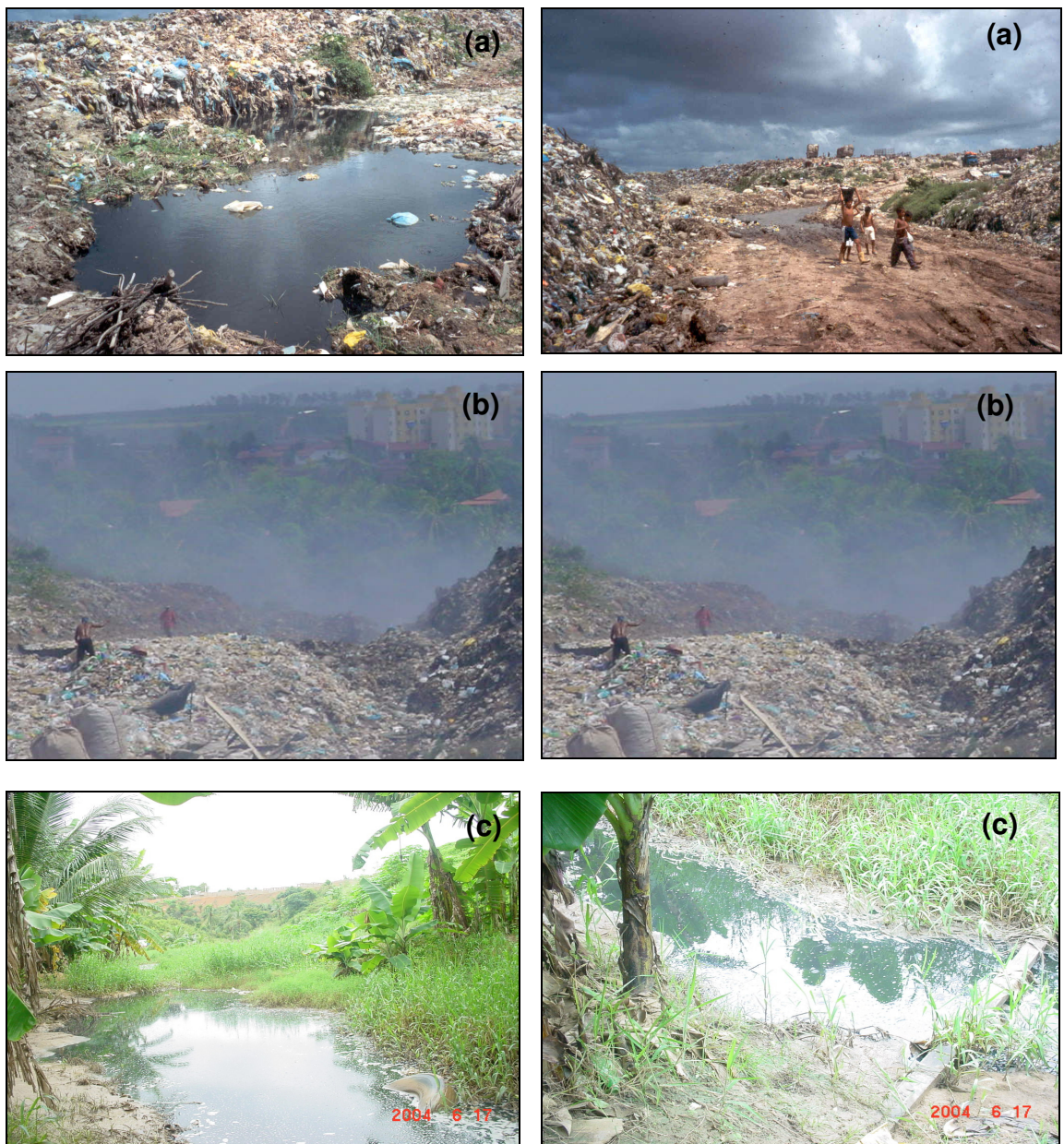


Figura 3.1 – Fotos do lixão de Maceió, localizado no bairro de Cruz das Almas – (a) 04/Set/2002; (b) 24/Out/2002; (c) 17/Jun/2004

Embora a destinação final dos resíduos sólidos da cidade de Maceió tenha hoje uma realidade um pouco mais privilegiada, o

inconveniente da geração de chorume, tanto no antigo lixão quanto no novo aterro sanitário, é uma realidade que vamos ter que enfrentar por várias décadas. Nesse contexto, faz-se necessário que os mesmos sejam tratados e dispostos de forma tecnicamente segura, minimizando os possíveis impactos negativos ao meio ambiente.

Os lixiviados apresentam, de um modo geral, uma composição/concentração bastante variada que está intimamente relacionada com as características dos resíduos sólidos ali depositados, as condições climáticas regional, a idade dos resíduos, além das condições operacionais e de projeto do local de disposição dos resíduos, conforme comenta Enzminger et al. (1987) a partir de dados observados na literatura.

Os microrganismos são os principais agentes nos processos de degradação e reciclagem de nutrientes. A incapacidade desses microrganismos em degradar ou transformar essas substâncias é o indício de sua recalcitrância ou persistência no meio ambiente. No chorume é comum associar a sua recalcitrância à presença de compostos de elevada massa molecular com estruturas muito complexas como, por exemplo, as substâncias húmicas. As substâncias húmicas constituem uma importante fração do material orgânico dissolvido nas águas naturais. São definidas como macromoléculas polifuncionais que alteram com frequência as suas conformações em função das interações que ocorrem entre os grupos funcionais presentes na sua estrutura. Essas substâncias possuem estruturas complexas e heterogêneas, compostas de carbono, oxigênio, hidrogênio e algumas vezes pequenas quantidades de nitrogênio, fósforo e enxofre. Ocorrem nos solos e águas naturais como consequência da decomposição de resíduos de plantas e animais através de processos químicos, físicos e biológicos (Silva, 2002).

Filho et al. (2001) estudaram a presença de compostos orgânicos em lixiviados de aterro sanitário, mais precisamente do aterro sanitário da cidade de Gravataí (RS), o qual recebe lixo domiciliar e industrial. Neste estudo eles concluíram que a presença de compostos orgânicos suspeitos de atuarem como estrógenos ambientais (ftalatos e bisfenol), compostos de ação

antioxidante (benzotiazolona) e compostos que atuam como princípios ativos de medicamentos (bensixazol) nas amostras estudadas são fatores preocupantes com relação ao meio ambiente, uma vez que os limites de tolerância em ambientes abertos (aterros sanitários) e os efeitos de exposição de longo prazo (contaminação dos mananciais de água potável) a estes compostos são desconhecidos. Concluem também, por outro lado, que a presença de compostos de menor importância ambiental como ácidos carboxílicos também deve ser avaliada com cuidado, uma vez que estes podem promover a lixiviação de metais pesados dos resíduos sólidos ou do próprio terreno onde se encontra o aterro, para o chorume.

Na tentativa de atenuar os problemas ambientais causados por este lixiviado, várias técnicas de tratamento vêm sendo estudadas (Imai et al, 1995; Timur e Özturk, 1999; Lin e Chang, 2000; Trebouet et al., 2001; Wang et al., 2002; Krumins et al., 2002; Sancinetti et al., 2002; Couto e Braga, 2003; Campos et al., 2003; Santos e Coelho, 2003; Uygur e Kargi, 2004; Moraes et al., 2006; Guo et al., 2010; Marañon et al., 2010), cujos principais processos envolvidos são: biológicos (aeróbios e anaeróbios); eletroquímicos; físico-químicos, entre outros, aplicados tanto de forma isolada como combinada.

Kargi e Pamukoglu (2004a) comentam que a combinação de processos físicos, químicos e biológicos, é usualmente usada para um tratamento efetivo do chorume, visto que, segundo eles, é difícil se obter uma remoção de poluentes satisfatória usando-se apenas um destes processos, dada a complexidade e o alto grau de poluição deste efluente.

McArdle et al. (1988), apud Fleck (2003), apresentam uma matriz, a qual relaciona as principais categorias de componentes dos lixiviados com a efetividade de alguns processos de tratamento na sua remoção. Desses resultados é possível constatar que não existe, dentre os sistemas de tratamento citados, um único capaz de atender com efetividade a remoção de todos os constituintes relacionados, reforçando a idéia de que a associação destes processos pode intensificar a eficiência do sistema como um todo.



Tränkler et al. (2005) comentam que o maior obstáculo para um tratamento adequado de lixiviados de aterros é a dificuldade em identificar e quantificar a composição destes efluentes. Dentro deste contexto, Morais e Zamora (2005) comentam que a composição e a concentração de contaminantes no chorume são influenciadas pelo tipo de resíduos depositados, além da idade do aterro. Ressaltam ainda que o chorume oriundo de aterros maduros é muito complexo, apresentando altas concentrações de ácidos húmicos e fúlvicos, assim como sais e baixa relação DBO<sub>5</sub>/DQO.

Alvarez-Vazquez et al. (2004), apud Kurniawan et al. (2006b), comentam que a escolha do tratamento para o chorume depende da composição e características do mesmo, da natureza da matéria orgânica presente, bem como, a idade e estrutura do aterro. Diferentes tecnologias incluindo processos biológicos, físico-químicos, oxidativos avançados (POA), assim como, sistemas naturais têm sido avaliadas em anos recentes, não somente para minimizar os contaminantes tóxicos do chorume, mas também para obedecer aos padrões de descarte em diferentes países.

A técnica mais apropriada para o tratamento do chorume depende das características particulares do mesmo. Forgie et al. (1988), apud Ntampou et al. (2006), comentam que os processos biológicos são muito mais eficientes quando aplicados a chorume novo do que processos físico-químicos, entretanto, chorume estabilizado são mais eficientemente tratados por processos físico-químicos.

A associação de dois ou mais processos físico-químicos foi avaliada no tratamento do chorume por vários pesquisadores (Rivas et al., 2004; Wang et al., 2002; Monje-Ramirez e Velásquez, 2004; Yoon et al., 1998; Zamora et al., 2000; Silva et al., 2004; Trebouet et al., 2001; Meier et al. 2002; Rautenbach e Mellis, 1994; Fetting et al., 1996; Oh et al., 2004; Pirbazari et al., 1996; Palma et al., 2002), cujos resultados obtidos são bastante promissores.

Kurniawan et al. (2006a) fizeram uma ampla revisão da literatura publicada nas duas últimas décadas, referente ao

tratamento físico-químico, para remoção de contaminantes recalcitrantes de chorumes gerados em aterros sanitários. Neste estudo eles evidenciaram que, individualmente, nenhuma das técnicas físico-químicas avaliadas é universalmente aplicável ou altamente eficiente para todos os fins. Ressaltaram ainda a importância de se observar que a seleção da tecnologia de tratamento mais adequada para tratar chorume depende das características do próprio resíduo, dos padrões de lançamento exigido pela legislação ambiental, da eficiência global do sistema comparado a outras tecnologias, da idade do aterro, dentre outros fatores, além das variações temporais na quantidade e composição do chorume, ocasionadas por aspectos sazonais.

A literatura apresenta inúmeros trabalhos referentes ao tratamento de chorume. Os parágrafos a seguir irão destacar alguns destes trabalhos cujos processos de tratamento envolvidos incluem alguma das técnicas de tratamento objeto de estudo da presente pesquisa.

A coagulação/floculação tem sido estudada por diversos pesquisadores (Diamadopolus, 1994; Urase et al., 1997; Amokrane et al., 1997; Tatsi et al., 2003) para a remoção de compostos orgânicos não biodegradáveis e metais pesados contidos em chorumes. O processo de coagulação consiste na desestabilização das partículas através da adição de um coagulante para minimizar as forças repulsivas, sendo necessário muitas vezes realizar um ajuste do pH. Neste processo as partículas aumentam de tamanho, ficando mais pesadas e tendem a sedimentar. Dentre os coagulantes mais utilizados estão os sais de ferro, os sais de alumínio e os polieletrólitos.

A remoção de metais pesados de chorumes estabilizados, contendo altas concentrações de matéria orgânica e inorgânica, foi analisada por Urase et al. (1997), os quais usaram o  $\text{FeCl}_3$  como agente coagulante. Os resultados demonstraram que o processo é bastante eficiente em pH básico.

A combinação dos processos de coagulação e de Fenton para o tratamento de chorume estabilizado, cuja concentração inicial de DQO era de 417 mg/L, foi avaliada por Yoon et al. (1998). Neste

estudo o uso do tratamento isolado da coagulação para a remoção de compostos recalcitrantes, cujo peso molecular era maior do que 500 Da, foi responsável pela remoção de 48% da DQO. A combinação dos tratamentos, ou seja, a coagulação seguida da reação Fenton, aumentou esta remoção para 73%. Os resultados mostram, portanto, que um pré-tratamento, usando o processo de coagulação, auxiliaria de maneira significativa o processo de oxidação Fenton na remoção de compostos orgânicos do chorume.

Rivas et al. (2004) combinaram uma sequência de coagulação/floculação e o processo de oxidação Fenton, com o objetivo de remover as partículas coloidais presentes no chorume. Cerca de 90% de remoção de DQO foi obtida, cuja concentração inicial era de 7400 mg/L, a um pH de 8,5, usando como coagulante o  $\text{FeCl}_3$  numa concentração de 800 mg/L.

Outro estudo do tratamento de chorume estabilizado foi feito por Zamora et al. (2000). Neste estudo eles compararam os processos de coagulação/floculação e oxidação Fenton, associados com a adsorção em carvão ativado. Desse estudo eles concluíram que um pré-tratamento com oxidação Fenton permitiu aumentar, significativamente, a capacidade de adsorção do carvão ativado em comparação com o pré-tratamento por coagulação/floculação. No processo de oxidação ocorre uma transformação de compostos orgânicos de elevado peso molecular em moléculas mais simples, com peso molecular mais baixo. Como consequência estas moléculas menores são capazes de passar com mais facilidade através dos microporos do carvão ativado, favorecendo a sua adsorção.

A eficiência do tratamento de chorume estabilizado foi avaliada por Silva et al. (2004), combinando a coagulação/floculação e a ozonização. Essa combinação mostrou ser bastante eficiente na remoção de nitrogênio amoniacal, alcançando uma remoção total desse parâmetro. Em termos de matéria orgânica, o tratamento empregado foi capaz de remover 48% da DQO inicial do chorume.

Outra aplicação da coagulação/floculação para a remoção de compostos orgânicos não-biodegradáveis em chorumes foi estudada por Amokrane et al. (1997). Neste estudo os pesquisadores utilizaram como agentes coagulantes o cloreto férrico e o

sulfato de alumínio. Os resultados mostraram que esse tratamento foi capaz de remover cerca de 55% e 42% da DQO do chorume, usando o cloreto férrico e o sulfato de alumínio, respectivamente. Esses resultados concordam com os estudos feitos por Diamadopoulous (1994) e ambos os estudos concluíram que o  $\text{FeCl}_3$  é um agente coagulante mais eficiente que o  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ .

A remoção de cor do chorume através dos processos de coagulação/floculação foi objeto de estudo de Aziz et al. (2007). Neste estudo eles utilizaram quatro diferentes coagulantes (sulfato de alumínio, cloreto férrico, sulfato ferroso e sulfato férrico) e concluíram que a faixa ótima de pH para a remoção de cor pelos processos estudados se dá entre 4 e 12, sendo o cloreto férrico o coagulante mais eficiente.

A metodologia de superfície de resposta foi aplicada ao processo de coagulação/floculação, objetivando a otimização do referido processo, no estudo realizado por Ghafari et al. (2009). Neste estudo eles usaram dois diferentes coagulantes, o sulfato de alumínio e o PAC, e concluíram que as condições ótimas do processo foram pH 7,5 e concentração de 2 g/L e pH 7 e concentração de 9,5 g/L, quando do uso do PAC e do sulfato de alumínio, respectivamente. Nestas condições as remoções de DQO e cor foram 43,1 e 90,7%, respectivamente, usando-se o PAC como coagulante e 62,8 e 86,4%, usando-se o sulfato de alumínio.

Entre as diversas técnicas físico-químicas de tratamento de chorume revisadas por Kurniawan et al. (2006a), a adsorção é aquela mais amplamente empregada para a remoção de compostos orgânicos recalcitrantes e vem sendo objeto de estudo de vários pesquisadores (Fetting, 1996; Morawe et al., 1995; Wasay et al., 1999; Aziz et al., 2004; Imai et al., 1995; Kurniawan, 2006b; Heavey, 2003; Kargi e Pamukoglu, 2004a,b; Halim et al., 2010).

A adsorção, segundo Heumann (1997), é definida como sendo um processo de transferência de massa no qual uma ou mais substâncias (adsorvato) presentes em uma corrente gasosa ou líquida é transferida de forma seletiva para a superfície de um sólido poroso (adsorvente).

Strauss (1975) comenta que o processo de adsorção é muito

complexo e depende da natureza química e física do adsorvato e do adsorvente em questão. Dessa forma é muito difícil generalizar o projeto de uma unidade adsorvedora e, em geral, os projetos são feitos baseados em experiências com outros casos similares ou a partir de experimentos em laboratórios ou plantas pilotos. Noll et al. (1992) citam que além da necessidade do conhecimento da natureza química e física do sistema, é necessário também o conhecimento dos parâmetros de equilíbrio e da taxa de adsorção suportada pelo adsorvente. Estas informações, segundo o autor, são usualmente determinadas em experimentos em escala de laboratório.

Segundo Heumann (1997) todo material sólido tem alguma capacidade de adsorção. Entretanto, existem poucos sólidos que possuem propriedades adequadas para serem usados como adsorventes em processos industriais de separação ou no tratamento de efluentes.

Rousseau (1987) afirma que por ser a adsorção um fenômeno de superfície, é importante que o sólido adsorvente possua uma grande área superficial por unidade de peso ou volume e, cita como faixa típica de área superficial específica, para adsorventes comerciais, valores entre 300 e 1200 m<sup>2</sup>/g.

O carvão ativado é o material mais comumente utilizado como adsorvente devido as suas propriedades físicas tais como, elevada área superficial específica, estrutura microporosa, alta capacidade de adsorção e reatividade superficial. Em virtude dessas características o carvão ativado tem recebido uma considerável atenção nos últimos tempos na remoção de poluentes orgânicos e inorgânicos de águas residuárias. Vários estudos reportam o uso da adsorção no tratamento de chorume e na maioria das vezes, quando comparado a outros adsorventes o carvão ativado tem apresentado um desempenho superior (Kurniawan et al., 2006a).

Embora o uso do carvão ativado como adsorvente tenha destaque devido principalmente a sua grande área superficial específica, conforme destacado por Rousseau (1987) e Carrasco-Marin et al. (1992), Raymundo-Piñero et al. (2000) comentam que hoje já não existe mais o consenso de que a área superficial

específica seja a característica determinante para que o carvão ativado tenha um bom desempenho como adsorvente. Outros autores apresentam resultados onde o volume e distribuição dos poros, o diâmetro dos poros e as propriedades químicas aparecem como características determinantes para o bom desempenho do carvão ativado como adsorvente.

O carvão ativado é uma forma de carbono puro de grande porosidade, que contém micro, meso e macroporos que adsorvem moléculas, contudo sem modificar a composição química do produto tratado. Ele tem a capacidade de adsorver moléculas gasosas e/ou líquidas no interior dos seus poros, apresentando, portanto, um excelente poder de clarificação, desodorização e purificação de líquidos ou gases.

O processo de tratamento do chorume através da adsorção em carvão ativado consiste em três etapas: Na primeira há um macrotransporte, através do movimento dos poluentes da solução até a interface do meio adsorvente através de convecção e difusão; na segunda, microtransporte, há a difusão dos poluentes para os sítios de adsorção (poros do adsorvente) e, finalmente na terceira etapa, sorção, ou seja, fixação desses poluentes nos sítios do adsorvente por forças fracas (adsorção física) ou fortes (adsorção química).

A adsorção conforme mencionado acima pode ser de dois tipos: física ou química. A adsorção física, também chamada de fissorção, envolve apenas forças físicas, enquanto a adsorção química, também conhecida por quimissorção, envolve reação química.

A adsorção física é a mais usual e, de acordo com Bretschneider e Kurfurst (1987), ocorre quando as moléculas de uma substância são retidas na superfície de um sólido adsorvente, devido à existência de forças físicas, em especial as forças de van der Waals, sem a ocorrência de reação química. Neste tipo de adsorção a superfície do adsorvente é coberta com uma camada de moléculas do adsorvato e sobre esta camada outras podem ser depositadas. Este tipo de fenômeno é muito rápido e permite a recuperação do adsorvato através do processo inverso (dessorção), por diminuição da pressão ou aumento da temperatura

do sistema, permitindo assim a recuperação do adsorvato e regeneração do adsorvente para posterior reutilização. Segundo Rousseau (1987), a recuperação do adsorvato através da dessorção é possível porque na adsorção física as forças de atração envolvidas são mais fracas que as ligações químicas.

O processo de adsorção pode ser realizado em diferentes sistemas. Entretanto os mais usados são o reator de mistura para líquidos ou a coluna de leito fixo para líquidos, gases e vapores.

A configuração mais simples de uma unidade adsorvedora, segundo Noll et al. (1992), é o reator de mistura. Neste tipo de configuração o adsorvente (sólido particulado) é misturado com a fase líquida contendo o adsorvato até que o equilíbrio seja alcançado, sendo posteriormente as duas fases separadas para tratamento posterior ou disposição final.

A remoção de compostos orgânicos de chorumes estabilizados foi estudada por Morawe et al. (1995), usando carvão ativado granulado. Os resultados desse estudo mostraram uma remoção de 91% de DQO para uma concentração inicial de 940 mg/L, sendo o comportamento cinético da adsorção, neste caso, bastante positivo, responsável pela alta remoção dos orgânicos dissolvidos (Hyde, 1980, apud Morawe et al., 1995).

O tratamento de chorume, usando diferentes adsorventes (carvão ativado granulado, alumina ativada e cloreto férrico), foi avaliado por Wasay et al. (1999). Dentre os três adsorventes analisados, o carvão ativado granulado foi o que se mostrou mais eficiente para a remoção de metais pesados. Neste caso, cerca de 80 - 96% de metais pesados, com concentração inicial de 184 mg/L, foram removidos, numa faixa de pH entre 6 e 7,7, usando uma concentração de 2 g/L de carvão ativado granulado.

Halim et al. (2010) estudaram a adsorção de matéria orgânica e amônia sobre três diferentes adsorventes, entre eles o carvão ativado, e concluíram que o carvão ativado foi o adsorvente que melhor removeu a matéria orgânica.

Oh et al. (2004) avaliaram o tratamento de chorume usando a combinação da ozonização e adsorção em carvão ativado, obtendo um percentual de remoção de DQO de 90%. O processo de ozonização

permite a formação de moléculas menores, as quais são mais eficientemente adsorvidas na estrutura microporosa dos adsorventes. A associação desses processos se mostrou capaz de remover compostos orgânicos e metais contidos no chorume.

A degradação de compostos recalcitrantes de chorume estabilizado, usando a técnica da ozonização associada à adsorção em carvão ativado, foi avaliada por Kurniawan et al. (2006b). Neste estudo eles concluíram que essa associação é tecnicamente aplicável e atrativa para remoção de DQO e NH<sub>3</sub>-N, além de apresentar algumas vantagens, tais como, simplicidade do sistema e habilidade para aceitar as prováveis flutuações ocasionadas pelas variações sazonais. Os autores ressaltam ainda a necessidade de um pós-tratamento do chorume por processos biológicos, não somente para completar a degradação do chorume, mas também para atender às exigências da legislação ambiental.

Rivas et al. (2006) estudaram o uso da adsorção em carvão ativado para tratar um chorume já estabilizado e concluíram ser esta técnica uma alternativa para este tipo de efluente. Segundo eles, é possível otimizar o processo, ou seja, reduzir o consumo de carvão ativado, combinando a adsorção com outros tratamentos. Neste sentido, eles sugerem que a prévia remoção dos ácidos fúlvicos e húmicos pode otimizar o uso do adsorvente, e que uma etapa de oxidação anterior à adsorção pode resultar na formação de espécies menores e, portanto, de mais fácil adsorção.

Rivas et al. (2003) estudaram o tratamento do chorume por ozonização e concluíram que a adsorção em carvão ativado pareceu ser um pós-tratamento razoável para chorume pré-tratado por ozonização, uma vez que o carvão foi capaz de remover a matéria orgânica remanescente além das espécies metálicas presentes.

Randtke e Jepsen (1981), apud Enzminger et al. (1987), afirmam que no processo de adsorção em carvão ativado um pré-tratamento do efluente por coagulação aumentou a capacidade de adsorção do carvão ativado para ácidos fúlvicos. Esse resultado se mostra importante visto que os resultados do estudo de caracterização da fração solúvel de matéria orgânica presente no chorume, realizado por Chian e DeWalle (1977), constataram que os ácidos graxos voláteis e os ácidos fúlvicos são os maiores



constituintes desta fração do chorume.

DeWalle et al. (1982) estudaram a remoção de matéria orgânica presente em efluentes líquidos por diferentes técnicas de tratamento e observaram que o uso de carvão ativado em associação com a osmose reversa não alterou de forma significativa a eficiência de remoção do sistema utilizado.

Kurniawan e Lo (2009) analisaram a remoção de compostos refratários para chorume oriundo de aterro maduro, usando a combinação da oxidação e a adsorção em carvão ativado granulado. Neste estudo eles verificaram que a associação dos dois tratamentos permitiu a remoção de 82% da DQO inicial, enquanto que a oxidação e a adsorção quando aplicadas de forma isolada foram capazes de remover apenas 33% e 58% de DQO, respectivamente. A relação de biodegradabilidade do chorume foi consideravelmente melhorada, permitindo o uso posterior de tratamento biológico.

Nóbrega et al. (2007), Silva Jr. (2007) e Coelho et al. (2008) estudaram o efeito da combinação dos métodos de tratamento coagulação e adsorção, em pH variando de 1,5 a 4,5, na remoção de DQO e cor do chorume gerado no lixão da cidade de Maceió/AL. Nestes estudos foram utilizados dois coagulantes, o cloreto férrico e o sulfato de alumínio, e como adsorvente o carvão ativado comercial. Os resultados destes estudos mostraram que os tratamentos aplicados isoladamente mostraram-se eficientes na remoção de cor e DQO do chorume bruto, sendo a maior remoção de cor obtida quando a acidificação do chorume foi feita até pH igual a 1,5, cuja remoção foi de 70%. Já a maior remoção de DQO foi obtida pela adsorção em carvão ativado comercial na concentração de 25 g/L, cuja remoção foi de 46%. A análise dos resultados dos testes em que estes métodos foram associados mostrou que combinando o processo de adsorção em carvão ativado ( $C_{\text{carvão}} = 20 \text{ g/L}$ ) e de coagulação, utilizando-se como coagulante o cloreto férrico ( $C_{\text{cloreto férrico}} = 1000 \text{ mg/L}$ ) e corrigindo-se o pH do chorume até o valor de 4,5 obtêm-se eficiências de remoção de DQO e cor da ordem de 80% e 100%, respectivamente.

Conforme se observou nessa breve revisão da literatura,

diversos pesquisadores vêm estudando a associação de processos físico-químicos. Especialmente no tratamento de chorume, essa associação tem apresentado resultados bastante satisfatórios, motivando desta forma uma investigação mais ampla deste tipo de tratamento.

No presente estudo foram avaliados, de forma isolada e associada, os seguintes tratamentos: acidificação, coagulação e adsorção em carvão ativado, com o objetivo de identificar quais os níveis das variáveis envolvidas nestes tratamentos que maximizam a remoção da DQO e cor do chorume gerado no lixão de Maceió/AL. Este estudo ampliou o estudo realizado por Silva Jr. (2007), através do uso de um novo coagulante e um carvão ativado com características texturais e químicas diferentes, numa faixa maior de pH.

## **4 MATERIAL E MÉTODOS**

Neste capítulo são apresentados os métodos utilizados na caracterização das amostras de chorume, assim como os procedimentos empregados nos testes experimentais de tratamento do chorume. Todas as análises de caracterização das amostras de chorume coletadas, bem como os ensaios experimentais de tratamento do chorume foram realizados no Laboratório de Saneamento Ambiental (LSA) do Centro de Tecnologia (CTEC) da Universidade Federal de Alagoas (UFAL).

### **4.1 Chorume.**

Todo o chorume utilizado ao longo do desenvolvimento deste trabalho foi coletado no lixão da cidade de Maceió/AL, localizado no bairro de Cruz das Almas. Em virtude da falta de um sistema de captação do mesmo, as amostras foram coletadas, preferencialmente, em um único ponto, uma "lagoa natural", para onde a maior parte do chorume gerado escoava, conforme mostra a Figura 4.1. A maior contribuição nesse ponto de coleta era de chorume oriundo de resíduos mais antigos e, portanto, mais estabilizado, uma vez que os resíduos coletados diariamente estavam sendo depositados em pontos mais afastados deste ponto de coleta. Porém, é conveniente salientar que a dinâmica do lixão e a falta de um sistema de drenagem do chorume gerado naquele lixão faziam com que em períodos de chuva, em especial, houvesse um maior arraste de chorume novo para esse ponto de coleta, minimizando o fator de diluição da água da chuva.

#### **4.1.1 Preservação das Amostras de Chorume**

Todas as amostras de chorume foram coletadas em vasilhames plásticos de 20 litros, e preservadas, quando necessário, sob refrigeração numa temperatura que não excedia os 6 °C.



Figura 4.1 - Ponto de coleta das amostras de churume no lixão de Maceió/Al

#### **4.1.2 Caracterização das Amostras de Chorume**

Todas as amostras coletadas foram caracterizadas com relação a alguns parâmetros físico-químicos, utilizando-se, preferencialmente, os métodos padrões determinados pelo Standards Methods for the Examination of Water and Wastewater (1999). A Tabela 4.1 apresenta os métodos analíticos e os principais equipamentos utilizados nestas análises.

Tabela 4.1 - Análises físico-químicas, métodos analíticos e principais equipamentos

<b>Parâmetros</b>	<b>Métodos analíticos - Equipamentos</b>
Demanda Química de Oxigênio	Colorimétrico. Filtração em membrana de fibra de vidro com diâmetro de poro 1,2 µm - Espectrofotômetro QUIMIS Q-108U2M
Demanda Biológica de Oxigênio	Frascos padrões - Incubadora de DBO QUIMIS
Sólidos totais	Gravimétrico - Estufa de secagem
Sólidos voláteis	Gravimétrico - Estufa de secagem/Forno Mufla
Sólidos fixos	Gravimétrico - Estufa de secagem/Forno Mufla
pH	Potenciométrico - Peagômetro com eletrodo combinado ANALION
Temperatura	Leitura direta - Termômetro de mercúrio - Escala (0 - 50 °C)
Nitrogênio amoniacal	Destilação seguida de titulação volumétrica com ácido sulfúrico - Destilador de nitrogênio TECNAL TE-036/1
Alcalinidade	Titulação potenciométrica - Peagômetro com eletrodo combinado ANALION
Ácidos voláteis	Titulação potenciométrica - Peagômetro com eletrodo combinado ANALION
Condutividade	Leitura direta - Condutivímetro ANALION C708
Cor verdadeira	Espectrofotometria ( $\lambda = 455 \text{ nm}$ ). Filtração em membrana com diâmetro de poro 0,45 µm - Espectrofotômetro HACH DR 2500
Cloretos	Método de Mohr

## 4.2 Adsorvente

O material adsorvente utilizado foi carvão ativado em pó, obtido a partir do endocarpo do coco-da-baía pelo processo de ativação química. Esse carvão foi produzido por pesquisadores do Laboratório de Saneamento Ambiental da UFAL, cujo processo produtivo está descrito em Nóbrega et al. (2010).

A amostra de carvão usada foi a denominada SE-E e suas principais características estão apresentadas nas Tabelas 4.2 e 4.3.

A Tabela 4.2 resume as características estruturais desse carvão, de acordo com Nóbrega et al. (2010). Os dados estão tabulados para área superficial específica ( $A_{\text{BET}}$ ), volume total de poros, volume de microporos, volume de ultramicroporos, volume de supermicroporos, volume de mesoporos e razão do volume

de microporos e volume total de poros (% de microporosidade). As condições de ativação usadas permitiram a obtenção de uma amostra de carvão com alto grau de porosidade e elevada  $A_{BET}$  o que o torna um adsorvente promissor em meio aquoso.

Tabela 4.2 - Características texturais da amostra de carvão ativado (SE-E)

Parâmetro	Valor
$A_{BET}^a$ ( $m^2/g$ )	1622
$V_{total}^b$ ( $cm^3/g$ )	1,02
$V_{micro}^c$ ( $cm^3/g$ )	0,54
$V_{ultra}^c$ ( $cm^3/g$ )	0,11
$V_{super}^c$ ( $cm^3/g$ )	0,43
$V_{meso}^d$ ( $cm^3/g$ )	0,48
Microporosidade (%)	53

<sup>a</sup>método de BET; <sup>b</sup>quantidade de  $N_2$  adsorvida em  $p/p^0 = 0,95$

<sup>c</sup>método  $\alpha_S$ ; <sup>d</sup> $V_{meso} = V_{total} - V_{micro}$

A superfície química da amostra de carvão foi avaliada pela determinação da análise elementar e do pH no ponto de carga zero ( $pH_{PZC}$ ), cujos resultados estão apresentados na Tabela 4.3. Observando esses resultados é possível constatar que a amostra tem caráter ácido.

Tabela 4.3 - Características químicas da amostra de carvão ativado (SE-E)

$pH_{PZC}$	Análise Elementar (%)				
	N	C	H	S	O
3,6	0,2	82,5	1,6	0,0	15,7

### 4.3 Coagulante

O coagulante usado foi o policloreto de alumínio a 8% (PAC) fornecido pela Companhia de Água e Saneamento de Alagoas (CASAL).

#### 4.4 Metodologia dos Testes Experimentais de Tratamento

Para avaliar a tratabilidade do chorume, no que concerne à remoção de cor verdadeira e matéria orgânica dissolvida (medida por meio da demanda química de oxigênio), através dos métodos físico-químicos, precipitação por acidificação, coagulação e adsorção em carvão ativado, inicialmente foram realizados testes, sempre em duplicata, utilizando-se chorume bruto e aplicando-se a este, isoladamente, cada um dos métodos citados. A metodologia destes testes está descrita a seguir.

**Precipitação por acidificação:** retirava-se do chorume bruto alíquotas de 400 mL e transferia-as para béqueres de 500 mL e sob agitação, corrigia-se o pH dessa amostra até o valor desejado (7, 5 e 3), adicionando-se lentamente gotas de uma solução concentrada de ácido nítrico. Atingido o pH desejado a amostra era então deixada em repouso por um período de 30 minutos. Passado esse período, eram retiradas alíquotas do sobrenadante, para determinação da DQO e cor verdadeira;

**Coagulação:** retirava-se do chorume bruto alíquotas de 500 mL e transferia-as para béqueres de 1000 mL. Esses béqueres eram colocados no *Jar Test* (Policontrol - FlocControl II), o qual fora previamente programado para após a adição da massa do coagulante, correspondente à concentração desejada (500 mg/L e 1000 mg/L), agitar a mistura (chorume + coagulante) por 2 minutos a 150 rpm (mistura rápida) seguido por uma agitação lenta (60 rpm) por 120 min e posterior repouso durante 30 min. Passado esse período, eram retiradas alíquotas do sobrenadante de cada béquer, para determinação da DQO e cor verdadeira;

**Adsorção:** retirava-se do chorume bruto alíquotas de 50 mL e transferia-as para frascos, contendo uma massa de carvão correspondente à concentração desejada (2,5 e 5,0 g/L). Esses frascos eram mantidos sob agitação, em agitadores magnéticos, por um período de 24 h, após o qual o carvão era separado do meio líquido por filtração em membrana de fibra de vidro com

diâmetro de poro de 1,2  $\mu\text{m}$ . Após a filtração a DQO e a cor verdadeira do chorume tratado eram determinadas.

Nos testes onde a combinação dos três métodos de tratamento físico-químicos foi avaliada, utilizou-se um planejamento experimental do tipo fatorial completo  $3^3$ , realizados também em duplicata. Nestes testes os ensaios foram realizados em série, obedecendo à seguinte sequência: acidificação, coagulação e adsorção.

As variáveis dos tratamentos físico-químicos foram: pH, concentração do coagulante e concentração de carvão ativado, cujos níveis utilizados e seus respectivos valores codificados estão apresentados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Níveis das variáveis dos processos físico-químicos avaliados e seus respectivos valores codificados

pH		$C_{\text{PAC}}$		$C_{\text{Carvão}}$	
(--)	$x_1$	(mg/L)	$x_2$	(g/L)	$x_3$
3,0	-1	0	-1	0	-1
5,0	0	500	0	2,5	0
7,0	1	1000	1	5,0	1

A Figura 4.2 apresenta um desenho esquemático desses ensaios e a Tabela 4.5 a planilha do planejamento fatorial com todos os ensaios realizados nesta etapa deste estudo.

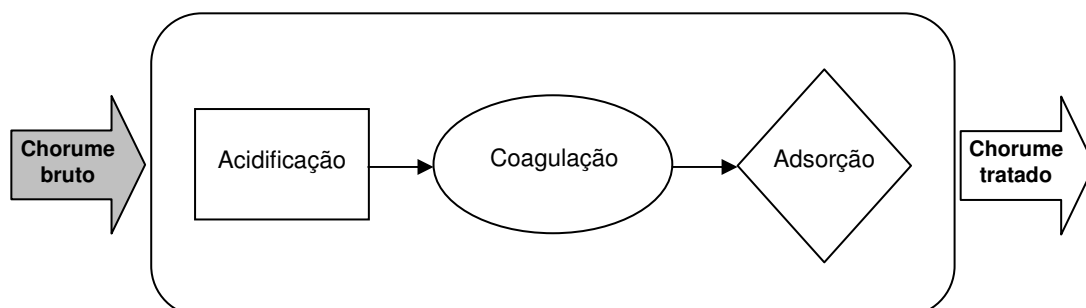


Figura 4.2 - Sequência da combinação de processos no tratamento do chorume

As equações usadas para codificar as variáveis foram as seguintes:



$$x_1 = \frac{\text{pH} - 5,0}{2} \quad (4.1)$$

$$x_2 = \frac{C_{\text{PAC}} - 500}{500} \quad (4.2)$$

$$x_3 = \frac{C_{\text{Carvão}} - 2,5}{2,5} \quad (4.3)$$

nas quais:

pH - pH do meio;

$C_{\text{PAC}}$  - concentração do policloreto de alumínio, mg/L;

$C_{\text{Carvão}}$  - concentração do carvão ativado, g/L.

Tabela 4.5 - Planilha do planejamento experimental  $3^3$

Ensaio	pH	$C_{\text{PAC}}$ (mg/L)	$C_{\text{Carvão}}$ (g/L)
1	-1	-1	-1
2	-1	-1	0
3	-1	-1	+1
4	-1	0	-1
5	-1	0	0
6	-1	0	+1
7	-1	+1	-1
8	-1	+1	0
9	-1	+1	+1
10	0	-1	-1
11	0	-1	0
12	0	-1	+1
13	0	0	-1
14	0	0	0
15	0	0	+1
16	0	+1	-1
17	0	+1	0
18	0	+1	+1
19	+1	-1	-1
20	+1	-1	0
21	+1	-1	+1
22	+1	0	-1
23	+1	0	0
24	+1	0	+1
25	+1	+1	-1
26	+1	+1	0
27	+1	+1	+1

Em todos os testes a eficiência do processo em termos de remoção de matéria orgânica (DQO) e cor, aplicado de forma individual e/ou combinada, era obtida a partir da seguinte expressão:

$$R(\%) = \frac{C_i - C_f}{C_i} \cdot 100$$

(4.4)

na qual:

$C_i$  - DQO ou cor do chorume antes do tratamento;

$C_f$  - DQO ou cor do chorume após o tratamento.

A metodologia dos testes do planejamento experimental obedeceu aos procedimentos descritos na Figura 4.3.

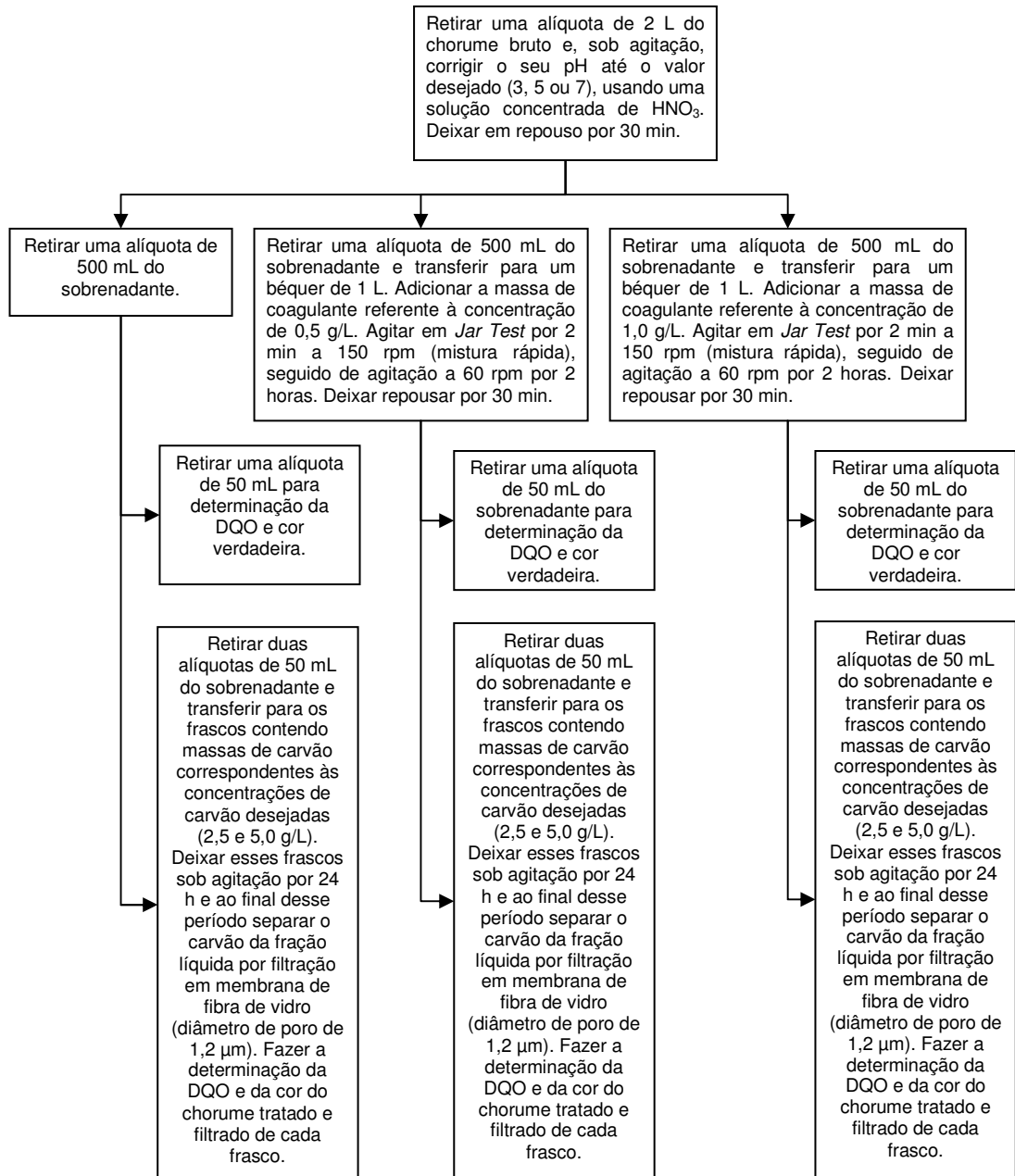


Figura 4.3 - Procedimento experimental dos testes em que ocorria a combinação de tratamentos

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Caracterização do chorume

Durante a execução desse trabalho foram realizadas cinco coletas de chorume no lixão da cidade de Maceió, sendo que apenas três foram caracterizadas. Essas coletas visaram dar continuidade ao monitoramento do chorume iniciado no final do ano de 2003 por Nóbrega et al. (2004). O resumo dos principais resultados obtidos durante todo esse período está apresentado na Tabela 5.1. Esses resultados representam um total de 31 amostras, três das quais coletadas durante o desenvolvimento deste estudo. Os resultados de todas as amostras coletadas estão apresentados na Tabela A.1 do apêndice deste trabalho.

Tabela 5.1 - Resumo da caracterização das 31 amostras de chorume coletadas no período de Dezembro/2003 a Dezembro/2008

<b>Parâmetros</b>	<b>Valor máximo</b>	<b>Valor mínimo</b>	<b>Valor médio</b>
DQO (mg/L)	7165	216	3063 ± 1462
DBO <sub>5</sub> (mg/L)	1260	101	429 ± 350
DBO <sub>5</sub> /DQO	0,24	0,05	0,12 ± 0,05
Sólidos totais (mg/L)	19785	1707	9330 ± 3582
Sólidos voláteis (mg/L)	10131	703	2905 ± 1234
Sólidos fixos (mg/L)	16993	1003	6407 ± 2584
pH ( - )	8,7	8,0	8,3 ± 0,1
Temperatura (°C)	32,0	22,6	28,5 ± 1,8
Nitrogênio amoniacal (mg/L)	1738	21	766 ± 406
Alcalinidade (mg de CaCO <sub>3</sub> /L)	9949	663	4789 ± 1967
Ácidos voláteis (mg H Ác/L)	2404	38	541 ± 393
Condutividade (mS/cm)	23,3	2,4	14,5 ± 3,8
Cor verdadeira (mg Pt Co/L)	3378	1825	2721 ± 556
Cloretos (mg/L)	3900	1143	2059 ± 944

Estes resultados (Tabela 5.1) mostram que, com exceção da

temperatura e do pH, todos os demais parâmetros obtidos apresentaram uma variação muito grande no período amostrado. Esta variação também é observada na literatura (Bashir et al., 2010; Ghafari et al., 2009; Kurniawan e Lo, 2009; Deng, 2007; Fan et al., 2006; Tatsi e Zouboulis, 2002; Imai et al., 1995; Neto e Mota, 1999; Pessin et al., 1997), o que confirma a influência de uma série de fatores (tipo de resíduo, forma de disposição, precipitação pluviométrica, idade dos resíduos, etc.) sobre estes parâmetros, tornando ainda mais complexo o tratamento deste lixiviado.

Os parâmetros DQO (demanda química de oxigênio) e DBO<sub>5</sub> (demanda biológica de oxigênio) representam, respectivamente, as concentrações neste lixiviado de matéria orgânica estabilizáveis química e biologicamente. Analisando os resultados desses parâmetros na Tabela 5.1, vê-se que este lixiviado apresenta características de um efluente de difícil tratamento, em especial, devido à alta concentração de matéria orgânica recalcitrante (alta DQO) e baixa biodegradabilidade, representada pelo baixo valor da relação DBO<sub>5</sub>/DQO. Esse comportamento indica um chorume oriundo de resíduos mais estabilizados (Lo, 1996; Foo e Hameed, 2009; Bashir et al., 2010). Isso se explica pelo fato de que, nestas condições, há um acúmulo no chorume de substâncias de difícil degradação biológica, como os ácidos fúlvicos e húmicos, os quais contribuem sobremaneira para a coloração escura do chorume, observada em todas as amostras coletadas e confirmada pelos altos valores de cor verdadeira apresentada pelas mesmas. A presença dessas substâncias no chorume é discutida na literatura (Bae et al., 1999; Kang et al., 2002; Zouboulis et al., 2003; Zouboulis et al., 2004; Rodríguez et al., 2004) e pode ser constatada, através do trabalho de Christensen et al. (1998), cujo objetivo era caracterizar a matéria orgânica dissolvida presente no chorume oriundo de aterros. Neste estudo eles concluíram que da fração isolada de matéria orgânica dissolvida, os ácidos fúlvicos e os ácidos húmicos eram responsáveis por 10 e 60% desse total, respectivamente. Fan et al. (2006) também determinaram o percentual de ácidos húmicos e fúlvicos em

amostras de chorumes e obtiveram para chorume mais estabilizado os seguintes percentuais, 30 e 28%, de ácidos fúlvicos e húmicos, respectivamente.

O teor de sólidos sofre influência direta da coleta e da vazão de escoamento do percolado, tornando dessa forma difícil correlacionar seus valores e suas variações, com qualquer dos outros parâmetros analisados. Entretanto, de acordo com a literatura, a relação entre sólidos fixos e voláteis é um parâmetro importante para se avaliar a indicação de tratamento biológico de um dado efluente. Dos resultados obtidos, verifica-se uma supremacia dos sólidos fixos em relação aos voláteis, dando mais um indicativo de um efluente de baixa biodegradabilidade.

A temperatura do lixiviado é um fator que depende do processo de degradação dos resíduos, porém, como todas as amostras foram coletadas em um único ponto, para o qual boa parte do chorume escoou e ali ficou depositado, a sua temperatura é mais dependente, neste caso, da temperatura do ambiente. Verifica-se dos resultados obtidos para esse parâmetro, que sua variação foi pequena em virtude, principalmente, do horário da coleta das amostras, a qual era sempre realizada no início da manhã.

O pH de um efluente é um parâmetro muito importante na sua caracterização, haja vista que, dependendo do processo de tratamento empregado, o mesmo pode apresentar grande influência sobre a eficiência do tratamento. Se o efluente se prestar a tratamento biológico o controle do seu pH tem que ser tal, que favoreça o desenvolvimento dos microrganismos envolvidos no processo, uma vez que, segundo Reynolds e Richards (1996) a faixa ideal para que o efluente se preste para tratamento bioquímico é 6,5 a 9,0. O valor do pH apresentado por todas as amostras coletadas foi básico ( $\geq 8$ ), configurando, mais uma vez, um chorume oriundo de um resíduo mais estabilizado, o que já era esperado, em virtude de que no ponto de coleta, a grande maioria do chorume advém do lixo mais antigo, visto que o lixo coletado diariamente estava sendo depositado num local distante deste ponto, conforme já comentado anteriormente. Embora a

possibilidade de que uma grande contribuição do chamado chorume "novo", nos dias chuvosos, possa ter ocorrido, mesmo assim não foi suficiente para proporcionar uma variação significativa no pH, no período amostrado.

A observação de que chorumes mais estabilizados (aterro velho) apresentam valores de pH mais elevados que os chorumes jovens (aterro novo) é explicada, segundo Tatsi e Zouboulis (2002), principalmente, pela redução da concentração dos ácidos graxos voláteis nestas amostras, haja vista que estes ácidos podem ser parcialmente ionizados, contribuindo dessa forma para abaixar o valor do pH do meio.

O pH também é um parâmetro muito importante em efluentes ricos em amônia, já que a distribuição da amônia nas formas livre e ionizada é comandada, principalmente, pelo valor do pH do meio.

A literatura (Von Sperling, 2005; Metcalf e Eddy, 1979) cita que a amônia em uma solução pode existir tanto na forma do íon amônio ( $\text{NH}_4^+$ ) como na forma livre, não ionizada ( $\text{NH}_3$ ), podendo esse equilíbrio dinâmico ser representado pela seguinte reação (Guo et al., 2010):



A distribuição entre as duas formas de amônia assume os seguintes percentuais, em função dos valores de pH (Von Sperling, 2005):

- pH < 8: praticamente toda a amônia está na forma de  $\text{NH}_4^+$ ;
- pH = 9,5: aproximadamente 50% em cada uma das duas formas;
- pH > 11: praticamente toda a amônia na forma de  $\text{NH}_3$ .

A distribuição da amônia, além de depender do pH do meio, também é influenciada pela temperatura. Emerson et al. (1975), apud Von Sperling (2005), apresentam uma correlação para a distribuição da amônia, onde se vê a dependência tanto do pH

quanto da temperatura. Esta correlação está representada pela Equação 5.2:

$$\frac{\text{NH}_3 \text{ livre}}{\text{Amônia total}} (\%) = \frac{100}{1 + 10^{\left[0,09018 + \left(\frac{2729,92}{T+273,20}\right)\right] - \text{pH}}} \quad (5.2)$$

em que:

T - temperatura do meio líquido (°C);

pH - pH do meio líquido, adimensional.

A importância da distribuição da amônia, nos efluentes e nos corpos de água, está baseada no fato de que a amônia livre é tóxica aos peixes, mesmo que em baixas concentrações. Para os valores de pH e temperatura observados no chorume durante o período de amostragem, podemos verificar, utilizando-se a Equação 5.2, que o percentual de amônia livre variou entre 6 e 23%. Valores esses que passam a ter um maior significado, quando comparado juntamente com a concentração de nitrogênio amoniacal total, discutido no parágrafo a seguir.

A concentração de nitrogênio amoniacal encontrada nas amostras analisadas de chorume apresentou uma variação relativamente grande, cujos valores obtidos conferem a esse lixiviado um potencial poluidor muito grande, não somente por gerar condições propícias à eutrofização dos corpos receptores, como também, segundo Giordano et al. (2002), por conferir ao mesmo um caráter tóxico. Outro grande problema proveniente da alta concentração deste parâmetro no chorume é a possibilidade de inibição dos processos biológicos, dificultando o seu tratamento através destes processos, conforme mostra o estudo realizado por Li e Zhao (1999). Como forma de prevenir a poluição dos corpos receptores por este agente poluidor, a resolução CONAMA Nº 357 de 17 de março de 2005, estabelece em seu artigo 34 que, qualquer fonte poluidora somente poderá lançar seus efluentes, direta ou indiretamente, nos corpos de água receptores se, dentre outras exigências, a concentração de nitrogênio amoniacal for inferior a 20 mg/L. Conforme se vê, esse patamar não foi obedecido em nenhuma das amostras

coletadas, sendo o valor médio obtido, da ordem de 38 vezes maior que o exigido pela referida resolução. A amônia, conforme se pode constatar a partir dos resultados deste trabalho, bem como de outros estudos da literatura, tem-se revelado como um dos principais poluentes de chorumes estabilizados. Chu et al. (1994) comentam que após um período de 3 a 8 anos a concentração média de nitrogênio amoniacal no chorume atinge valores da ordem de 500 a 1500 mg/L, permanecendo nesta faixa por pelo menos 50 anos. Os resultados obtidos para esse parâmetro, no presente estudo, confirmam esses valores.

A alcalinidade do lixiviado, como os demais parâmetros, está relacionada com a idade dos resíduos. Esse parâmetro mede a capacidade do resíduo em neutralizar os ácidos, daí porque a contribuição de chorume "novo", cujo pH é ácido, ao ponto de coleta em períodos chuvosos, não consegue alterar o pH do chorume mais estabilizado.

Arruda et al. (1995), apud Fleck (2003), comentam que nos lixiviados, o dióxido de carbono dissolvido, a amônia e os fosfatos são os maiores contribuintes para a alcalinidade do meio. Uma comparação do comportamento da concentração de nitrogênio amoniacal e alcalinidade total do chorume, para todas as amostras nas quais as determinações destes parâmetros foram obtidas, é dada na Figura 5.1. Observando os pontos apresentados neste gráfico, constata-se, claramente, uma grande concordância da tendência de comportamento entre estes dois parâmetros, sendo esta relação um fator importante no tratamento deste efluente.

Diferentemente do que ocorre nos condutores metálicos, nos quais a corrente elétrica é transportada por elétrons livres, o transporte de cargas em meio líquido é realizado pelos íons. Todos os íons presentes na solução participam dessa condução e, por essa razão, a condutividade elétrica de uma solução está relacionada com a concentração global de espécies iônicas no meio. Nos lixiviados, desconsiderados os efeitos de diluição, durante a predominância da fase ácida, teremos condutividades superiores, ao passo que, com a evolução do processo anaeróbico e elevação do pH, muitos íons, principalmente cátions metálicos precipitam, sendo retirados da solução, ocasionando redução na



condutividade (Fleck, 2003). No presente estudo, os valores obtidos para esse parâmetro estão de acordo com aqueles observados na literatura para aterros maduros, conforme pode ser observado, por exemplo, no trabalho de Tatsi e Zouboulis (2002). Neste tipo de chorume a condutividade está relacionada, principalmente, à presença de cloretos, conforme mostram os resultados obtidos neste estudo (Tabela A.1).

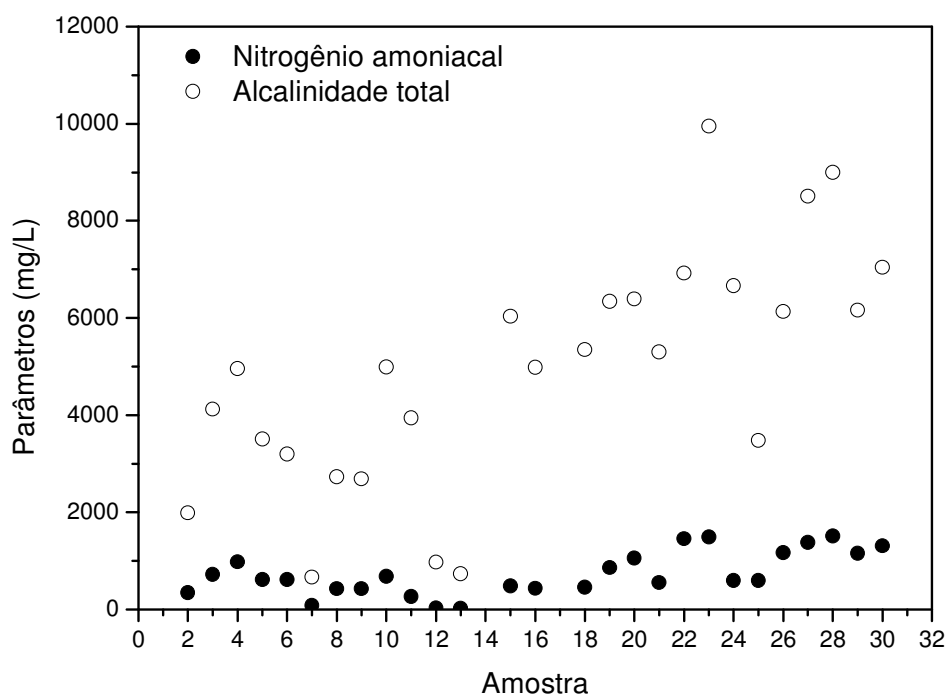


Figura 5.1 - Comportamento dos parâmetros alcalinidade total e nitrogênio amoniacal em amostras de chorume

Os ácidos graxos voláteis são produtos típicos da primeira fase da digestão anaeróbia (fase acidogênica), gerados a partir da hidrólise e fermentação da matéria orgânica (proteínas, lipídios, polissacarídeos). Os valores obtidos para esse parâmetro durante o período de amostragem, igualmente aos outros parâmetros, também apresentaram uma variação significativa, sendo que a razão entre este parâmetro e a DQO variou numa faixa de 8 a 42%, com valor médio de 18%, configurando mais uma vez se tratar de um chorume mais estabilizado.

Os resultados da caracterização do chorume apresentados na Tabela 5.1 dão idéia do alto poder poluidor deste efluente,

indicando que o mesmo não pode ser lançado indiscriminadamente em corpos d'água receptores, sob pena de provocar grande impacto ambiental, ficando caracterizado, dessa forma, a necessidade imprescindível de tratamento deste lixiviado, antes do seu lançamento no meio ambiente.

Em geral os resultados obtidos neste estudo estão de acordo com aqueles obtidos por vários outros pesquisadores, conforme mostram os exemplos apresentados no trabalho de Renou et al. (2008). As amostras coletadas mostraram características similares, tais como, coloração marrom intenso devido, provavelmente, à presença de substâncias húmicas, pH alcalino, altas concentrações de nitrogênio amoniacal e cloretos, baixa relação DBO/DQO, indicando se tratarem de chorume em estado avançado de degradação e, portanto, pouco recomendado para tratamento biológico.

## **5.2 Tratamento do chorume**

Observando as características do chorume produzido no lixão de Maceió, verifica-se que o mesmo se trata de um chorume altamente estabilizado e com pouca biodegradabilidade, sendo nestes casos os tratamentos físico-químicos muito indicados.

Dentro deste contexto este trabalho estudou a aplicabilidade de tratamentos físico-químicos empregados e avaliados individualmente e de forma conjunta na remoção de cor e DQO deste efluente.

Neste sentido foram realizados, inicialmente, alguns testes a fim de quantificar a influência individual dos parâmetros: pH (acidificação), concentração de coagulante (coagulação) e concentração de carvão ativado (adsorção), na remoção de cor verdadeira e matéria orgânica do chorume, esta última medida através da DQO. Nestes testes apenas um destes parâmetros era alterado, partindo-se sempre do chorume bruto. Esses resultados experimentais estão apresentados na Tabela A.2 do apêndice deste trabalho.

A amostra de chorume utilizada em todos os testes foi

caracterizada com relação aos parâmetros DQO, cor verdadeira e pH. Os resultados obtidos nesta caracterização estão apresentados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Características da amostra de chorume utilizada nos testes de tratamento

Parâmetros	Valores
DQO (mg/L)	3858
Cor verdadeira (mg Pt Co/L)	5343
pH ( - )	8,3

### 5.2.1 Efeito da acidificação na remoção de DQO e cor do chorume

O efeito da acidificação do chorume bruto na remoção de DQO e cor foi avaliado variando-se o pH do mesmo entre 3 e 7. Os resultados obtidos nestes testes estão apresentados na Figura 5.2.

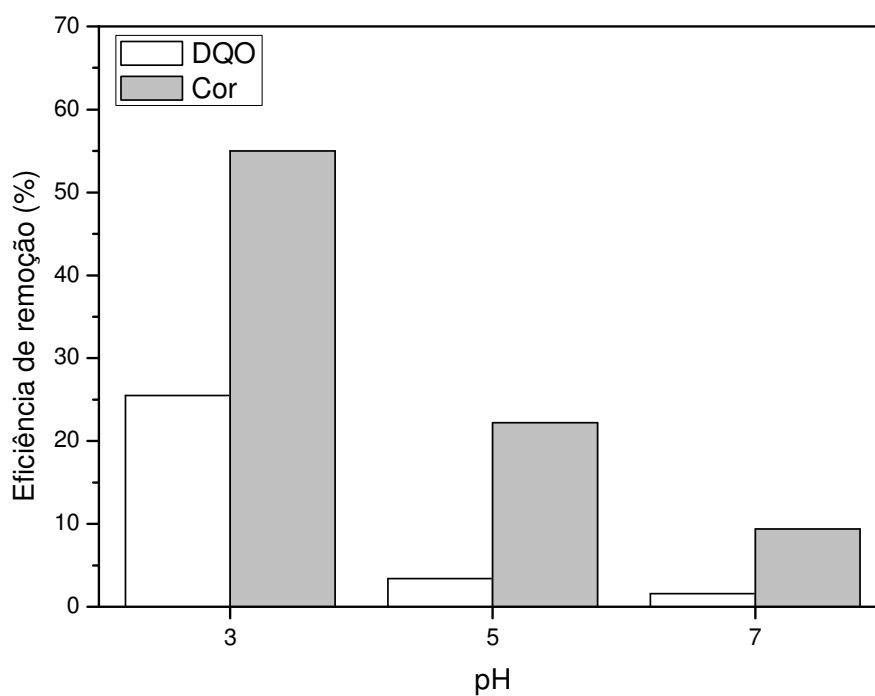


Figura 5.2 - Efeito da acidificação do chorume na remoção de DQO e cor ( $pH_{\text{inicial}} = 8,3$ )

Nesta figura é possível observar que tanto a remoção de cor quanto a de DQO foram favorecidas pela diminuição do pH sendo, entretanto, a remoção de cor mais expressiva que a remoção de DQO em todos os casos. Estes resultados estão em conformidade com aqueles apresentados na literatura, como por exemplos, nos estudos realizados por Wang et al. (2002), Rivas et al. (2003), Aziz et al. (2005) e Silva Jr. (2007).

Durante a execução destes testes foi possível visualizar a formação de um precipitado, cujo volume gerado aumentava à medida que o pH do meio diminuía. Segundo Rivas et al. (2004), uma possível causa para a formação desse precipitado é a presença de substâncias, especialmente as húmicas, cuja solubilidade é fortemente dependente do pH do meio.

Vê-se destes resultados que uma dada remoção de DQO é capaz de representar uma remoção de mais que o dobro de cor do chorume, justificando, provavelmente, a forte contribuição das substâncias húmicas na cor verdadeira de chorumes estabilizados.

## **5.2.2 Efeito da coagulação na remoção de DQO e cor do chorume**

As remoções de DQO e cor do chorume bruto através da coagulação foram avaliadas utilizando-se o policloreto de alumínio (PAC) como agente coagulante, em duas concentrações diferentes. Os resultados destes testes estão apresentados na Figura 5.3.

Os resultados apresentados nesta figura são muito próximos daqueles obtidos por Silva Jr. (2007) utilizando-se como agentes coagulantes o cloreto férrico e o sulfato de alumínio, em condições experimentais (dosagem de coagulante, origem e características do chorume) semelhantes às deste estudo.

Observando-se estes resultados vê-se que quanto maior é a concentração do coagulante maior é a eficiência de remoção tanto de DQO quanto de cor contidas no chorume bruto. Entretanto, diferentemente do observado nos testes de acidificação do chorume, é possível verificar, neste caso, que os níveis de remoção dos parâmetros cor e DQO são praticamente iguais. Uma

justificativa para esse fato decorre da possibilidade de que uma grande fração de matéria orgânica removida pela coagulação, nas condições testadas, não contemple as substâncias húmicas. Esta possibilidade pode ser reforçada nas constatações evidenciadas nos estudos comentados nos dois parágrafos a seguir.

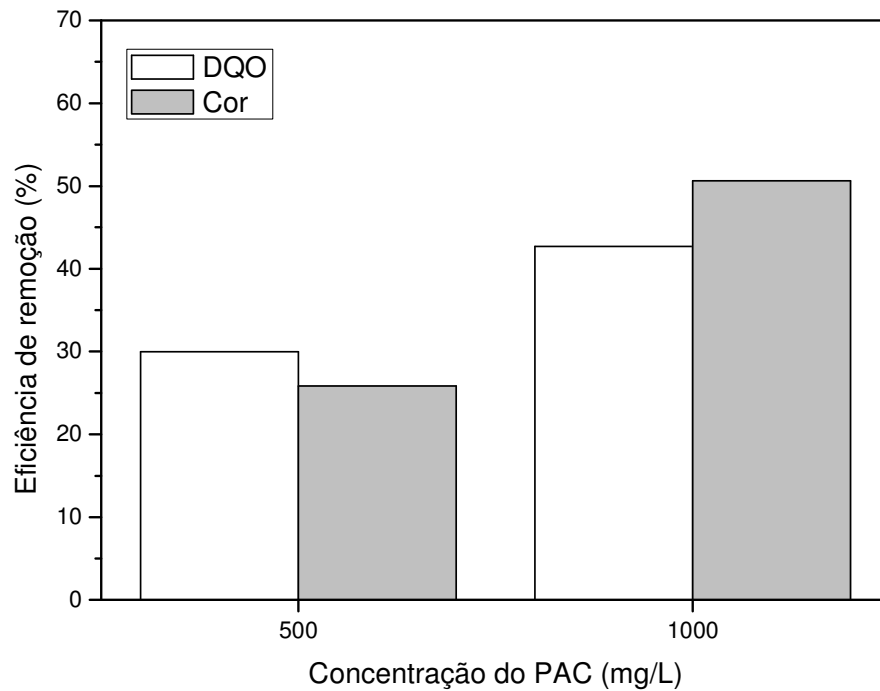


Figura 5.3 - Efeito da concentração de policloreto de alumínio (PAC) na remoção de DQO e cor do chorume (pH = 8,3)

Comparando esses resultados com aqueles obtidos por Marañón et al. (2010), em cujo trabalho o chorume usado apresentava características bastante semelhantes às do chorume usado no presente estudo, verifica-se que as remoções obtidas neste estudo foram comparativamente superiores, tendo em vista que as concentrações do PAC empregadas foram substancialmente inferiores, o que provavelmente não foi o suficiente para alterar o pH do meio, diferentemente do estudo referenciado. É possível observar também no trabalho desses pesquisadores a influência da correção do pH do meio sobre a coagulação.

Ntampou et al. (2006) também usaram o PAC para tratar um chorume classificado como estabilizado. Neste estudo eles observaram que a eficiência de remoção da cor e da DQO aumentava

com o aumento da dosagem dos coagulantes até um determinado valor, a partir do qual a eficiência da coagulação decrescia. Segundo esses pesquisadores esse fato se deve à alteração do pH do meio, com o aumento da dosagem do coagulante, o qual passa por um valor ótimo (pH = 5), indicando que a adsorção da matéria orgânica pelos hidróxidos de metais precipitados é o mecanismo dominante da remoção das substâncias húmicas, haja vista que nesse pH estas substâncias estão negativamente carregadas, contrariamente ao precipitado.

### **5.2.3 Efeito da adsorção em carvão ativado na remoção de DQO e cor do chorume**

Com a finalidade de remover uma parcela significativa de matéria orgânica recalcitrante e de cor do chorume bruto, estudou-se a eficiência da adsorção em carvão ativado. Nos testes realizados, duas diferentes massas de carvão ativado eram colocadas em contato, por 24 horas, com um volume fixo de chorume, cujos resultados obtidos estão apresentados na Figura 5.4. Nesta figura é possível observar que tanto a eficiência de remoção de DQO quanto a de remoção da cor tendem a aumentar à medida que a concentração de carvão ativado aumenta.

As capacidades de adsorção de matéria orgânica, obtidas neste estudo, para as duas concentrações de carvão ativado usadas, 2,5 e 5,0 g/L, foram 517 e 365 mg de DQO/g de carvão ativado, respectivamente. Esses valores, quando comparados com aqueles observados na literatura (Rivas et al., 2006; Silva Jr., 2007; Foo e Hameed, 2009; Cotman e Gotvajn, 2010) para chorumes estabilizados, revelam em alguns casos uma larga superioridade, demonstrando ser o carvão ativado usado neste estudo um adsorvente com características promissoras para a remoção de matéria orgânica de chorumes estabilizados.

Igualmente à coagulação, as remoções de DQO e cor para a menor concentração de carvão ativado foram muito semelhantes. Contudo, para a concentração mais elevada percebe-se uma maior remoção de cor frente à DQO, fato esse que pode ser explicado

pela possível remoção de uma fração das substâncias húmicas, dada a maior disponibilidade de área superficial para adsorver esses compostos, reconhecidamente de alto peso molecular.

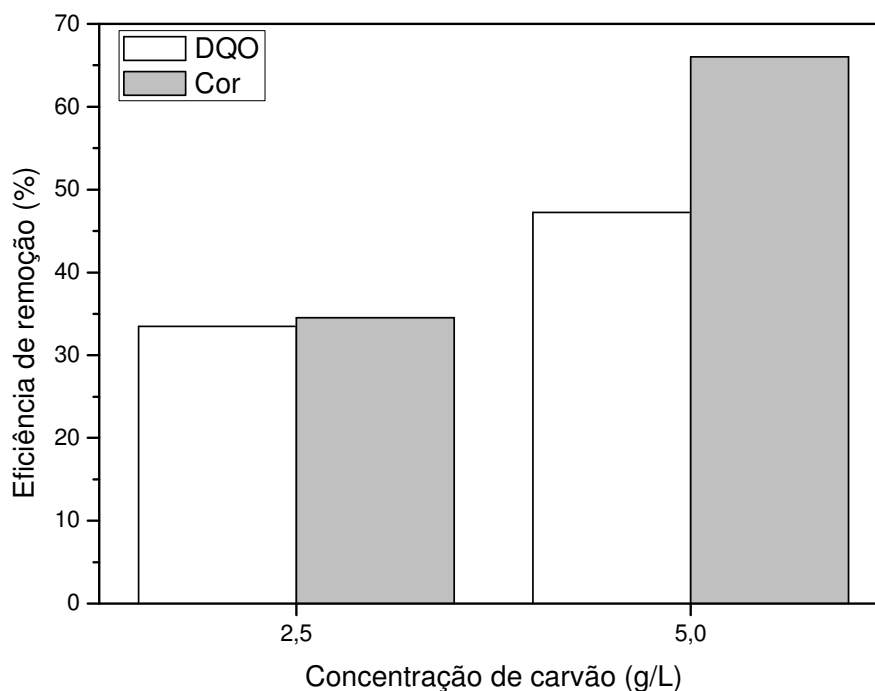


Figura 5.4 - Efeito da concentração de carvão ativado na remoção de DQO e cor do chorume (pH = 8,3)

Observando-se os resultados dos testes de tratamento aplicados individualmente ao chorume bruto, percebe-se que, de um modo geral, todos os três tratamentos apresentaram significativa remoção de DQO e cor do chorume. Avaliando-se os três tratamentos pode-se verificar que, individualmente, para os níveis empregados para as variáveis (pH, concentração de PAC e concentração de carvão ativado) a adsorção foi a mais eficiente tanto na remoção de cor quanto de DQO. Porém é interessante ressaltar que essas eficiências podem ser maximizadas se esses processos forem combinados, pois fica evidente, pelo comportamento das diferenças entre as remoções de cor e DQO, que cada tratamento remove, preferencialmente, frações diferenciadas da matéria orgânica presente no chorume, nas condições testadas até o presente momento. Este fato sugere que pode haver alguma relação entre eles que possa favorecer ainda mais essa remoção.

Assim, de forma a maximizar essas remoções, buscou-se identificar qual o tratamento mais adequado com relação à remoção de DQO e cor, a partir da combinação desses tratamentos. Inicialmente a combinação da coagulação seguida da adsorção em carvão ativado, sem que qualquer alteração do pH do meio fosse feita, foi avaliada, e os resultados dessa etapa estão apresentados nas Figuras 5.5 e 5.6 e na Tabela A.2 do apêndice desse trabalho.

Nestas figuras pode-se ver que o uso combinado da coagulação seguida da adsorção nas condições mais favoráveis, ou seja, máximas concentrações de coagulante (1000 mg/L) e carvão ativado (5 g/L), foi capaz de fornecer um incremento de 19% na redução da DQO, atingindo-se uma remoção da ordem de 62% da DQO inicial do chorume bruto. Contudo, em termos de cor, para essas mesmas condições, houve um aumento de 43% na remoção da cor, chegando-se a uma remoção de quase 94% da cor do chorume.

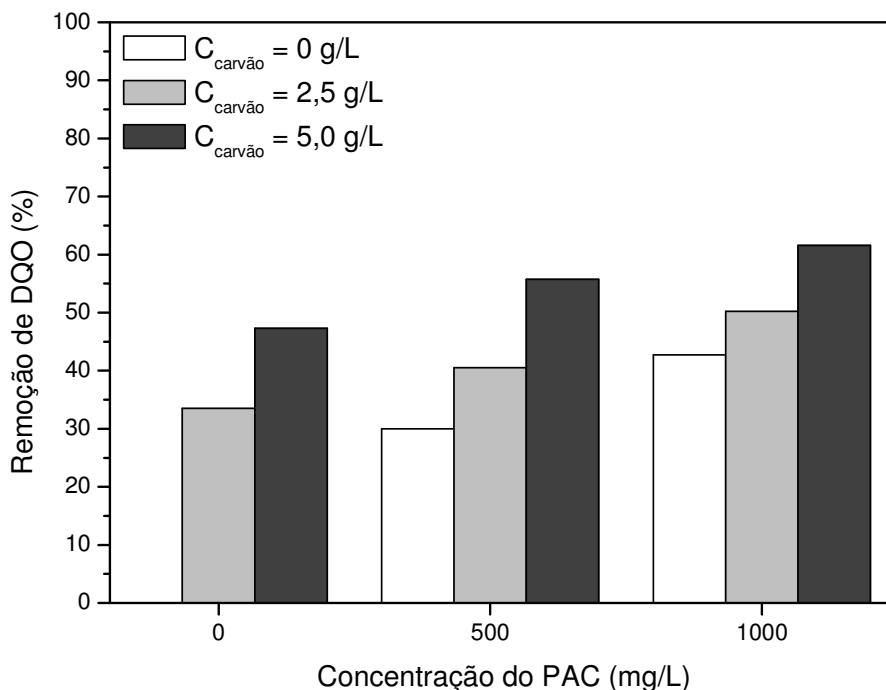


Figura 5.5 - Efeito da combinação da coagulação e da adsorção na remoção de DQO do chorume (pH = 8,3)



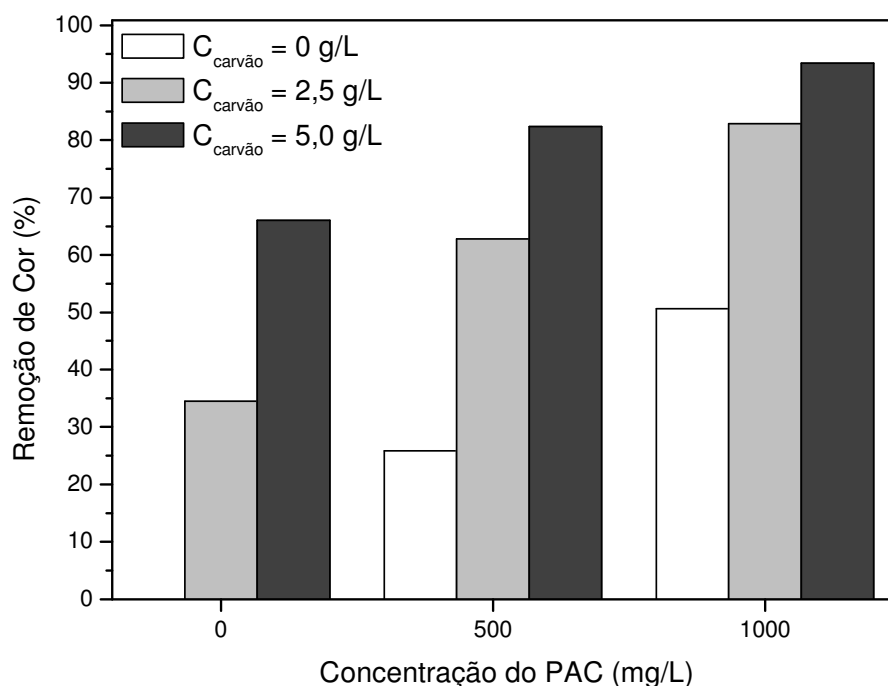


Figura 5.6 - Efeito da combinação da coagulação e da adsorção na remoção de cor do chorume (pH = 8,3)

Analisando estes resultados é possível verificar que a combinação da coagulação com a adsorção permitiu que, após a remoção de uma parcela de matéria orgânica pela coagulação, a qual não parece contemplar as substâncias húmicas, a remoção destas substâncias pelo carvão ativado fosse mais eficiente, haja vista o grande incremento na remoção de cor obtida após a etapa da adsorção.

Estes resultados demonstram que a combinação destes tratamentos é bastante eficaz para a remoção de cor, contudo ainda ineficiente para a remoção de DQO do chorume.

Apenas em caráter ilustrativo, as remoções de cor do chorume, obtidas nestes ensaios (28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35), podem ser visualizadas na Figura 5.7. Os resultados experimentais desses ensaios estão apresentados na Tabela A.2 do apêndice desse trabalho.

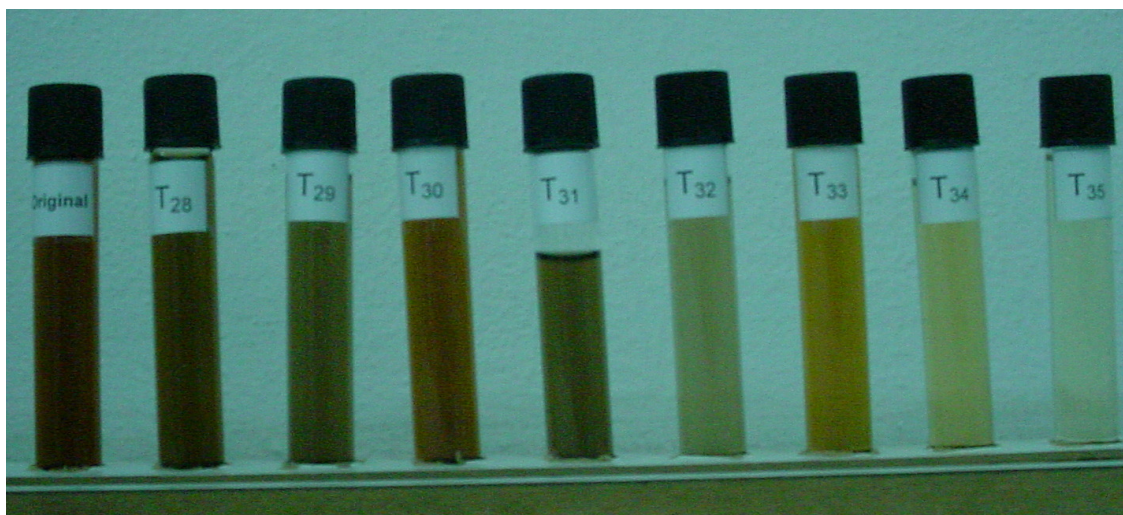


Figura 5.7 - Remoção de cor do chorume pelos processos de coagulação e adsorção em carvão ativado, aplicados de forma isolada e associada

Diversos trabalhos apresentados na literatura (Rivas et al, 2004; Ntampou et al., 2006; Aziz et al., 2007; Ghafari et al, 2009; Guo et al., 2010) destacam a influência do pH na coagulação. Dessa forma, a fim de maximizar as eficiências de remoção de DQO e cor do chorume e conhecer a relação entre as variáveis dos processos envolvidos, essa variável passou a ser objeto de estudo e uma série de novos experimentos foi realizada, na qual todos os três tratamentos foram avaliados de forma combinada. Para tanto, foi feito um planejamento experimental do tipo fatorial  $3^3$ , cujos experimentos foram realizados em duplicata, no qual as três variáveis, pH, concentração de coagulante e concentração de carvão foram avaliadas. No item a seguir os resultados destes testes são apresentados e discutidos.

#### **5.2.4 Efeito da combinação dos tratamentos na remoção de DQO e cor do chorume**

Os resultados das remoções de DQO e cor do chorume obtidos a partir do planejamento experimental, mostrado na Tabela 4.5, estão apresentados na Tabela A.2 do apêndice deste trabalho.

Estes resultados, quando ajustados a um modelo polinomial quadrático, permitiram a obtenção das correlações empíricas dadas pelas Equações 5.3 e 5.4, as quais descrevem a remoção de DQO e cor, respectivamente.

$$R_{DQO}(\%) = 84,8 - 9,8.x_1 - 18,6.x_1^2 + 18,4.x_2 - 18,6.x_2^2 + 19,4.x_3 - 14,7.x_3^2 + 1,6.x_1.x_2 + \\ - 7,8.x_1^2.x_2 + 14,0.x_1^2.x_2^2 + 4,7.x_1^2.x_3^2 - 3,0.x_2.x_3 + 2,6.x_2^2.x_3 \quad (5.4)$$

$$R_{Cor}(\%) = 100,9 - 8,2.x_1 - 11,4.x_1^2 + 21,1.x_2 - 22,4.x_2^2 + 6,5.x_3 - 5,9.x_3^2 + 7,5.x_1.x_2 + \\ - 4,8.x_1.x_2^2 - 8,3.x_1^2.x_2 + 13,7.x_1^2.x_2^2 + 4,2.x_1.x_3 + 5,5.x_1^2.x_3 + \\ - 7,6.x_2.x_3 + 3,0.x_2.x_3^2 + 6,3.x_2^2.x_3 \quad (5.5)$$

Nestas equações,  $x_1$ ,  $x_2$  e  $x_3$  representam as variáveis independentes, pH, concentração do PAC e concentração do carvão ativado nas suas formas codificadas, conforme as Equações 4.1, 4.2 e 4.3, respectivamente.

Estas correlações, obtidas através do software Statistica® no modo Planejamento de Experimentos, representam 98,1% ( $R^2$ ) e 98,6% ( $R^2$ ) da variabilidade dos dados experimentais, para a remoção de DQO e cor, respectivamente. Nestas correlações os coeficientes de regressão foram estimados pelo método dos mínimos quadrados e avaliados tomando-se como base um nível de significância de 5% (Montgomery, 1997; Myers e Montgomery, 1995). As Tabelas 5.3 e 5.4 apresentam os coeficientes de regressão, obtidos para ambas as variáveis independentes, com os seus respectivos erros padrões, valores p e intervalos de confiança.

O efeito de cada variável e de suas interações pode ser observado nas Tabelas 5.3 e 5.4. É possível visualizar que todas as variáveis independentes, bem como, várias interações entre elas são significativas na remoção da DQO e da cor do chorume.

Tabela 5.3 - Coeficientes de regressão do modelo polinomial quadrático para a variável dependente remoção de DQO

Fator	Coeficiente de regressão	Erro padrão	Valor p	Intervalo de confiança	
				-95%	95%
Média	84,8	2,0	0,0000	80,7	88,9
$x_1$	-9,8	1,3	0,0000	-12,4	-7,3
$x_1^2$	-18,6	2,2	0,0000	-23,0	-14,1
$x_2$	18,4	1,3	0,0000	15,8	20,9
$x_2^2$	-18,6	2,2	0,0000	-23,1	-14,2
$x_3$	19,4	1,3	0,0000	16,9	22,0
$x_3^2$	-14,7	2,2	0,0000	-19,1	-10,2
$x_1 \cdot x_2$	1,6	0,7	0,0308	0,2	3,0
$x_1 \cdot x_2^2$	<b>-1,1</b>	<b>1,2</b>	<b>0,3838</b>	<b>-3,5</b>	<b>1,4</b>
$x_1^2 \cdot x_2$	-7,8	1,2	0,0000	-10,2	-5,3
$x_1^2 \cdot x_2^2$	14,0	2,1	0,0000	9,7	18,2
$x_1 \cdot x_3$	<b>0,2</b>	<b>0,7</b>	<b>0,7333</b>	<b>-1,2</b>	<b>1,7</b>
$x_1 \cdot x_3^2$	<b>1,9</b>	<b>1,2</b>	<b>0,1315</b>	<b>-0,6</b>	<b>4,3</b>
$x_1^2 \cdot x_3$	<b>1,1</b>	<b>1,2</b>	<b>0,3589</b>	<b>-1,3</b>	<b>3,6</b>
$x_1^2 \cdot x_3^2$	4,7	2,1	0,0300	0,5	9,0
$x_2 \cdot x_3$	-3,0	0,7	0,0001	-4,4	-1,6
$x_2 \cdot x_3^2$	<b>0,9</b>	<b>1,2</b>	<b>0,4683</b>	<b>-1,6</b>	<b>3,3</b>
$x_2^2 \cdot x_3$	2,6	1,2	0,0353	0,2	5,1
$x_2^2 \cdot x_3^2$	<b>-1,5</b>	<b>2,1</b>	<b>0,4720</b>	<b>-5,8</b>	<b>2,7</b>

Obs.: os coeficientes estatisticamente não significativos estão em negrito

Tabela 5.4 - Coeficientes de regressão do modelo polinomial quadrático para a variável dependente remoção de cor

Fator	Coeficiente de regressão	Erro padrão	Valor p	Intervalo de confiança	
				-95%	95%
Média	100,9	1,7	0,0000	97,5	104,4
$x_1$	-8,2	1,1	0,0000	-10,4	-6,0
$x_1^2$	-11,4	1,9	0,0000	-15,2	-7,6
$x_2$	21,1	1,1	0,0000	19,0	23,3
$x_2^2$	-22,4	1,9	0,0000	-26,2	-18,6
$x_3$	6,5	1,1	0,0000	4,3	8,7
$x_3^2$	-5,9	1,9	0,0032	-9,7	-2,1
$x_1 \cdot x_2$	7,5	0,6	0,0000	6,3	8,7
$x_1 \cdot x_2^2$	-4,8	1,0	0,0000	-6,9	-2,7
$x_1^2 \cdot x_2$	-8,3	1,0	0,0000	-10,3	-6,2
$x_1^2 \cdot x_2^2$	13,7	1,8	0,0000	10,1	17,3
$x_1 \cdot x_3$	4,2	0,6	0,0000	3,0	5,4
$x_1 \cdot x_3^2$	<b>1,3</b>	<b>1,0</b>	<b>0,2100</b>	<b>-0,8</b>	<b>3,4</b>
$x_1^2 \cdot x_3$	5,5	1,0	0,0000	3,5	7,6
$x_1^2 \cdot x_3^2$	<b>-0,5</b>	<b>1,8</b>	<b>0,7739</b>	<b>-4,1</b>	<b>3,1</b>
$x_2 \cdot x_3$	-7,6	0,6	0,0000	-8,8	-6,4
$x_2 \cdot x_3^2$	3,0	1,0	0,0061	0,9	5,1
$x_2^2 \cdot x_3$	6,3	1,0	0,0000	4,2	8,3
$x_2^2 \cdot x_3^2$	<b>-2,2</b>	<b>1,8</b>	<b>0,2148</b>	<b>-5,8</b>	<b>1,4</b>

Obs.: os coeficientes estatisticamente não significativos estão em negrito

A adequação do modelo para representar os dados experimentais, já demonstrada pelo alto valor dos coeficientes de regressão ( $R^2 > 98\%$ ), também pode ser observada nos gráficos que correlacionam os dados experimentais com aqueles previstos pelo modelo proposto. As Figuras 5.8 e 5.9 apresentam esses gráficos para a remoção de DQO e cor, respectivamente. Nestas figuras vê-se que há uma concordância entre estes valores.

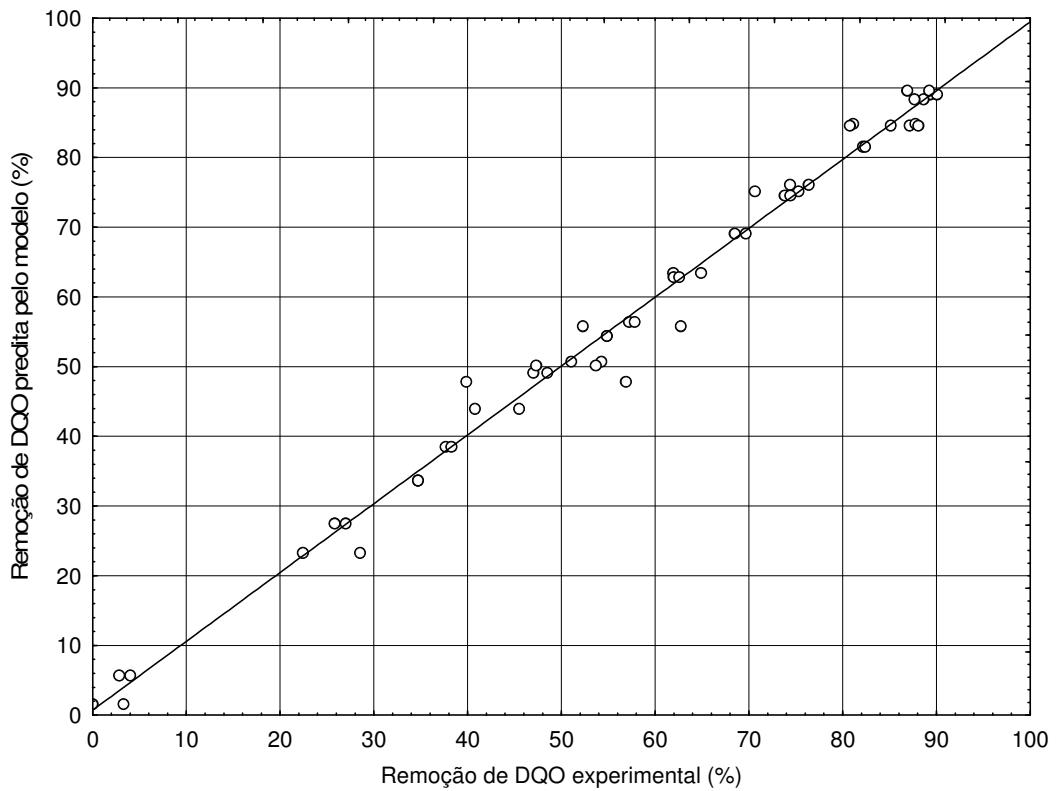


Figura 5.8 - Valores preditos pelo modelo comparados com aqueles obtidos experimentalmente para a remoção de DQO.

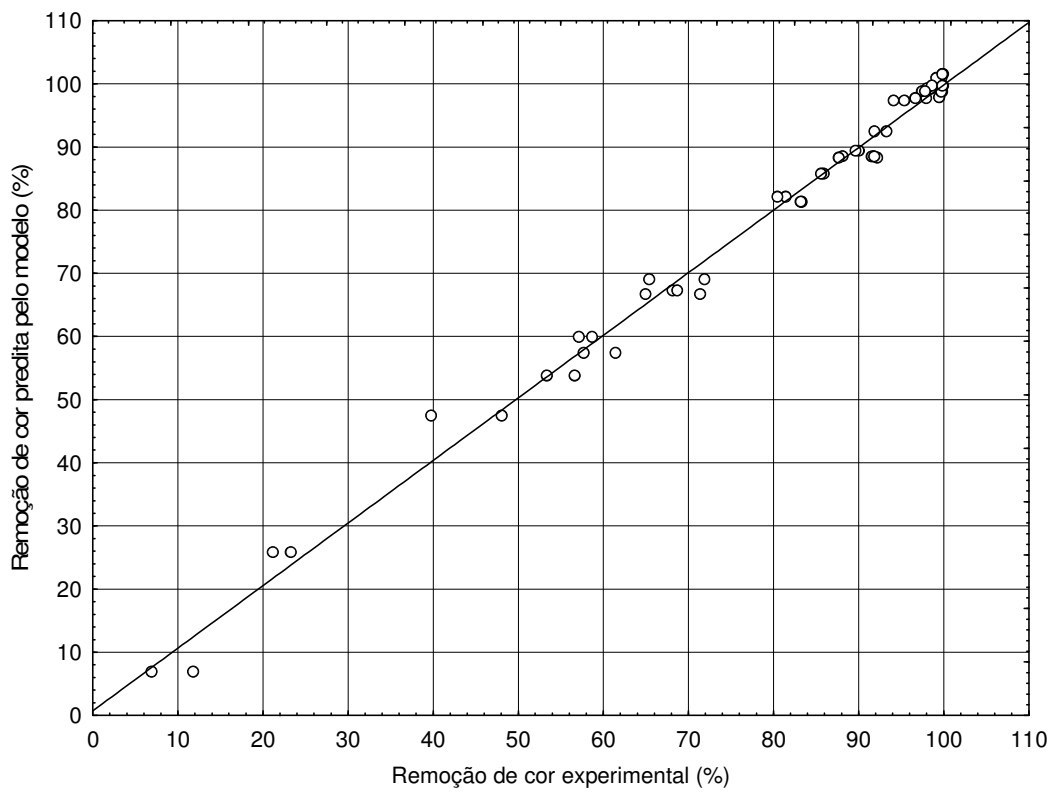


Figura 5.9 - Valores preditos pelo modelo comparados com aqueles obtidos experimentalmente para a remoção de cor.

Ao se analisar um modelo empírico no qual a influência das variáveis está na forma linear, quadrática e de interações, é de grande utilidade construir superfícies de resposta tridimensionais de modo a melhor visualizar o efeito dessas variáveis sobre a resposta desejada (Hill e Hunter, 1966).

Partindo-se desse princípio foram construídos gráficos de superfícies de respostas para as variáveis estudadas a fim de que se possa melhor avaliar a influência de cada uma delas sobre a remoção de DQO e cor do chorume. Estas superfícies estão apresentadas nas Figuras 5.10 a 5.12 e 5.13 a 5.15, as quais foram obtidas fixando-se uma das três variáveis, no caso o pH, a um determinado valor e variando-se as outras duas variáveis em estudo.

Observando-se estas figuras, pode-se constatar que a combinação dos métodos físico-químicos aqui estudados (acidificação, coagulação e adsorção) tem a capacidade de remover completamente a cor e uma parcela expressiva de matéria orgânica recalcitrante contida no chorume gerado no lixão da cidade de Maceió/AL.

Partindo-se de uma análise das superfícies de respostas obtidas é possível observar, dentro do espaço experimentado, quais às condições que levam às eficiências máximas de remoções de matéria orgânica e cor do chorume. Neste caso, a combinação dos processos envolvidos que culminou em maior remoção de matéria orgânica e cor do chorume se deu em pH 5, concentração de PAC de 500 mg/L e concentração de carvão ativado de 5,0 g/L. Neste caso, as remoções experimentais de cor e DQO foram 99,9% e 88,1%, respectivamente.

Esses resultados são comparativamente superiores aos obtidos por Silva Jr. (2007), haja vista que em seu estudo as condições que culminaram nas máximas remoções de DQO e cor, 80 e 100%, respectivamente, foram às seguintes: acidificação do chorume até pH 4,5, concentração de cloreto férrico de 1000 mg/L e concentração de carvão ativado comercial de 20 g/L. Observa-se neste caso que há um consumo muito maior tanto de coagulante quanto de adsorvente, para se obter remoções da mesma ordem de grandeza daquelas obtidas no presente estudo.

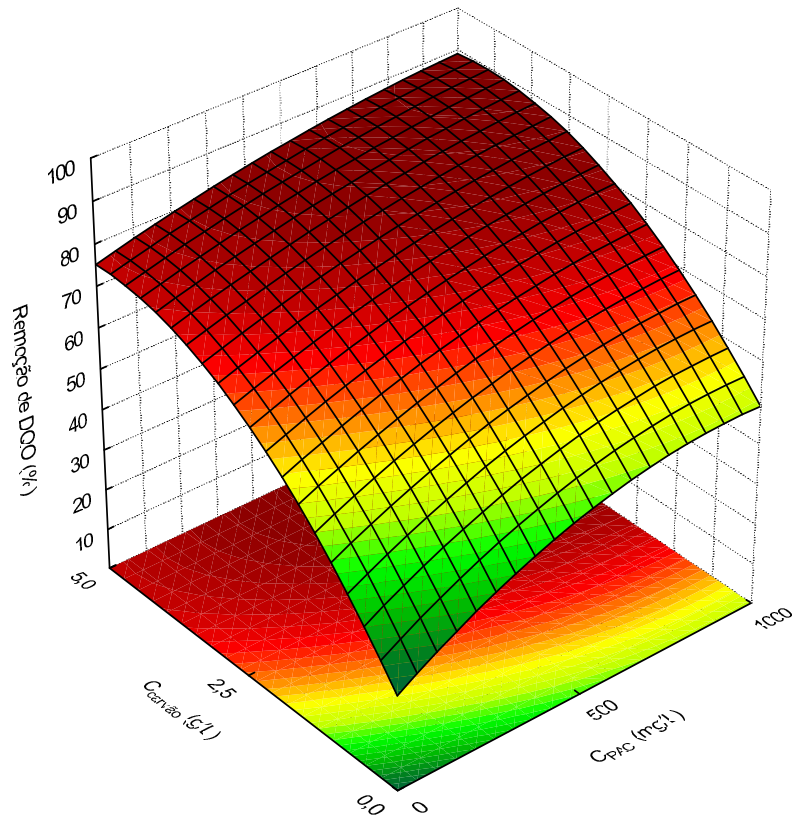


Figura 5.10 - Influência da concentração do PAC e do carvão ativado, na remoção de DQO, para  $\text{pH} = 3,0$ .

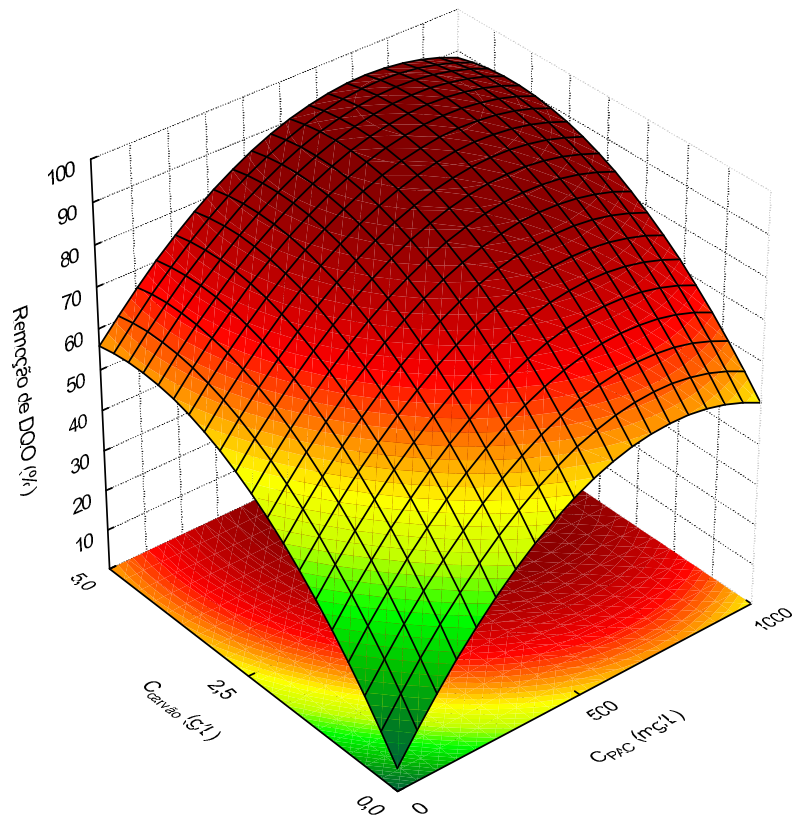


Figura 5.11 - Influência da concentração do PAC e do carvão ativado, na remoção de DQO, para  $\text{pH} = 5,0$ .



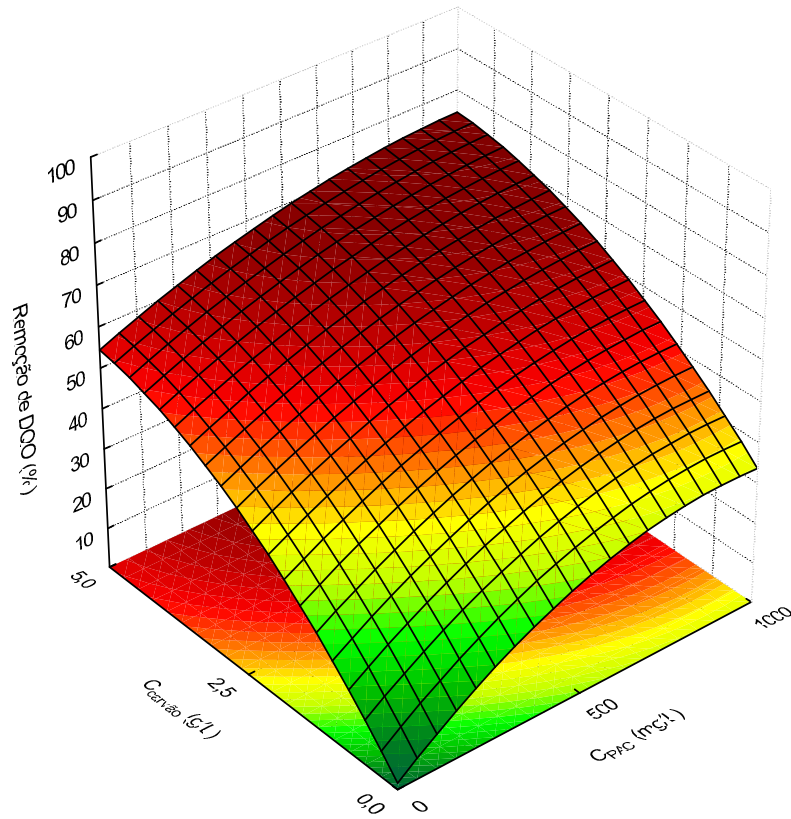


Figura 5.12 - Influência da concentração do PAC e do carvão ativado, na remoção de DQO, para  $\text{pH} = 7,0$ .

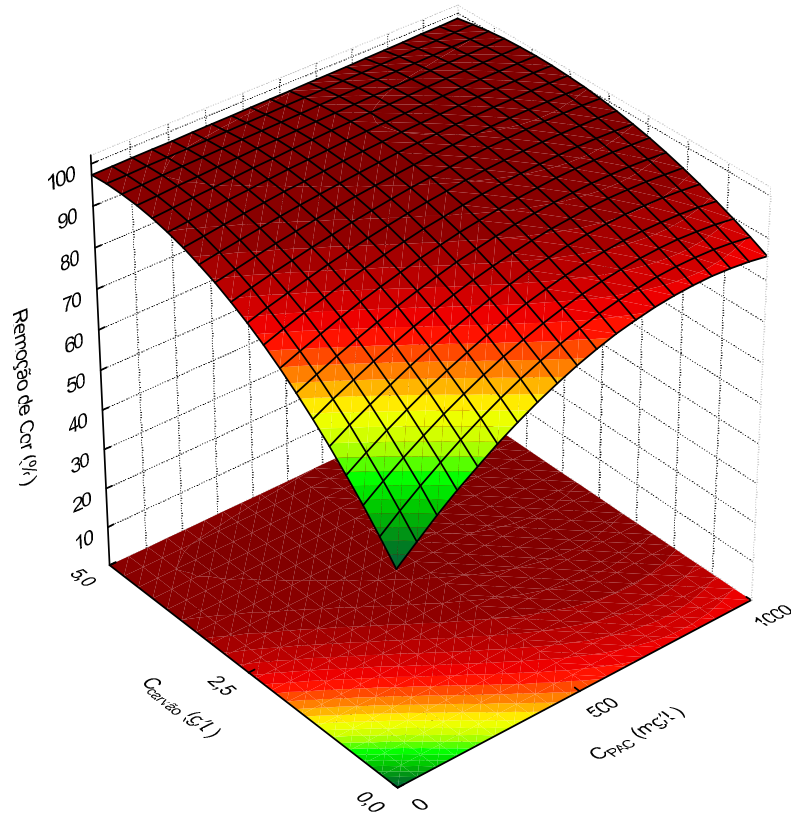


Figura 5.13 - Influência da concentração do PAC e do carvão ativado, na remoção de cor, para  $\text{pH} = 3,0$ .

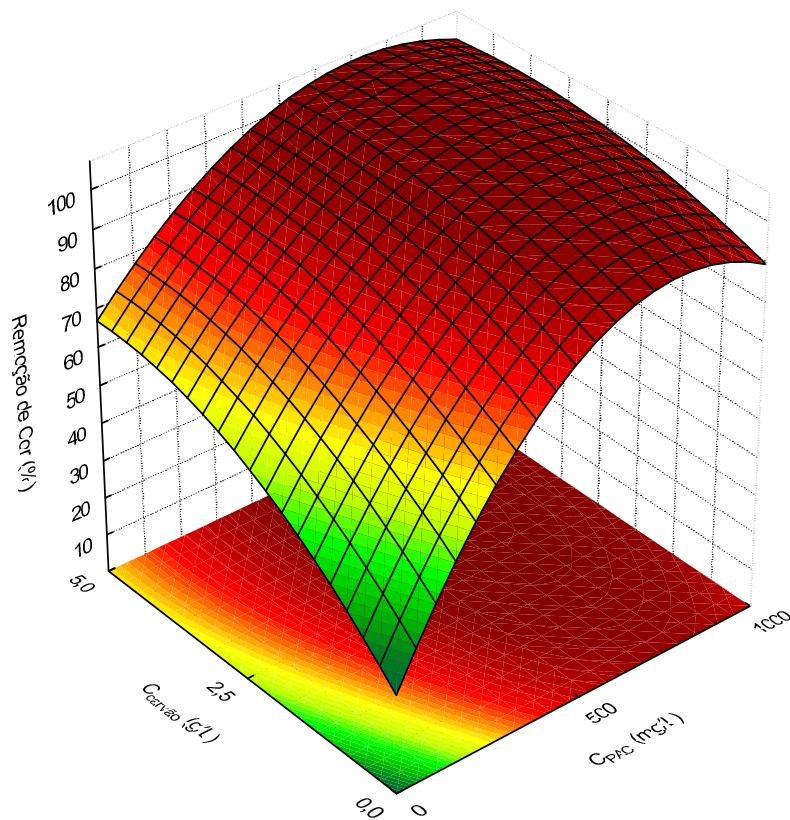


Figura 5.14 - Influência da concentração do PAC e do carvão ativado, na remoção de cor, para pH = 5,0.

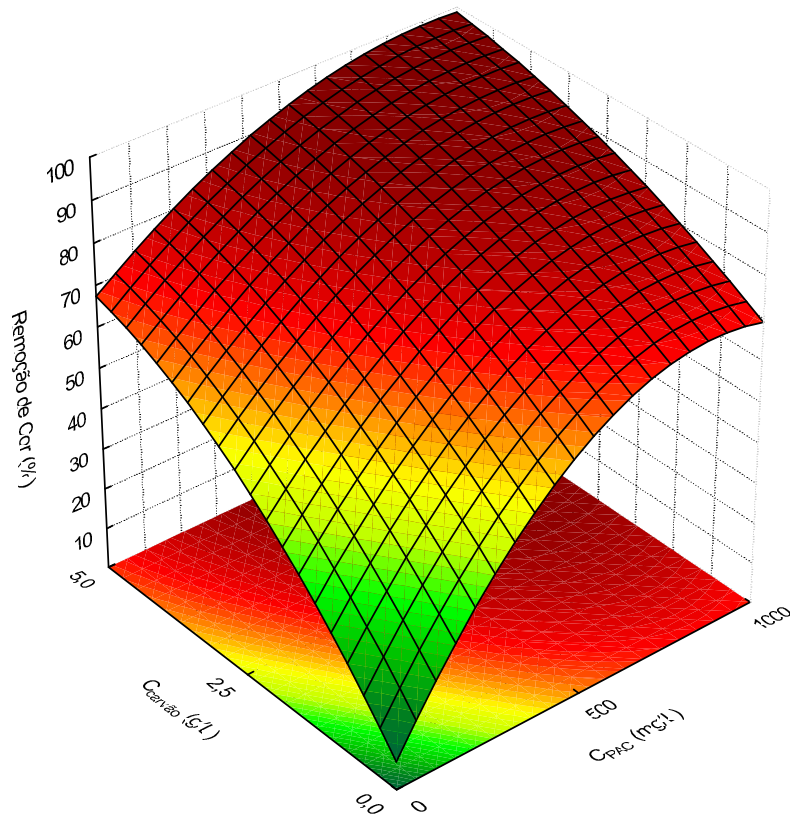


Figura 5.15 - Influência da concentração do PAC e do carvão ativado, na remoção de cor, para pH = 7,0.

É evidente pelas figuras apresentadas que, dada às altas remoções de cor obtidas experimentalmente, o modelo ajustado tende a estimar valores superiores a 100% em algumas regiões, o que não tem absolutamente nenhum significado físico, ficando a remoção nestes casos limitada a 100%.

A região que maximiza as remoções de DQO e cor coincide com a faixa de pH que segundo Ntampou et al. (2006) favorece a adsorção da matéria orgânica, especialmente as substâncias húmicas, pelos hidróxidos formados no processo de coagulação. Os resultados experimentais comprovaram que a associação da acidificação até pH 5 seguida da coagulação foi responsável pela remoção de uma grande parcela de cor ( $\approx 91\%$ ) e uma fração menos significativa de DQO (52%). Essas remoções, muito provavelmente, estão relacionadas em sua maioria às substâncias húmicas. A combinação da adsorção em carvão ativado como última etapa, fazendo o pós-tratamento deste sobrenadante, resultou num acréscimo significativo ( $\approx 35\%$ ) na remoção da DQO remanescente, certamente não atribuída completamente às substâncias húmicas, haja vista a pouca coloração residual ( $\approx 8\%$ ) do chorume neste estágio, comparada à DQO residual ( $\approx 48\%$ ).

A Figura 5.16 ilustra em caráter exemplificativo a remoção da cor obtida nos ensaios realizados quando da combinação dos três processos. Nesta figura, em todos os ensaios (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 e 9), o chorume foi inicialmente acidificado até pH igual a 3. Os resultados experimentais destes ensaios estão apresentados na Tabela A.2 do apêndice desse trabalho.



Figura 5.16 – Remoção de cor do chorume pelos processos de acidificação (pH =3), coagulação e adsorção em carvão ativado, aplicados de forma combinada.

## 6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Analisando-se os resultados obtidos neste estudo foi possível concluir que:

- O chorume gerado no lixão de Maceió é um resíduo, cujas características apresentadas indicam se tratar de um poluente em potencial, não podendo o mesmo ser lançado, indiscriminadamente, em corpos de d'água receptores, sob pena de provocar grande impacto ambiental. Fica constatado, dessa forma, a necessidade imprescindível de tratamento deste lixiviado, antes do seu lançamento no meio ambiente;

- Em geral os resultados da caracterização obtidos neste estudo estão de acordo com aqueles encontrados por vários outros pesquisadores para chorumes oriundos de aterros mais antigos. As amostras coletadas mostraram características similares, tais como, coloração marrom intenso devido, provavelmente, à presença de substâncias húmicas, pH alcalino, altas concentrações de nitrogênio amoniacal e cloretos, baixa relação DBO/DQO, indicando se tratarem de chorume em estado avançado de degradação, recalcitrante e, portanto, pouco recomendado para tratamento biológico;

- Os tratamentos físico-químicos avaliados isoladamente apresentaram significativa remoção de DQO e cor do chorume bruto. Avaliando-se os três tratamentos pode-se concluir que, individualmente, para os níveis empregados para as variáveis objeto do presente estudo (pH, concentração de PAC e concentração de carvão ativado) a adsorção em carvão ativado foi o tratamento mais eficiente, tanto na remoção de cor quanto de DQO, atingindo-se valores da ordem de 66 e 47%, respectivamente;

- Para os resultados obtidos quando da combinação de dois dos tratamentos, podemos concluir que a acidificação do chorume até pH 3, seguido da adsorção, cuja concentração de carvão era de 5 g/L foi o sistema mais eficiente, atingindo-se valores de remoção de cor e DQO da ordem de 95 e 73 %, respectivamente;

- A análise dos resultados da combinação dos três processos mostrou que, para os níveis utilizados, todas as

variáveis avaliadas foram significativas, tanto na remoção da cor quanto da DQO. A combinação dos processos envolvidos que culminou em maior remoção de matéria orgânica e cor do chorume se deu em pH 5, concentração de PAC de 500 mg/L e concentração de carvão ativado de 5,0 g/L. Neste caso, as remoções obtidas experimentalmente, de cor e DQO, foram 99,9% e 88,1%, respectivamente;

- De um modo geral, dos resultados obtidos neste estudo, pode-se concluir que a combinação dos tratamentos aqui avaliados constitui uma promissora alternativa de tratamento para chorumes oriundos de resíduos em estado avançado de degradação, em especial, o gerado no lixão da cidade de Maceió/AL.

Como sugestões para trabalhos futuros, objetivando dar continuidade e complementar o presente trabalho, seria interessante realizar novos estudos variando-se o tipo de coagulante e utilizando-se carvões com características distintas a fim de que se possa melhor avaliar as relações entre os processos envolvidos, bem como o potencial de remoção de cada processo individualmente.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMOKRANE, A.; COMEL, C.; VERON, J. (1997). Landfill leachate pre-treatment by coagulation-flocculation. **Water Resource**, v.31, p. 2775-2782.
- AZIZ, H.A.; ADLAN, M.N.; ZAHARI, M.S.M.; ALIAS, S. (2005). Removal of ammoniacal-nitrogen (N-NH<sub>3</sub>) from municipal solid waste leachate by using activated carbon and lime stone. **Waste Management**, v.22, p.371-374.
- AZIZ, H. A.; ALIAS, S.; ADLAN, M. N.; FARIDAH, ASAARI, A. H.; ZAHARI, M. S. (2007). Colour removal from landfill leachate by coagulation and flocculation processes. **Bioresource Technology**, v.98, p.218-220.
- BAE, B.; JUNG, E.; KIM, Y.; SHIN, H. (1999). Treatment of landfill leachate using activated sludge process and electron-beam radiation. **Water Resource**, v.33, p. 2669-2673.
- BASHIR, M.J.K.; AZIZ, H.A.; YUSOFF, M.S.; AZIZ, S.Q.; MOHAJERI, S. (2010). Stabilized sanitary landfill leachate treatment using anionic resin: Treatment optimization by response surface methodology. **Journal of Hazardous Materials**, v.182, p.115-122.
- BIDONE, F.R.A.; POVINELLI, J.; COTRIM, S.L.S. (1997). Tratamento de lixiviado de aterro sanitário através de filtros percoladores. in: **Anais do 19º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**, Foz do Iguaçu - PR.
- BRETSCHNEIDER, B.; KURFURST, J. (1987). **Air pollution control technology**, Prague: Elsevier, 296 p.
- CALHEIROS, S.Q.C. (Coordenadora) (2004). **Gerenciamento Integrado para Transferência e Destino Final dos Resíduos Sólidos Urbanos de Maceió - Relatório Final**. Convênio Nº 01/2003 UFAL-PMM/SLUM.
- CAMPOS, J.C.; FERREIRA, J.A.; RITTER, E.; MANNARINO, C.F. (2003). Filtro biológico aeróbio - Resultados no tratamento do chorume do aterro sanitário de Piraí - RJ. in: **Anais do 22º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**, Joinville - SC.
- CARRASCO-MARÍM, F.; HIDALGO-UTRERA, E.; RIVERA-UTRILLA, J. CASTILLA-MORENO, C. (1992). Adsorption of SO<sub>2</sub> in flowing air onto activated carbons from olive stones, **Fuel**, v.71, p.575-578.
- CAVALCANTE, L.E.G.; OLIVEIRA, K.P.S.; NÓBREGA, S.W.; FERREIRA, I.V.L. (1997). Caracterização dos resíduos sólidos urbanos da cidade de Maceió - AL. in: **Livro de resumos do 19º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**, Foz do Iguaçu - PR.

- CHIAN, E.S.K.; DeWALLE; F.B. (1977). Characterization of soluble organic matter in leachate, **Environmental Science and Technology**. v.11, n.2, p.158-163.
- CHRISTENSEN, J.B.; JENSEN, D.L.; GRON, C.; FILIP, Z.; CHRISTENSEN, T.H. (1998). Characterization of the dissolved organic carbon in landfill leachate-polluted groundwater, **Water Research**. v.32, n.1, p.125-135.
- CHU, L.M.; CHEUNG, K.C.; WONG, M.H. (1994). Variations in the chemical properties of landfill leachate. **Environmental Management**, v.18, n.1, p.105-117.
- COELHO, D.G.; SILVA Jr., J.R.; NÓBREGA, S.W.; RODRIGUES, C.C. (2008). Avaliação da remoção de matéria orgânica de chorume através da associação de tratamentos físico-químicos. in: **Anais do VII Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica**, São Carlos, SP.
- COTMAN, M.; GOTVAJN, A.Z. (2010). Comparison of different physico-chemical methods for the removal of toxicants from landfill leachate. **Journal of Hazardous Materials**, v.178, p.298-305.
- COUTO, M.C.L.; BRAGA, F.S. (2003). Tratamento de chorume de aterro sanitário por associação de reator anaeróbio de fluxo ascendente com manta de lodo e reator anaeróbio por infiltração rápida. in: **Anais do 22º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**, Joinville - SC.
- DENG, Y. (2007). Physical and oxidative removal of organics during Fenton treatment of mature municipal landfill leachate. **Journal of Hazardous Materials**, v.146, p.334-340.
- DeWALLE, F.B.; LIGHT, W.G.; CHIAN, E.S.K. (1982). Organic carbon removal by advanced waste water treatment processes, **Environmental Science and Technology**. v.16, n.11, p.741-746.
- DIAMADOPOULOUS, E. (1994). Characterization and treatment of recirculation-stabilized leachate. **Water Research**, v.38, p.2439-2445.
- EL-FADEL, M.; BOU-ZEID, E.; CHAHINE, W.; ALAYLI, B. (2002). Temporal variation of leachate quality from pre-sorted and baled municipal solid waste with organic and moisture content. **Waste Management**, v.22, p.269-282.
- ENZMINGER, J.D.; ROBERTSON, D.; AHLERT, R.C.; KOSSON, D.S. (1987). Treatment of landfill leachates. **Journal of Hazardous Materials**, v.14, p.83-101.
- FAN, H.; SHU, H.; YANG, H.; CHEN, W. (2006). Characteristics of landfill leachates in central Taiwan. **Science of the Environment**, v.361, p.25-37.

- FETTING, J.; STAPEL, H.; STEINERT, C.; GEIGER, M. (1996). Treatment of landfill leachate by preozonation and adsorption in activated carbon columns. **Water Science Technology**, v.34, p.33-40.
- FILHO, I.N.; MÜHLEN, C.V.; CARAMÃO, E.B. (2001). Estudo de compostos orgânicos em lixiviados de aterros sanitários por EFS e CG/EM. **Química Nova**, v.24, n.4, p.554-556.
- FLECK, E. (2003). Sistema integrado por filtro anaeróbio, filtro biológico de baixa taxa e banhado construído aplicado ao tratamento de lixiviado de aterro sanitário. **Dissertação de Mestrado**. Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 323p.
- FOO, K.Y.; HAMEED, B.H. (2009). An overview of landfill leachate treatment via activated carbon adsorption process. **Journal of Hazardous Materials**, v.171, p.54-60.
- GIORDANO, G.; FERREIRA, J.A.; PIRES, J.C.A.; RITTER, E.; CAMPOS, J.C.; ROSSO, T.C.A. (2002). Tratamento do chorume do aterro metropolitano de Gramacho - Rio de Janeiro - Brasil. **in: anais XXVIII Congresso Interamericano de Ingeniería y Ambiental**, Cancún, México.
- GHAFAARI, S.; AZIZ, H.A.; ISA, M.H.; ZINATIZADEH, A.A. (2009). Application of response surface methodology (RSM) to optimize coagulation-flocculation treatment of leachate using poly-aluminum chloride (PAC) and alum. **Journal of Hazardous Materials**, v.163, p.650-656.
- GUO, JIN-SONG; ABBAS, A.A.; CHEN, YOU-PENG; LIU, ZHI-PING; FANG, F.; CHEN, P. (2010). Treatment of landfill leachate using a combined stripping, Fenton, SBR, and coagulation process. **Journal of Hazardous Materials**, v.178, p.699-705.
- HALIM, A.A.; AZIZ, H.A.; JOHARI, M.A.M.; ARIFFIN, K.S. (2010). Comparison study of ammonia and COD adsorption on zeolite, activated carbon and composite materials in landfill leachate treatment. **Desalination**, v.262, p.31-35.
- HAMADA, J. (1997). Estimativas de geração e caracterização do chorume em aterros sanitários. **in: Anais do 19º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**, Foz do Iguaçu - PR.
- HEAVEY, M. (2003). Low-cost treatment of landfill leachate using peat. **Water Management**, v.23, p.447-454.
- HEUMANN, W.L. (1997). **Industrial air pollution control systems**, New York: McGraw-Hill, 620 p.
- HILL, W.J.; HUNTER, W.G. (1966). A review of response surface methodology: a literature survey. **Technometrics**, v.8, n.4, p.236-239.



- IBGE (2010). **Pesquisa nacional de saneamento básico - Ano base 2008 (PSNB-2008)**. Rio de Janeiro, 219p.
- IMAI, A.; ONUMA, K.; INAMORI, Y.; SUDO, R. (1995). Biodegradation and adsorption in refractory leachate treatment by the biological activated carbon fluidized bed process, **Water Research**, v.29, p.687-694.
- KANG, K.H.; SHIN, H.S.; PARK, H. (2002). Characterization of humic substances present in landfill leachates with different landfill ages and its implications. **Water Research**, v.36, p.4023-4032.
- KARGI, F.; PAMUKOGLU, M.Y. (2004a). Pretreated fed-batch biological treatment of pre-treated landfill leachate by powdered activated carbon addition, **Enzyme and Microbial Technology**, v.34, p.422-428.
- KARGI, F.; PAMUKOGLU, M.Y. (2004b). Adsorbent supplemented biological treatment of pre-treated landfill leachate by fed-batch operation. **Bioresource Technology**, v.94, p.285-291.
- KRUMINS, V.; HUMMERICK, M.; LEVINE, L.; STRAYER, R.; ADAMS, J.L.; BAUER, J. (2002). Effect of hydraulic retention time on inorganic nutrient recovery and biodegradable organics removal in a biofilm reactor treatment plant biomass leachate. **Bioresource Technology**, v.85, p.243-248.
- KURNIAWAN, T.A.; LO, W.; CHAN, G.Y.S. (2006a). Physico-chemical treatments for removal of recalcitrant contaminants from landfill leachate. **Journal of Hazardous Materials**, v.129, p.80-100.
- KURNIAWAN, T.A.; LO, W.; CHAN, G.Y.S. (2006b). Degradation of recalcitrant compounds from stabilized landfill leachate using a combination of ozone-GAC adsorption treatment. **Journal of Hazardous Materials**, B137, p.443-455.
- KURNIAWAN, T.A.; LO, W. (2009). Removal of refractory compounds from stabilized landfill leachate using an integrated H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> oxidation and granular activated carbon (GAC) adsorption treatment. **Water Research**, v.43, p.4979-4091.
- LI, X.Z.; ZHAO, Q.L. (1999). Inhibition of microbial activity of activated sludge by ammonia in leachate. **Environmental International**, v.25, p.961-968.
- LIN, S.H.; CHANG, C.C. (2000). Treatment of landfill leachate by combined electron-Fenton oxidation and sequencing batch reactor method. **Water Resource**, v.34, n.17, p.4243-4249.
- LO, I.M.C. (1996). Characteristics and treatment of leachates from domestic landfills, **Environmental International**, v.22, n.4, p.433-442.

- MARAÑÓN, E.; CASTRILLÓN, L.; FERNÁNDEZ-NAVA, Y.; FERNÁNDEZ-MÉNDEZ, A. (2010). Colour, turbidity and COD removal from old landfill leachate by coagulation-flocculation treatment. **Waste Management & Research**, v.28, p.731-737.
- MEIER, J.; MELIN, T.; EILERS, L.H. (2002). Nanofiltration and adsorption on powdered adsorbents as process combination for the treatment of severely contaminated wastewater, **Desalination**, v.146, p.361-366.
- METCALF & EDDY (1979). **Wastewater engineering: treatment, disposal and reuse**. Metcalf & Eddy, Inc. 2<sup>a</sup> Ed., 920p.
- MONGE-RAMIREZ, I.; VELÁSQUEZ, O. (2004). Removal of transformation of recalcitrant organic matter from stabilized saline landfill leachate by coagulation-ozonation coupling process. **Water Research**, v.38, p.2359-2367.
- MONTGOMERY, D.C. (1997). **Design and Analysis of Experiments**. 4<sup>a</sup> Ed., John Wiley, New York, NY.
- MORAIS, J.L.; ZAMORA, P.P. (2005). Use of advanced oxidation processes to improve the biodegradability of mature landfill leachates. **Journal of Hazardous Materials**, B 123, P.181-186.
- MORAIS, J.L.; SIRTORI, C.; ZAMORA, P.G.P. (2006). Tratamento de chorume de aterro sanitário por fotocatalise heterogênea integrada a processo biológico convencional. **Química Nova**, v.29, n.1, p.20-23.
- MORAWE, B.; RAMTEKE, D.S.; VOGELPOHL, A. (1995). Activated carbon column performance studies of biologically treated landfill leachate, **Chemical Engineering and Processing**. v.34, p.299-303.
- MYERS, R.H.; MONTGOMERY, D.C. (1995). **Response Surface Methodology**. John Wiley, New York, NY.
- NETO, J.C.; MOTA, S. (1999). Caracterização e avaliação da tratabilidade biológica de percolado gerado no aterro sanitário oeste em Caucaia (Ceará). **in: Anais do 20<sup>o</sup> Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro - RJ.
- NÓBREGA, S.W. (2004). Avaliação do tratamento do chorume gerado no lixão da cidade de Maceió através da adsorção em leito fixo de carvão ativado. **Relatório Técnico - Processo FAPAL Nº 20030229094-6**.
- NÓBREGA, S.W.; RODRIGUES, C.C.; FONSECA, I.M. (2010). Caracterização e aplicação de carvões ativados produzidos a partir do endocarpo do coco-da-baía por ativação com ácido fosfórico. **in: Anais do X Simpósio Ítalo-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**, Maceió - AL.
- NÓBREGA, S.W.; RODRIGUES, C.C.; SILVA JÚNIOR, J.R.; COELHO, D.G.

- (2007). Remoção de cor do chorume através da combinação de processos físico-químicos. **in: Anais do 24º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**, Belo Horizonte - MG.
- NOLL, K.E.; GOUNARIS, V.; HOU, W. (1992). **Adsorption technology for air and water pollution control**. Chelsea: Lewis Publishers Inc., 347 p.
- NTAMPOU, X.; ZOUBOULIS, A.I.; SAMARAS, P. (2006). Appropriate combination of physico-chemical methods (coagulation/flocculation and ozonation) for the efficient treatment of landfill leachates. **Chemosphere**, v.62, p.722-730.
- OH, B.S.; SONG, S.J.; LEE, E.T.; OH, H.J.; KANG, J.W. (2004). Catalyzed ozonation process with GAC and metal doped-GAC for removing organic pollutants. **Water Science Technology**, v.49, p.45-49.
- PALMA, L.D.; FERRANTELLI, P.; MERLI, C.; PETRUCCI, E.(2002). Treatment of industrial landfill leachates by means of evaporation and reverse osmosis. **Water Management**, v.22, p.951-955.
- PESSIN, N.; SILVA, A.R.; BRUSTOLIN, I.; MANDELLI, S.M.C.; PANAROTTO, C.T. (1997). Variação da composição dos líquidos percolados do aterro sanitário de São Giacomó - Caxias do Sul - RS. **in: Anais do 19º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**, Foz do Iguaçu - PR.
- PIRBAZARI, M.; RAVINDRAN, V.; BADRIYHA, B.N.; KIM, S.M.(1996). Hybrid membrane filtration process for leachate. **Water Research**, v.30, p.2691-2706.
- RAUTENBACH, R.; MELLIS, R. (1994). Wastewater treatment by a combination of bioreactor and nanofiltration. **Desalination**, v.95, p.171-188.
- RAYMUNDO-PIÑERO, E.; CAZORLA-AMORÓS, D.; LECEA, S.; LINARES-SOLANO, A. (2000). Factors controlling the SO<sub>2</sub> removal by porous carbons: relevance of the SO<sub>2</sub> oxidation step. **Carbon**, v.38, p.335-344.
- RENOU, S.; GIVAUDAN, J.G.; POULAIN, S.; DIRASSOUYAN, F.; MOULIN, P. (2008). Landfill leachate treatment: Review and opportunity. **Journal of Hazardous Materials**, v.150, p.468-493.
- Resolução **CONAMA Nº 357**, de 17 de março de 2005.
- REYNOLDS, T.D.; RICHARDS, P.A. (1996). **Unit operations and process in environmental engineering**. 2ª Ed., PWS Publishing Company, 798p., ISBN 0-534-9488-7.
- RIVAS, F.J.; BELTRÁN, F.J.; CARVALHO, F.; ACEDO, B.; GIMENO, O.

- (2004). Stabilized leachate: sequence coagulation-flocculation chemical oxidation process, **Journal of Hazardous Materials**, B116, p.95-102.
- RIVAS, F.J.; BELTRÁN, F.J; GIMENO, O.; ACEDO, B.; CARVALHO, F. (2003). Stabilized leachates: ozone activated carbon treatment and kinetics, **Water Research**, v.37, p.4823-4834.
- RIVAS, F.J.; BELTRÁN, F.J; GIMENO, O.; FRADES, J.; CARVALHO, F. (2006). Adsorption of landfill leachates onto activated carbon: Equilibrium and kinetics, **Journal of Hazardous Materials**, B131, p.170-178.
- RODRIGUES, F.S.F. (2004). Aplicação da ozonização e do reativo de fenton como pré-tratamento de chorume com os objetivos de redução da toxicidade e do impacto no processo biológico. **Dissertação de Mestrado**, Mestrado em Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 79p.
- RODRIGUEZ, J.; CASTRILLÓN, L.; MARAÑÓN, E.; SASTRE, H.; FERNÁNDEZ, E. (2004). Removal of non-biodegradable organic matter from landfill leachates by adsorption. **Water Research**, v.38, p.3297-3303.
- ROUSSEAU, R.W. (1987). **Handbook of separation process technology**. New York: John Wiley & Sons, 1010 p.
- SANCINETTI, G.P.; FIGUEIRA, M.S.; COELHO, M.G. (2002). Uso de lodos ativados no tratamento de chorume proveniente de aterro sanitário. in: **Anais do XIV Congresso Brasileiro de Engenharia Química**, Natal - RN.
- SANTOS, L.P.; COELHO, M.G. (2003), Estudo da eficiência do reagente fenton no tratamento de líquidos percolados provenientes do aterro sanitário do município de Uberlândia - MG/Brasil. in: **Anais do 22º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**, Joinville - SC.
- SILVA, A.C. (2002). Tratamento do percolado de aterro sanitário e avaliação da toxicidade do efluente bruto e tratado. **Dissertação de Mestrado**, Mestrado em Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 111p.
- SILVA, A.C.; DEZOTTI, M.; SANT'ANNA JR, G.L. (2004). Treatment and detoxification of a sanitary landfill leachate. **Chemosphere**, v.55, p.207-214.
- SILVA Jr., J.R. (2007). Avaliação da remoção da matéria orgânica e cor do chorume, através da associação de tratamentos físico-químicos. **Trabalho de Conclusão de Curso**, DEQ/CTEC/UFAL, 41p.
- SLETTEN, R.S.; BENJAMIN, M.M.; HORNG, J.J.; FERGUSON, J.F. (1995). Physical-chemical treatment of landfill leachate for metals removal. **Water Research**, v.29, p.2376-2386.

**STANDARDS METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER.**  
1999, 20<sup>a</sup> Ed., ISBN 0-87553-235-7, American Public Health  
Association.

STRAUSS, W. (1975). **Industrial gas cleaning.** 2<sup>a</sup> Edition, Oxford:  
Pergamon Press, 621 p.

TATSI, A.A.; ZOUBOULIS, A.I. (2002). A field investigation of  
the quantity and quality of leachate from a municipal solid  
waste landfill in a Mediterranean climate (Thessaloniki,  
Greece). **Advances in Environmental Research**, v.6, p.207-219.

TATSI, A.A.; ZOUBOULIS, A.I.; MATIS, K.A.; SAMARAS, P. (2003).  
Coagulation-flocculation pre-treatment of sanitary landfill  
leachates. **Chemosphere**, v.53, p.737.

TIMUR, H; OZTURK, I. (1999). Anaerobic sequencing batch reactor  
treatment of landfill leachate. **Water Resource**, v.33, n.15,  
p.3225-3230.

TRÄNKLER, J.; VISVANATHAN, C.; KURUPARAN, P.; TUBTIMTHAI, O.  
(2005). Influence of tropical seasonal variations on landfill  
leachate characteristics - Results from lysimeter studies.  
**Waste Management**, v.25, n.10, p.1013-1020.

TREBOUET, D.; SCHLUMPF, J.P; JAOUEN, P.; QUEMENEUR, F. (2001).  
Stabilized landfill leachate treatment by combined  
physicochemical-nanofiltration process. **Water Research**, v.35,  
p.2935-2942.

URASE, T.; SALEQUZZAMAN, M.; KOBAYASHI, S.; MATSUO, T.;  
YAMAMOTO, K.; SUZUKI, N. (1997). Effect of high concentration  
of organic and inorganic matters in landfill leachate on the  
treatment of heavy metals in very low concentration level.  
**Water Science Technology**. v.36, p.349-356.

UYGUR, A.; KARGI, F. (2004). Biological nutrient removal from  
pre-treated landfill leachate in a sequencing batch reactor.  
**Environmental Management**, v.21, p.9-14.

VON SPERLING, M. (2005). **Princípios do tratamento biológico de  
águas residuárias - Introdução à qualidade das águas e ao  
tratamento de esgotos**, vol. 1, 3<sup>a</sup> Ed., Departamento de  
Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG, 452p.

WANG, Z.; ZHANG, Z.; LIN, Y.; DENG, N.; TAO, T.; ZHUO, K. (2002).  
Landfill leachate treatment by a coagulation-photooxidation  
process. **Journal of Hazardous Materials**, v.95, p.153-159.

WASAY, S.A.; BARRINGTON, S.; TOKUNAGA, S. (1999). Efficiency of  
GAC for treatment of leachate from soil washing process.  
**Water Air Soil Pollution**, v.116, p.449-460.

ZAMORA, R.M.R.; MORENO, A.D.; VELÁSQUEZ, M.T.O.; MONJE-RAMIREZ,  
I. (2000). Treatment of landfill leachates by comparing  
advanced oxidation and coagulation-flocculation processes

coupled with activated carbon adsorption. **Water Science Technology**, v.51, p.231-235.

ZOUBOULIS, A.I.; CHAI, X.; KATSOYIANNIS, I.A. (2004). The application of bioflocculant for the removal of humic acids from stabilized landfill leachates. **Journal of Environmental Management**, v.70, p.35-41.

ZOUBOULIS, A.I.; JUN, W.; KATSOYIANNIS, I.A. (2003). Removal of humic acids by flotation. **Colloids and Surfaces A: Physico-chemical Eng. Aspects**, v.231, p.181-193.

YOON, J.; CHO, S.; CHO, Y.; KIM, S. (1998). The characteristics of coagulation of Fenton reaction in the removal of landfill leachate organics, **Water Science Technology**. v.38, p.209-214.

## **APÊNDICE**







Continuação Tabela A.1

Coletas										
	22 <sup>a</sup>	23 <sup>a</sup>	24 <sup>a</sup>	25 <sup>a</sup>	26 <sup>a</sup>	27 <sup>a</sup>	28 <sup>a</sup>	29 <sup>a</sup>	30 <sup>a</sup>	31 <sup>a</sup>
Parâmetro	18/10/2005	17/12/2005	19/1/2006	12/6/2006	21/8/2006	29/11/2006	6/2/2007	16/7/2008	12/9/2008	11/12/2008
DQO (mg/L)	4649	3281	2641	1211	1520	5334	7165	4339,34	4656,65	3985,04
Sólidos totais (mg/L)	14338	12271	10998	5160	7540	11995	15565	6522	9860	--
Sólidos voláteis (mg/L)	5822	2602	2970	1430	1811	3625	4871	2340	3000	--
Sólidos fixos (mg/L)	8516	9669	8028	3730	5729	8370	10695	4182	6860	--
pH ( - )	8,16	8,5	8,2	8,18	8,32	8,22	8,64	8,04	8,04	8,35
Temperatura (°C)	32	31	31	27	25	26	27	26,1	26,6	22,6
Nitrogênio amoniacal (mg/L)	1455	1493	592,5	592	1172	1378	1511	1151,75	1306,67	1737,73
Alcalinidade (mg de CaCO <sub>3</sub> /L)	6922	9949	6666,6	3476,9	6132	8508	8998	6160	7040	--
DBO <sub>5</sub> (mg/L)	--	194	170	--	--	--	--	--	--	--
Ácidos Voláteis (mg H Ác/L)	839	256	748	106	180	1164	2404	1243,2	781	--
Condutividade (mS/cm)	18,1	19,3	18,6	9,24	13,36	16,52	23,3	8,75	9,49	--
Cloretos (mg/L)	--	--	--	1143	1765	3048	3900	1172,03	1323,3	--
Cor (mg PtCo/L)	--	--	--	--	1825	3050	3030	3095	1948	3378

Tabela A.2 - Resultados experimentais do tratamento do chorume

Ensaio	pH	Concentração do Coagulante (mg/L)	Carvão (g/L)	Eficiência de Remoção (%)			
				Cor		DQO	
1	3	0	0	56,6	53,4	22,4	28,5
2	3	0	2,5	91,7	88,1	61,9	64,9
3	3	0	5,0	94,1	95,4	70,6	75,3
4	3	500	0	81,4	80,5	40,8	45,5
5	3	500	2,5	98,0	96,7	74,4	76,4
6	3	500	5,0	99,5	99,5	87,1	85,1
7	3	1000	0	85,9	85,6	47,0	48,5
8	3	1000	2,5	98,5	98,0	82,2	82,4
9	3	1000	5,0	99,8	99,7	89,3	90,1
10	5	0	0	21,2	23,3	2,8	4,0
11	5	0	2,5	57,7	61,4	39,9	56,9
12	5	0	5,0	71,4	65,0	52,3	62,7
13	5	500	0	91,5	91,9	51,0	54,3
14	5	500	2,5	99,7	99,1	87,8	81,1
15	5	500	5,0	99,9	99,8	86,9	89,2
16	5	1000	0	90,0	89,6	47,3	53,7
17	5	1000	2,5	99,5	98,6	88,1	80,8
18	5	1000	5,0	99,9	99,9	88,6	87,7
19	7	0	0	11,8	6,9	0,0	3,3
20	7	0	2,5	48,1	39,8	37,7	38,3
21	7	0	5,0	68,1	68,7	54,9	54,9
22	7	500	0	58,7	57,1	27,0	25,8
23	7	500	2,5	83,3	83,2	57,2	57,8
24	7	500	5,0	93,3	91,9	69,7	68,5
25	7	1000	0	65,4	71,9	34,7	34,7
26	7	1000	2,5	92,2	87,7	62,0	62,6
27	7	1000	5,0	97,4	97,8	73,8	74,4
28	Original	0	2,5	34,5		33,5	
29	Original	0	5,0	66,0		47,2	
30	Original	500	0	25,8		30,0	
31	Original	500	2,5	62,8		40,5	
32	Original	500	5,0	82,4		55,7	
33	Original	1000	0	50,6		42,7	
34	Original	1000	2,5	82,9		50,2	
35	Original	1000	5,0	93,4		61,6	