



Avaliação da utilização de carvão ativado em sistemas de lodos ativados para o tratamento de lixiviado gerado no aterro de Gericinó (RJ)

Angelo Siguemura Souza

Luiz Henrique Costa Nogueira

## **Projeto Final de Curso**

### **Orientadores**

Profa. Juacyara Carbonelli Campos, D. Sc

Letícia Sobral Maia, M.Sc.

AVALIAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DE CARVÃO ATIVADO EM SISTEMAS DE  
Lodos Ativados para o Tratamento de Lixiviado Gerado no  
ATERRO DE GERICINÓ (RJ)

**Angelo Siguemura Souza**

**Luiz Henrique Costa Nogueira**

Projeto Final de Curso submetido ao Corpo Docente da Escola de Química, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Químico Industrial.

Aprovado por:

---

Alexandre Lioi Nascentes, UFRRJ

---

Carla Rênes de Alencar Machado, EQ/UFRJ

---

Ladimir José de Carvalho, EQ/UFRJ

Orientado por:

---

Juacyara Carbonelli Campos

---

Letícia Sobral Maia

Rio de Janeiro, RJ – Brasil

Maio de 2013

SOUZA, ANGELO SIGUEMURA; NOGUEIRA, LUIZ HENRIQUE COSTA

Avaliação Da Utilização De Carvão Ativado Em Sistemas De Lodos Ativados Para O Tratamento De Lixiviado De Gericinó / Angelo Siguemura Souza; Luiz Henrique costa Nogueira: UFRJ/EQ, 2013.

(Projeto final de curso) – Universidade Federal do Rio de Janeiro – Escola de Química, 2009.

Orientadores: Juacyara Carbonelli Campos e Letícia Sobral Maia

1. Tratamento de Lixiviado

2. Carvão Ativado

3. Carvão Ativado em Pó

4. Lodos Ativados

5. Processo PACT

6. Projeto Final de Curso

7. Juacyara Carbonelli Campos e Letícia Sobral Maia

I. Título: Avaliação Da Utilização De Carvão Ativado Em Sistemas De Lodos Ativados Para O Tratamento De Lixiviado De Gericinó

**É penoso o caminho que conduz ao cume da glória**

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaríamos de expressar nossa gratidão eterna a todos que nos ajudaram para a elaboração deste trabalho:

À Letícia pela paciência, dedicação e apoio, sem o qual, jamais teríamos conseguido alcançar os objetivos.

À nossa orientadora, Professora Juacyara Carbonelli Campos por toda ajuda.

A todos os técnicos, alunos de iniciação, mestrandos, doutorandos e funcionários do LabTare por nos auxiliarem na operação dos equipamentos, no preparo de reagentes, lavagem de vidrarias e a descontrair quando era necessário.

A todos os professores do DPI pelo suporte prático e teórico.

As nossas famílias pelo apoio incondicional.

## RESUMO

Este trabalho teve como objetivo avaliar o uso de carvão ativado em pó (CAP) no tratamento biológico de lixiviado de aterro sanitário. Para isso, o estudo foi realizado em duas etapas. Na primeira buscou-se avaliar três marcas diferentes de CAP quanto sua capacidade de adsorção e, portanto, avaliar sua eficiência na remoção de matéria orgânica presente em uma amostra de lixiviado originária do aterro de Gericinó (Rio de Janeiro, RJ). Para a avaliação, foram realizados ensaios para levantamento de isotermas de Freundlich através da medição dos parâmetros Absorvância a 254 nm, COT e DQO. Os carvões que apresentaram maior capacidade de adsorção foram Norit e Carbomafra. A segunda etapa consistiu em ensaios de biotratabilidade em que foram monitorados quatro reatores em batelada em escala laboratorial com sistema de aeração contendo, respectivamente, lixiviado bruto, o processo convencional e o processo PACT® (*Powdered Activated Carbon Treatment*) com carvão ativado em pó em reatores de lodos ativados nas concentrações 3,0 e 5,0 g CAP/L. Os ensaios de biotratabilidade foram realizados com e sem reposição de CAP. Como resultado obteve-se que o processo PACT® com 5,0 g de CAP da marca Norit teve o melhor desempenho na remoção. O processo PACT® 5,0 g CAP/L com CAP Norit e reposição de CAP apresentou, para Absorvância a 254 nm, eficiência de redução de 85% enquanto o processo de lodos ativados sem CAP apresentou 11%. Para o COT a eficiência de remoção para os mesmos sistemas foram 74 e 11%, enquanto para a DQO estas eficiências foram de 61 e 18%. Estes resultados demonstram que a adição de CAP ao processo de lodos ativados aumenta a eficiência de remoção de matéria orgânica e melhora o desempenho do processo biológico.

## SUMÁRIO

Capítulo I – INTRODUÇÃO E OBJETIVOS.....	1
I. 1 – Introdução.....	1
I. 2 – Objetivos gerais.....	2
I. 3 – Objetivos específicos.....	2
Capítulo II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
II. 1 – Aterro de Gericinó.....	4
II. 2 – Lixiviado de aterro de resíduos.....	6
II. 2. 2 – Composição do lixiviado.....	6
II. 3 – Adsorção com carvão ativado.....	9
II. 3. 1 – Adsorção.....	9
II. 3. 2 – Adsorção aplicada ao tratamento de águas e efluentes.....	11
II. 3. 2. 1 – Carvão ativado como adsorvente.....	11
II. 3. 3 – Isotermas de adsorção.....	17
II. 4 – Lodos ativados.....	21
II. 4. 1 – Introdução.....	21
II. 4. 2 – Variantes do processo de lodos ativados.....	24
II. 4. 2. 1 – Lodos ativados convencional.....	25
II. 4. 2. 2 – Aeração prolongada.....	26

II. 4. 2. 3 – Fluxo intermitente (Reatores de bateladas sequenciais)...	28
II. 5 – Processo PACT.....	31
II. 5. 1 – Introdução.....	31
Capítulo III – MATERIAIS E MÉTODOS.....	35
III. 1 – Efluente utilizado.....	35
III. 1. 1 – Caracterização do lixiviado.....	35
III. 2 – Lodo ativado utilizado nos ensaios de biotratabilidade.....	35
III. 3 – Carvões ativados em pó utilizados nos estudos.....	36
III. 4 – Etapas do estudo.....	37
III. 4. 1 – Escolha do carvão ativado.....	38
III. 4. 2 – Ensaio de biotratabilidade.....	38
III. 5 – Metodologia analítica.....	41
III. 5. 1 – Demanda química de oxigênio (DQO).....	41
III. 5. 2 – Potencial Hidrogeniônico (pH).....	42
III. 5. 3 – Carbono Orgânico Total (COT).....	43
IV. 5. 4 – Absorvância em 254 nm.....	43
V. 6 – Cálculo da eficiência de remoção.....	44
Capítulo IV – RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	45
IV. 1 – Caracterização do lixiviado de Gericinó.....	45



IV. 2 – Avaliação da adsorção nos CAP.....	46
IV. 2. 1 – Eficiências de remoção de matéria orgânica.....	46
IV. 2. 2 – Construção das isotermas.....	49
IV. 3 – Ensaio de biotratabilidade.....	58
IV. 3. 1 – Ensaio de Biotratabilidade 1 (EB1).....	58
IV. 3. 2 – Ensaio de Biotratabilidade 2 (EB2).....	63
IV. 3. 3 – Ensaio de Biotratabilidade 3 (EB3).....	68
IV. 3. 4 – Ensaio de Biotratabilidade 4 (EB4).....	73
Capítulo V – CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	79
V. 1 – Conclusão.....	79
V. 2 – Sugestões.....	80
Capítulo VI – Referências bibliográficas.....	81
ANEXO 1 – Resultados experimentais dos ensaios de adsorção de CAP com lixiviado bruto de gericinó para construção de isotermas.....	86
ANEXO 2 – Linearização das isotermas de absorvância de CAP em equilíbrio com lixiviado bruto de Gericinó relativas à etapa de obtenção dos parâmetros da isoterma de Freundlich para a escolha do carvão ativado a ser utilizado na etapa de biotratabilidade.....	95
ANEXO 3 –Equações matemáticas dos modelos de Freundlich.....	105
Anexo 3. 1 – CAP Brasilac.....	105

Anexo 3. 2 – CAP Carbomafra.....	107
Anexo 3. 3 – CAP Norit.....	108
ANEXO 4 – Pontos experimentais para os três parâmetros estudados nos ensaios de Biotratabilidade.....	109

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Vista aérea do aterro de Gericinó.....	5
Figura 2. Esquema da estrutura interna de uma partícula de Carvão ativado.....	13
Figura 3. Aspecto do carvão ativado comercial.....	16
Figura 4. Adsorção esquemática nos poros do carvão ativado.....	16
Figura 5. Fluxograma simplificado do processo convencional.....	22
Figura 6. Fluxograma do processo de lodos ativados convencional.....	26
Figura 7. Fluxograma do processo de aeração prolongada.....	28
Figura 8. Fluxograma do processo em fluxo intermitente.....	29
Figura 9. Reservatório com lodo ativado para aclimatação com lixiviado de Gericinó.....	36
Figura 10. Testes operando em sistema aeróbio de batelada, nos EB.....	40
Figura 11. Resultados de Absorvância nos ensaios de adsorção do lixiviado de Gericinó com o carvão Brasilac, Carbomafra e Norit e Modelos de Freundlich ajustados aos dados experimentais. Tempo de equilíbrio = 2 horas. Temperatura= 25 °C. Volume de ensaio = 100 mL.....	51
Figura 12. Resultados de Absorvância nos ensaios de adsorção do lixiviado de Gericinó com o carvõesBrasilac, Carbomafra e Norite Modelos de Freundlich ajustados aos dados experimentais. Tempo de equilíbrio = 2 horas. Temperatura= 25 °C. Volume de ensaio = 100 mL.....	52
Figura 13. Resultados de TOC nos ensaios de adsorção do lixiviado de Gericinó com os carvõesBrasilac, Carbomafra e Norite Modelos de Freundlich ajustados	

aos dados experimentais. Tempo de equilíbrio = 2 horas. Temperatura= 25 °C.  
Volume de ensaio = 100 mL.....53

Figura 14. Resultados de TOC nos ensaios de adsorção do lixiviado de Gericinó com os carvões Brasilac, Carbomafra e Norite Modelos de Freundlich ajustados aos dados experimentais. Tempo de equilíbrio = 24 horas. Temperatura= 25 °C.  
Volume de ensaio = 100 mL.....54

Figura 15. Resultados de DQO nos ensaios de adsorção do lixiviado de Gericinó com o carvões Brasilac, Carbomafra e Norite Modelos de Freundlich ajustados aos dados experimentais. Tempo de equilíbrio = 2 horas. Temperatura= 25 °C.  
Volume de ensaio = 100 mL.....55

Figura 16. Resultados de DQO nos ensaios de adsorção do lixiviado de Gericinó com o carvões Brasilac, Carbomafra e Norite Modelo de Freundlich ajustados aos dados experimentais. Tempo de equilíbrio = 24 horas. Temperatura= 25 °C.  
Volume de ensaio = 100 mL.....56

Figura 17. Monitoramento da Absorvância a 254nm do lixiviado de Gericinó. Carvão Carbomafra, sem reposição de carvão. Volume do meio reacional = 300 ml.  $C_{\text{carvão}} = 3,0$  e  $5,0$ g/L.....58

Figura 18. Eficiência de redução da Absorvância a 254nm do lixiviado de Gericinó. Carvão Carbomafra, sem reposição de carvão. Volume reacional = 300 ml.  $C_{\text{carvão}} = 3,0$  e  $5,0$  g/L.....59

Figura 19. Monitoramento do COT do lixiviado de Gericinó. Carvão Carbomafra, sem reposição de carvão. Volume reacional = 300 ml.  $C_{\text{carvão}} = 3,0$  e  $5,0$  g/L.....60

Figura 20. Eficiência de remoção do COT do lixiviado de Gericinó. Carvão Carbomafra, sem reposição de carvão. Volume reacional = 300 ml.  $C_{\text{carvão}} = 3,0$  e  $5,0$  g/L.....60

Figura 21. Monitoramento da DQO do lixiviado de Gericinó. Carvão Carbomafra, sem reposição de carvão. Volume reacional = 300 ml.  $C_{\text{carvão}} = 3,0$  e  $5,0$  g/L.....61

Figura 22. Eficiência de remoção da DQO do lixiviado de Gericinó. Carvão Carbomafra, sem reposição de carvão. Volume reacional = 300 mL. $C_{\text{carvão}} = 3,0$ e $5,0$ g/L.....	62
Figura 23. Monitoramento da Absorvância a 254nm do lixiviado de Gericinó. Carvão Norit, sem reposição de carvão. Volume do meio reacional = 300 mL. $C_{\text{carvão}} = 3,0$ e $5,0$ g/L.....	64
Figura 24. Eficiência de redução da Absorvância a 254nm do lixiviado de Gericinó. Carvão Norit, sem reposição de carvão. Volume reacional = 300 mL. $C_{\text{carvão}} = 3,0$ e $5,0$ g/L.....	64
Figura 25. Monitoramento do COT do lixiviado de Gericinó. Carvão Norit, sem reposição de carvão. Volume reacional = 300 mL. $C_{\text{carvão}} = 3,0$ e $5,0$ g/L.....	65
Figura 26. Eficiência de remoção do COT do lixiviado de Gericinó. Carvão Norit, sem reposição de carvão. Volume reacional = 300 mL. $C_{\text{carvão}} = 3,0$ e $5,0$ g/L.....	66
Figura 27. Monitoramento da DQO do lixiviado de Gericinó. Carvão Norit, sem reposição de carvão. Volume reacional = 300 mL. $C_{\text{carvão}} = 3,0$ e $5,0$ g/L.....	66
Figura 28. Eficiência de remoção da DQO do lixiviado de Gericinó. Carvão Norit, sem reposição de carvão. Volume reacional = 300 mL. $C_{\text{carvão}} = 3,0$ e $5,0$ g/L.....	67
Figura 29. Monitoramento da Absorvância a 254 nm do lixiviado de Gericinó. Carvão Carbomafra, com reposição de carvão. Volume do meio reacional = 300 mL. $C_{\text{carvão}} = 3,0$ e $5,0$ g/L.....	68
Figura 30. Eficiência de redução da Absorvância a 254nm do lixiviado de Gericinó. Carvão Carbomafra, com reposição de carvão. Volume reacional = 300 mL. $C_{\text{carvão}} = 3,0$ e $5,0$ g/L.....	69
Figura 31. Monitoramento do COT do lixiviado de Gericinó. Carvão Carbomafra, com reposição de carvão e com reposição de lixiviado. Volume reacional = 300 mL. $C_{\text{carvão}} = 3,0$ e $5,0$ g/L.....	70

Figura 32. Eficiência de remoção do COT do lixiviado de Gericinó. Carvão Carbomafra, com reposição de carvão. Volume reacional = 300 mL. $C_{\text{carvão}} = 3,0$ e $5,0$ g/L.....	70
Figura 33. Monitoramento da DQO do lixiviado de Gericinó. Carvão Carbomafra, com reposição de carvão. Volume reacional = 300 mL. $C_{\text{carvão}} = 3,0$ e $5,0$ g/L.....	71
Figura 34. Eficiência de remoção da DQO do lixiviado de Gericinó. Carvão Carbomafra, com reposição de carvão. Volume reacional = 300 mL. $C_{\text{carvão}} = 3,0$ e $5,0$ g/L.....	72
Figura 35. Monitoramento da Absorvância a 254nm do lixiviado de Gericinó. Carvão Norit, com reposição de carvão. Volume do meio reacional = 300 mL. $C_{\text{carvão}} = 3,0$ e $5,0$ g/L.....	73
Figura 36. Eficiência de redução da Absorvância a 254nm do lixiviado de Gericinó. Carvão Norit, com reposição de carvão. Volume reacional = 300 mL. $C_{\text{carvão}} = 3,0$ e $5,0$ g/L.....	74
Figura 37. Monitoramento do COT do lixiviado de Gericinó. Carvão Norit, com reposição de carvão. Volume reacional = 300 mL. $C_{\text{carvão}} = 3,0$ e $5,0$ g/L.....	75
Figura 38. Eficiência de remoção para o COT do lixiviado de Gericinó. Carvão Norit, com reposição de carvão. Volume reacional = 300 mL. $C_{\text{carvão}} = 3,0$ e $5,0$ g/L.....	75
Figura 39. Monitoramento da DQO do lixiviado de Gericinó. Carvão Norit, com reposição de carvão. Volume reacional = 300 mL. $C_{\text{carvão}} = 3,0$ e $5,0$ g/L.....	76
Figura 40. Eficiência de redução da Absorvância a 254 nm do lixiviado de Gericinó. Carvão Norit, com reposição de carvão. Volume reacional = 300 ml. $C_{\text{carvão}} = 3,0$ e $5,0$ g/L.....	77
Figura 41. Linearização da isoterma de absorvância para o carvão Brasilac em equilíbrio com lixiviado bruto de Gericinó. Tempo de equilíbrio = 2 horas. Temperatura = 25°C. Volume = 100 mL.....	95

Figura 42. Linearização da isoterma de absorvância para o carvão Carbomafra. Tempo de equilíbrio = 2 horas. Temperatura = 25°C. Volume = 100 mL.....	96
Figura 43. Linearização da isoterma de absorvância para o carvão Norit. Tempo de equilíbrio = 2 horas. Temperatura = 25°C. Volume = 100 mL.....	96
Figura 44. Linearização da isoterma de absorvância para o carvão Brasilac. Tempo de equilíbrio = 24 horas. Temperatura = 25°C. Volume = 100 mL.....	97
Figura 45. Linearização da isoterma de absorvância para o carvão Carbomafra. Tempo de equilíbrio = 24 horas. Temperatura = 25°C. Volume = 100 mL.....	97
Figura 46. Linearização da isoterma de absorvância para o carvão Norit. Tempo de equilíbrio = 24 horas. Temperatura = 25°C. Volume = 100 mL.....	98
Figura 47. Linearização da isoterma de TOC para o carvão Brasilac. Tempo de equilíbrio = 2 horas. Temperatura = 25°C. Volume = 100mL.....	98
Figura 48. Linearização da isoterma de TOC para o carvão Carbomafra. Tempo de equilíbrio = 2 horas. Temperatura = 25°C. Volume = 100 mL.....	99
Figura 49. Linearização da isoterma de TOC para o carvão Norit. Tempo de equilíbrio = 2 horas. Temperatura = 25°C. Volume = 100 mL.....	99
Figura 50. Linearização da isoterma de TOC para o carvão Brasilac. Tempo de equilíbrio = 24 horas. Temperatura = 25°C. Volume = 100 mL.....	100
Figura 51. Linearização da isoterma de TOC para o carvão Carbomafra. Tempo de equilíbrio = 24 horas. Temperatura = 25°C. Volume = 100 mL.....	100
Figura 52. Linearização da isoterma de TOC para o carvão Norit. Tempo de equilíbrio = 24 horas. Temperatura = 25°C. Volume = 100 mL.....	101
Figura 53. Linearização da isoterma de DQO para o carvão Brasilac. Tempo de equilíbrio = 2 horas. Temperatura = 25°C. Volume = 100 mL.....	101

Figura 54. Linearização da isoterma de DQO para o carvão Carbomafra. Tempo de equilíbrio = 2 horas. Temperatura = 25°C. Volume = 100 mL.....102

Figura 55. Linearização da isoterma de DQO para o carvão Norit. Tempo de equilíbrio = 2 horas. Temperatura = 25°C. Volume = 100 mL.....102

Figura 56. Linearização da isoterma de DQO para o carvão Brasilac. Tempo de equilíbrio = 24 horas. Temperatura = 25°C. Volume = 100 mL.....103

Figura 57. Linearização da isoterma de DQO para o carvão Carbomafra. Tempo de equilíbrio = 24 horas. Temperatura = 25°C. Volume = 100 mL.....103

Figura 58. Linearização da isoterma de DQO para o carvão Norit. Tempo de equilíbrio = 24 horas. Temperatura = 25°C. Volume = 100 mL.....104



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Composição média de lixiviado de aterros sanitários.....	8
Tabela 2. Comparação entre CAP e CAG.....	15
Tabela 3. Parâmetros da isoterma de Freundlich para algumas espécies químicas.....	19
Tabela 4. Resultado do desempenho do sistema PACT® para efluentes contendo alguns compostos orgânicos explicitados.....	33
Tabela 5. Origem e país de fabricação dos carvões utilizados.....	37
Tabela 6. Resumo das condições operacionais dos ensaios de Biotratabilidade..	39
Tabela 7. Parâmetros de caracterização do lixiviado bruto de Gericinó.....	45
Tabela 8. Eficiência de remoção dos ensaios de CAP em equilíbrio com lixiviado. T = 25°C. Volume= 100 mL.....	47
Tabela 9. Valores de $1/n$ , $K_f$ e o coeficiente de regressão ( $R^2$ ) para os ajustes à isoterma de Freundlich dos valores experimentais de adsorção de 2 e 24 horas para os três carvões avaliados para a análise de Absorvância.....	50
Tabela 10. Resultados das análises de Absorvância do lixiviado de Gericinó com carvão Brasilac.....	86
Tabela 11. Resultados das análises de TOC do lixiviado de Gericinó com carvão Brasilac.....	87
Tabela 12. Resultados das análises de DQO do lixiviado de Gericinó com carvão Brasilac.....	88
Tabela 13. Resultados das análises de Absorvância do lixiviado de Gericinó com carvão Carbomafra.....	89
Tabela 14. Resultados das análises de TOC do lixiviado de Gericinó com carvão Carbomafra.....	90
Tabela 15. Resultados das análises de DQO do lixiviado de Gericinó com carvão Carbomafra.....	91
Tabela 16. Resultados das análises de Absorvância do lixiviado de Gericinó com carvão Norit.....	92

Tabela 17. Resultados das análises de TOC do lixiviado de Gericinó com carvão Norit.....	93
Tabela 18. Resultados das análises de DQO do lixiviado de Gericinó com carvão Norit.....	94
Tabela 19. Valores experimentais médios referentes às Figuras 17 e 18 do item IV. 3. 1.....	109
Tabela 20. valores experimentais médios referentes às Figuras 19 e 20 do item IV. 3. 1.....	109
Tabela 21. valores experimentais médios referentes às Figuras 21 e 22 do item IV. 3. 1.....	110
Tabela 22: valores experimentais médios referentes às Figuras 23 e 24 do item IV. 3. 2.....	110
Tabela 23: valores experimentais médios referentes às Figuras 25 e 26 do item IV. 3. 2.....	111
Tabela 24: valores experimentais médios referentes às Figuras 27 e 28 do item IV. 3. 2.....	111
Tabela 25: valores experimentais médios referentes às Figuras 29 e 30 do item IV. 3. 3.....	112
Tabela 26: valores experimentais médios referentes às Figuras 31 e 32 do item IV. 3. 3.....	112
Tabela 27: valores experimentais médios referentes às Figuras 33 e 34 do item IV. 3. 3.....	113
Tabela 28: valores experimentais médios referentes às Figuras 35 e 36 do item IV. 3. 4.....	113

Tabela 29: valores experimentais médios referentes às Figuras 37 e 38 do item IV. 3. 4.....	114
Tabela 30: valores experimentais médios referentes às Figuras 39 e 40 do item IV. 3. 4.....	114
Tabela 31. Valores da eficiência de remoção para absorvância em 254nm com e sem reposição de CAP Carbomafra e Norit.....	115
Tabela 32. Valores da eficiência de remoção para COT com e sem reposição de CAP Carbomafra e Norit.....	116
Tabela 33. Valores da eficiência de remoção para DQO com e sem reposição de CAP Carbomafra e Norit.....	117

# Capítulo I – INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

## I. 1 – Introdução

O aumento exponencial da população humana e as mudanças de consumo ocorridas no mundo após a revolução industrial geraram um aumento na produção de resíduos sólidos. Tudo isso agregado à complexidade das mudanças nos processos de produção das grandes cidades, nos últimos anos, vem gerando preocupações em relação ao gerenciamento, disposição e tratamento dos resíduos gerados por indústrias, lares, bem como do resíduo urbano.

Esse crescimento acelerado da produção de resíduos nas grandes cidades passou a ser um desafio para as autoridades devido aos impactos ambientais que podem ser causados pelo descarte indevido destes subprodutos.

Sabe-se que o uso de aterros sanitários para a disposição final de resíduos sólidos, eliminação de resíduos de incineração e reciclagem de processos industriais ou urbanos é o meio mais barato e comum pelo fato da sua simplicidade de aplicação e baixo custo envolvido (FOO & HAMEED, 2009).

Lixiviado ou chorume é definido como qualquer efluente líquido percolado contaminado devido a resíduo depositado e emitido por um aterro sanitário ou lixão por fontes externas, pela qual sua rota de exposição e toxicidade na maioria das vezes é desconhecida (FOO & HAMEED, 2009).

O lixiviado ou percolado é caracterizado por ser um líquido escuro e de odor desagradável, que apresenta em sua composição altos teores de compostos orgânicos e inorgânicos na sua forma dissolvida e coloidal, ainda é altamente poluidor e um sério problema ambiental (SILVA, 2002).

O tratamento do lixiviado, muitas das vezes, mostra-se um desafio para os projetistas de aterros sanitários, uma vez que suas características variam em

função dos tipos de resíduos vazados e, sobretudo, com a idade deste. A maioria dos aterros brasileiros não possui nenhum tipo de tratamento para o lixiviado ou o trata de maneira ineficiente e inadequada. Desta forma, é necessário o desenvolvimento de técnicas de tratamento eficientes na remoção da matéria poluidora do lixiviado e que sejam compatíveis com a realidade técnica e econômica dos municípios (MANNARINO, 2003).

Este trabalho estudou o uso de carvão ativado em pó associado ao tratamento biológico no tratamento do líquido percolado do aterro sanitário de Gericinó (Rio de Janeiro, RJ).

## I. 2 – Objetivo geral

Avaliar a eficiência dos sistemas de Lodos Ativados e Carvão Ativado, quando usados em combinado, no tratamento de lixiviado de aterros de resíduos, tendo como meta a remoção de matéria orgânica.

## I. 3 – Objetivos específicos

1. Avaliar três marcas distintas de carvão ativado em pó no tratamento de lixiviado do aterro de Gericinó, em escala laboratorial, através do levantamento de isotermas de adsorção;
2. Escolher, dentre as marcas Norit e Carbomafra, o CAP mais eficiente para ser utilizado nas etapas posteriores de tratamento, que monitoram o processo PACT® (*Powdered Activated Carbon Treatment*) em batelada e compará-los ao processo de lodos ativados;

3. Avaliar a eficiência de remoção das diferentes concentrações de CAP adicionadas ao processo de lodos ativados;

## Capítulo II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### II. 1 – Aterro de Gericinó (Rio de Janeiro, RJ)

O aterro sanitário de Gericinó, situado no bairro de Bangu, Rio de Janeiro, começou suas operações em 1987, como vazadouro a céu aberto. Posteriormente, em novembro de 2004, foi criado o bairro de Gericinó, como sub-bairro de Bangu, durante a gestão do prefeito Cesar Maia. (Fonte: retirado de <http://jornaltribunario.blogspot.com.br/2011/11/bairro-gericino-uma-triste-realidade.html>)

Atualmente, o CTR Gericinó (Centro de Tratamento de Resíduos de Gericinó) recebe em média 2000 toneladas de resíduos sólidos urbanos por dia (QUINTAES, 2013). O volume médio de lixiviado gerado em Gericinó é de 300 m<sup>3</sup>/dia e o lixiviado é captado em poços de reunião e armazenado na lagoa de acumulação existente. Posteriormente é aspergido com caminhão pipa nas pistas internas do aterro e também recirculado na vala de infiltração (QUINTAES, 2013).

Em abril de 2011 foi inaugurada a 75 km do Rio de Janeiro uma central de tratamento de resíduos (ETC) em Seropédica que passou a tratar 6,7 mil toneladas de resíduos que seriam despejados no aterro de Gramacho e Gericinó, diminuindo a geração de líquido percolado (Fonte: adaptado de <http://primeiraedicao.com.br/noticia/2012/06/01/tecnologia-inedita-no-pais-varre-todo-o-lixo-do-rio-para-cima-do-tapete>)

A Figura 1 mostra a vista aérea do aterro de Gericinó:



Figura 1- Vista aérea do aterro de Geriçinó

Fonte:

[http://www.ciclovivo.com.br/noticia.php/2219/especialistas\\_cobram\\_politica\\_de\\_reducao  
do\\_lixo\\_no\\_rio/](http://www.ciclovivo.com.br/noticia.php/2219/especialistas_cobram_politica_de_reducao_do_lixo_no_rio/)



## II. 2 – Lixiviado de aterro de resíduos

### II. 2. 1 – Composição do lixiviado

Segundo Moravia (2010), o lixiviado (também chamado de chorume) de aterro sanitário se caracteriza como um líquido escuro e de odor desagradável que contém alta carga orgânica e inorgânica. Sua origem é devida à umidade natural, água de infiltração, degradação biológica de matéria orgânica, além de resíduos dissolvidos ou suspensos.

O descarte do lixiviado, sem o devido tratamento, pode causar sérios impactos ambientais devido à presença de matéria refratária, amônia e compostos tóxicos (Morávia, 2010).

De acordo com Christensen et al (2001) a composição química de lixiviado pode conter cinco espécies de poluentes, de acordo com tipos de dejetos sólidos:

1. Matéria Orgânica dissolvida expressa pela Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) ou pela Demanda Química de Oxigênio (DQO) ou ainda pelo Carbono Orgânico Total (COT), incluindo ácidos fúlvicos e húmicos;
2. Macrocomponentes inorgânicos:  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  e  $\text{HCO}_3^-$ ;
3. Metais pesados: Cd, Cr, Cu, Pb, Ni, Zn;

4. Compostos orgânicos xenobióticos, presentes em baixas concentrações, incluído hidrocarbonetos aromáticos, fenóis e compostos alifáticos clorados, e;
5. Outros componentes como boro, arsênio, bário, selênio, mercúrio e cobalto, que são encontrados em baixíssimas concentrações.

O lixiviado pode conter altas concentrações de amônia em sua forma gasosa dissolvida ou íon amônio que muitas das vezes são tóxicas aos micro-organismos decompositores dificultando sua biodegradação natural.

Urase et al. (1997) afirmam que a alta recalcitrância dos lixiviados está associada à presença de compostos de elevada massa molecular com estruturas muito complexas como é o caso das substâncias húmicas.

A Tabela 1 mostra a composição média de lixiviados de aterros sanitários.

Tabela 1. Composição média de lixiviado de aterros sanitários

<b>Parâmetro</b>	<b>Faixa</b>
pH	4,5 - 9
Sólidos totais	2000 - 60000
<b>Matéria Orgânica (mg/L)</b>	
Carbono orgânico Total	30 - 29000
Demanda biológica de oxigênio (DBO <sub>5</sub> )	20 - 57000
Demanda Química de oxigênio (DQO)	140 - 152 000
DBO <sub>5</sub> /DQO	0,02- 0,80
<b>Macrocomponentes inorgânicos (mg/L)</b>	
Fósforo total	0,1- 23
Cloretos	150 - 4500
Sulfatos	8 - 7750
HCO <sub>3</sub>	610 - 7320
Sódio	70 - 7700
Potássio	50 - 3700
Nitrogênio amoniacal	50 - 2200
Cálcio	10 - 7200
Magnésio	30 - 15000
Ferro	3 - 5500
Manganês	0,03 - 1400
Sílica	4 - 70
<b>Elementos traços inorgânicos (µg/L)</b>	
Arsênio	0,01 - 1
Cádmio	0,0001 – 0,4
Cromo	0,02 – 1,5
Cobalto	0,005 – 1,5
Cobre	0,005 - 10
Chumbo	0,001 - 5

Continuação Tabela 1. composição média de lixiviado de aterros sanitários

Mercúrio	0,00005 – 0,16
----------	----------------

Fonte : TECNOCRAT (2006) apud Macêdo (2007)

## II. 3 – Adsorção com carvão ativado

### II. 3. 1 - Adsorção

Adsorção é o processo onde moléculas de uma fase gás ou líquida ligam-se a uma camada condensada de uma fase sólida ou líquida permanecendo agregada a esta. As moléculas que se ligam a superfície são chamadas adsorvato e as moléculas que recebem o adsorvato são chamadas de adsorvente (MASEL, 1996)

A adsorção é um fenômeno espontâneo, que ocorre com redução da energia livre de Gibbs superficial ( $\Delta G^\circ$ ). Nela ocorre a redução do grau de desordem do sistema, já que as moléculas adsorvidas perdem graus de liberdade ao se transferirem da superfície para o interior do adsorvente, havendo, portanto, diminuição da entropia ( $\Delta S^\circ$ ) (CIOLA, 1981).

Segundo Castelan (1986), a resistência surgida com a variação da energia livre de Gibbs causada pela mudança na área interfacial entre duas fases, é chamada de tensão superficial ( $\sigma$ ). Assim, para a interface sólido-líquido, a tensão superficial chamada de coeficiente de espalhamento, é definida como:

$$\sigma^{ls} = - \left( \frac{\partial G}{\partial A_{sl}} \right)_{T, P, n} \quad (1)$$

Onde:

$\sigma^{ls}$  é a tensão superficial (coeficiente de espalhamento) do líquido em relação ao sólido.

**G** é a energia livre de Gibbs;

**A** é a área de contato entre as duas fases;

**T** é a temperatura (suposta constante);

**P** é pressão (suposta constante);

**n** é o número de mols totais (mantido constante)

Segundo Eckenfelder (2000), a eficiência de adsorção varia reciprocamente com o quadrado do diâmetro da partícula e aumenta com a temperatura, com a concentração do soluto e diminui com o aumento da massa molar do soluto.

Há dois tipos de adsorção: a adsorção física (fisissorção) e a adsorção química (quimissorção). No entanto, em certas ocasiões os dois tipos podem ocorrer simultaneamente (CHEREMISINOFF e ELLERBUSCH, 1978).

Na adsorção física há uma interação do tipo Van de Waals, ligações fracas de longo alcance, cuja entalpia de adsorção é da mesma ordem de grandeza da de condensação. Uma molécula que eventualmente se mova sobre a superfície vai perdendo sua energia gradativamente e acaba sendo adsorvida. Tal processo é conhecido como acomodação (ATKINS, 2005).

Na adsorção química há ligação átomos-superfície através de ligações covalentes. A acomodação nos sítios é de tal forma que garante o número de coordenação máxima com o substrato. A entalpia dessa adsorção é muito maior que a da física. Enquanto os valores típicos da fisissorção estão na faixa de 20 kJ mol<sup>-1</sup> a quimissorção ocorre na faixa de 200 kJ mol<sup>-1</sup> (ATKINS, 2005).

De acordo com Letterman (1999), o adsorvato permanece adsorvido na superfície do adsorvente pela ação de diversos tipos de forças químicas, como ligações de hidrogênio, interação dipolo-dipolo e forças de London ou Van der Waals e dependendo do tipo de ligação química entre adsorvente e adsorvato é que se caracteriza a adsorção como física ou química.

Segundo Eckenfelder (2000), a quimissorção resulta na formação de uma camada monomolecular do adsorvato na superfície pelas forças residuais de valência das moléculas superficiais. A fisissorção resulta da condensação molecular nos capilares do sólido.

### II. 3. 2 – Adsorção aplicada ao tratamento de águas e efluentes

A adsorção desempenha um papel importante no tratamento de águas e efluentes, no que diz respeito à remoção de matéria orgânica. Alguns exemplos de aplicação são a remoção de gosto e odor e traços de contaminantes orgânicos como trihalometanos, pesticidas e compostos organoclorados na produção de bebidas, remoção de alguns contaminantes de efluentes de água tratada e tratamento de lixiviados. A eficiência e a extensão de adsorção de um contaminante em um carvão ativado, por exemplo, dependem da molécula sendo adsorvida e do adsorvente. (SAWYER et al., 1994).

#### II. 3. 2. 1 – Carvão Ativado como adsorvente

De acordo com Claudino (2000), carvões ativados são materiais de natureza carbonácea e porosos que apresentam uma forma estrutural microcristalina, não gráfica, que passaram por um processamento para aumentar a porosidade interna. Após o processo de ativação, o carvão passa a apresentar uma porosidade interna comparável a uma estrutura em rede de túneis que se

bifurcam em ramificações menores e assim sucessivamente. Esta porosidade diferenciada é classificada segundo o tamanho em macro, meso e microporosidades (CLAUDINO, 2000).

O carvão ativado é classificado de acordo com seus três tamanhos de poros em: MICROPOROS, em que seu raio efetivo é menor que 20 (Å), e sua área superficial é perto de 95% da área total do Carvão ativado, sendo responsável pela adsorção de pequenas moléculas; TRANSIÇÃO, em que seu raio efetivo esta na faixa de 500-1000 (Å), sua área superficial é menor que 5% e adsorvem moléculas de tamanho médio e MACROPOROS, em que o raio efetivo de 5000-20000 (Å), e sua área superficial é de 0,5 a 2,0 m<sup>2</sup>/g, sendo a responsável pela adsorção de moléculas grandes (COSTA, 2003).

Segundo a União Internacional de Química Pura e Aplicada (IUPAC), os poros, de acordo com o tamanho de seus diâmetros ( $\Theta_m$ ), podem ser classificados de três formas distintas:

- a) Macroporos ( $\Theta_m > 50 \text{ nm}$ ) – Considerados sem importância para a adsorção e sua função é servir como meio de transporte para as moléculas gasosas.
- b) Mesoporos ( $2\text{nm} < \Theta_m < 50 \text{ nm}$ ) – importantes para a adsorção de moléculas grandes e propiciam a maioria da área superficial para carvões impregnados com produtos químicos.
- c) Microporos ( $\Theta_m < 2\text{nm}$ ) – contribuem para a maioria da área superficial que proporciona alta capacidade de adsorção para moléculas de dimensões pequenas. Subdividem-se em secundários ( $0,8 < \Theta_m < 2\text{nm}$ ) e os primários ( $\Theta_m < 0,8 \text{ nm}$ ).

A Figura 2 ilustra a estrutura interna de uma partícula de Carvão ativado de acordo com sua classificação em tamanho de poros.

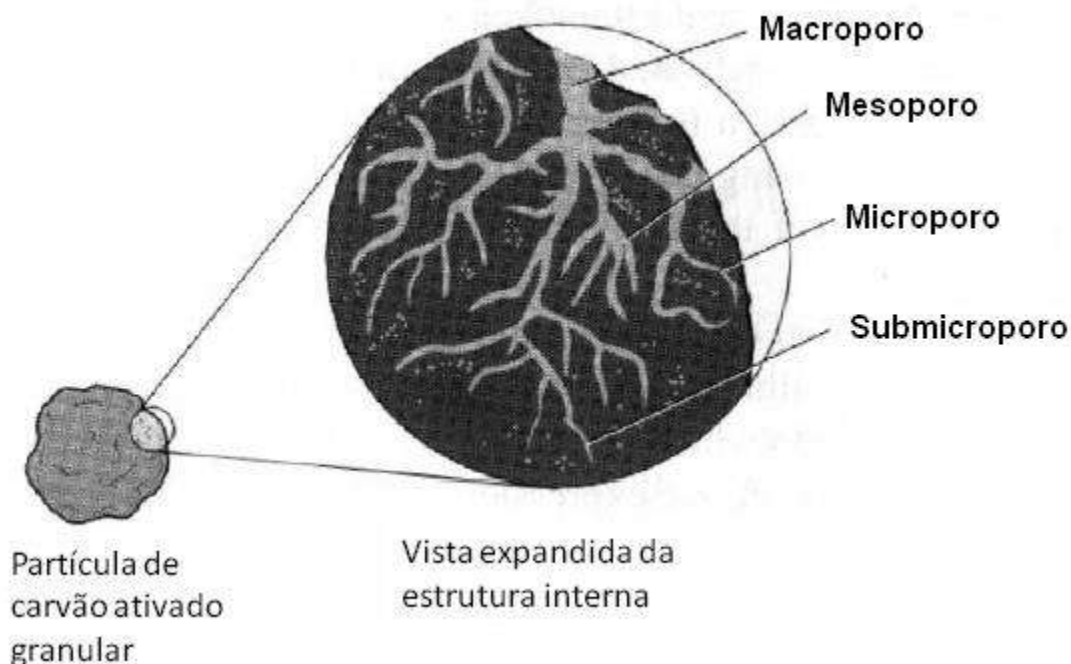


Figura 2. Esquema da estrutura interna de uma partícula de Carvão ativado

Fonte: Adaptado de Metcalf & Eddy, 2003.

Diversos tipos de forças químicas como ligações hidrogênio, interações dipolo-dipolo e forças de Van der Waals são responsáveis por manter as substâncias adsorvidas na superfície do carvão ativado. Dentre os dois tipos de carvão ativado, tem-se o carvão ativado em pó (CAP) e o carvão ativado granulado (CAG) (MACEDO, 2007).

A capacidade de adsorção do carvão ativado está correlacionada com fatores como temperatura, natureza da superfície do carvão e das substâncias removidas. Na filtração direta o emprego do CAP é mais restrito, pois o excesso



de material em suspensão, em função do carvão adicionado, pode levar a uma sobrecarga de sólidos nos filtros (DI BERNARDO et al., 2003).

Algumas diferenças podem ser citadas entre o CAP e o CAG, mas a principal refere-se ao tamanho dos grãos. O CAP tem partículas com tamanho de 10 a 100  $\mu\text{m}$ , enquanto o CAG varia de 0,42 a 2,4 mm. A massa específica aparente do CAP varia de 360 a 740  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , para o CAG os valores variam de 350 a 500  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . (DI BERNARDO, MENDES, BRANDÃO, et al.,).

Nota-se uma tendência do aumento do uso do carvão ativado em pó (CAP), ainda incipiente nas estações brasileiras, para remoção de odor e sabor por meio de dosagens empíricas, não ocorrendo à otimização e à aplicação do mesmo. (MACEDO, 2007).

A Tabela 2 apresenta alguns parâmetros comparativos entre o CAP e o CAG.

Tabela 2. Comparação entre CAP e CAG

Parâmetros	CAG	CAP
Área superficial (m <sup>3</sup> /g)	700 – 1300	800 -1800
Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	400 – 500	360 - 740
Densidade da partícula úmida (kg/L)	1,0 -1,5	1,3 – 1,4
Tamanho da partícula	0,1 – 2,36 mm	5- 50 µm
Número de iodo	600 – 1100	800 - 1200
Porcentagem de Cinzas	≤8 %	≤6 %

Fonte: Metcalf e Eddy (2003)

Carvões ativados são feitos de uma variedade de materiais incluindo madeira, lignina, carvão betuminoso, lignito, e resíduos de petróleo. (ECKENFELDER, 2000). Esses materiais são carbonizados a altas temperaturas e então ativados usando ar quente ou vapor para produzir o carvão ativado propriamente dito (RHYNER et al, 1995).

A Figura 3 mostra o aspecto de um carvão ativado comercial, já a Figura 4 mostra esquematicamente como ocorre adsorção nos poros do carvão.



Figura 3. Aspecto do carvão ativado comercial

(retirado de <http://www.brasilecola.com/quimica/carvao-ativado.htm>)

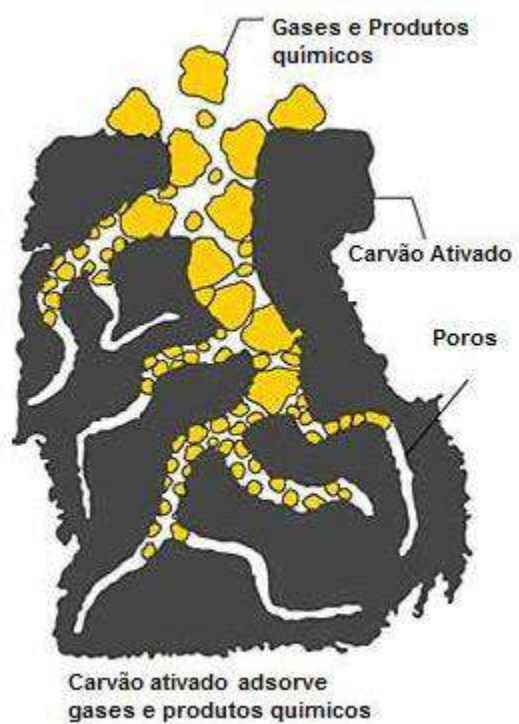


Figura 4. Adsorção esquemática nos poros do carvão ativado

Fonte: (retirado de <http://www.naturaltec.com.br/Carvao-Ativado.html>)

### III. 3. 3 – Isotermas de adsorção

Segundo Eckenfelder (2000), Uma das formas de se quantificar a adsorção de um composto orgânico no carvão ativado é através das isotermas de adsorção. Elas descrevem relações, no equilíbrio, entre a quantidade do elemento adsorvido por uma matriz sólida, e a quantidade remanescente na solução. O aspecto da curva de equilíbrio (Isoterma de adsorção) depende do tipo de carvão, e das propriedades do adsorvato.

Dentre os modelos matemáticos das isotermas usadas em sistemas líquidos, as principais são: isoterma de Langmuir e Isoterma de Freundlich, sendo esta última a mais utilizada (ECKENFELDER,1989).

A isoterma de Freundlich é expressa pela equação 2:

$$\frac{x}{m} = K_f C_e^{1/n} \quad (2)$$

Onde:

$\frac{x}{m}$  = massa de adsorvato adsorvido por massa de adsorvente

$C_e$  = concentração de equilíbrio do adsorvato restante na solução.

$K_f$  e  $n$  são constantes que dependem da temperatura, do adsorvente e da substância a ser adsorvida. (ECKENFELDER, 2000). A tabela 3 mostra os valores das constantes para uma variedade de poluentes.

Os parâmetros  $k_f$  e  $n$  podem ser obtidos através do uso de logaritmos para linearizar a expressão da equação. A linearização é apresentada na equação 3.

$$\text{LOG}\left(\frac{X}{m}\right) = \text{LOG}(K_f) + \frac{1}{n}\text{LOG}(C_e) \quad (3)$$

Tanto “ $k_f$ ” como “ $1/n$ ” são parâmetros característicos para cada sistema adsorvente-adsorvato. “ $K_f$ ” representa a capacidade adsortiva do carvão enquanto “ $1/n$ ” reflete o grau em que a adsorção é função da concentração e que são determinados experimentalmente (ECKENFELDER, 2000).

Segundo Weiner (2008), o valor de  $k_f$  depende fortemente das especificidades química e dos sítios de interação envolvendo o adsorvato e o adsorvente, além da quantidade de matéria orgânica adsorvida no sólido.

A observação de alguns parâmetros simples permite avaliar  $k_f$  mais facilmente (WEINER, 2008):

- A solubilidade do poluente na água tem uma relação inversa com  $k_f$ ; quanto menor a solubilidade, maior o valor de  $k_f$ .
- Moléculas fracamente polares (implicando baixa solubilidade) devem apresentar altos  $k_f$ s.
- Quanto maior a área superficial do sólido, maior o  $k_f$ .

Tabela 3 mostra alguns valores típicos de  $k_f$  e  $1/n$  para CAP.

Tabela 3. Parâmetros da isoterma de Freundlich para algumas espécies químicas

Substância	$K_f$ (mg/g)	1/n
Hexaclorobutadieno	360	0,63
Anetol	300	0,42
Acetato de fenil mercúrio	270	0,44
p-Nonilfenol	250	0,37
Acridina amarela	230	0,12
Benzidina dihidroclorada	220	0,37
n-Butildiftalato	220	0,45
N-Nitrosodifenilamina	220	0,37
Dimetilfenilcarbinol	210	0,33
$\beta$ -Naftol	100	0,26
Acridina laranja	180	0,29
$\alpha$ -Naftol	180	0,31
$\alpha$ -Naftilmna	160	0,34
Pentaclorofenol	150	0,42
p-Nitroanilina	140	0,27
1-Cloro-2-nitrobenzeno	130	0,46
Benzotiazol	120	0,27
Difenilamina	120	0,31

Continuação Tabela 3. Parâmetros da isoterma de Freudlich para algumas espécies químicas

Guanina	120	0,56
Dimetil ftalato	97	0,31
Clorobenzeno	93	0,98
Hidroquinona	90	0,25
p-Xileno	85	0,16
Acetofenona	74	0,44
1,2,3,4-Tetraidronaftaleno	74	0,81
Adenina	71	0,38
Nitrobenzeno	68	0,43
Dibromoclorometano	63	0,93

Fonte: Adaptado de Eckenfelder (1989)

## II. 4 – LODOS ATIVADOS

### II. 4. 1 – Introdução

O sistema de lodos ativados é um processo de tratamento de despejos domésticos e industriais, utilizado quando se deseja obter um efluente com elevada qualidade e em circunstâncias em que a área disponível para tratamento é reduzida. Entretanto este processo demanda um sistema de mecanização mais aprimorado do que outros, implicando uma operação mais sofisticada e maiores gastos com consumo de energia elétrica (VON SPERLING, 1997)

O processo de lodos ativados é o sistema biológico com maior eficiência de degradação e apresenta muitas vantagens operacionais em relação a outros processos, devida a sua flexibilidade de operação e variantes do processo (ANDRADE, 2004). Sabe-se que tecnologia na montagem e operação do sistema de lodos ativados é bem estabelecida o que se torna uma vantagem na sua implementação e operação.

O processo de lodos ativados é capaz de tratar uma ampla variedade de compostos orgânicos, muitos destes com propriedades poluentes e em estado coloidal. Contudo, em comparação a outros processos, o sistema de lodos ativados é altamente mecanizado o que implica uma operação com elevado consumo de energia elétrica (TOMITA et al., 2000; METCALF E EDDY, 1991).

O sistema de lodo ativado é composto de um tanque de aeração que se comporta como um reator CSTR (*Continuons stirred tank reactor*) e um tanque de decantação com recirculação de lodo. A aeração é fornecida com oxigênio atmosférico e os microrganismos a utilizam para degradarem a matéria orgânica suspensa e dissolvida, convertendo-a em CO<sub>2</sub> e flocos biológicos. A natureza flocular do subproduto microbiano formado é a responsável pela separação posterior da biomassa celular do efluente tratado. O sistema de aeração também



permite manter o conteúdo do tanque em permanente agitação conferindo maior homogeneidade e impedindo que as partículas em suspensão se depositem (METCALF E EDDY, 1991)

A Figura 5 ilustra as partes integrantes da etapa biológica do sistema de lodos ativados (VON SPERLING, 1997):

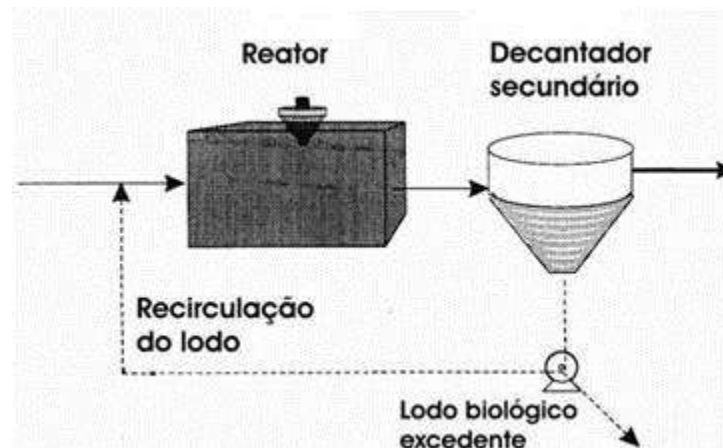


Figura 5. Fluxograma simplificado do processo convencional

Fonte: Adaptado de VON SPERLING, 1997

O lodo ativado (biomassa celular) é alimentado ao reator junto com o efluente sanitário ou industrial onde são misturados e aerados em unidades denominadas tanques de aeração (reator biológico). Nestas unidades, mantém-se uma cultura de bactérias aeróbias e facultativas em suspensão (JORDÃO & PESSOA, 1995). Na etapa posterior aos reatores biológicos encontra-se um sedimentador em série, que permite separar os flocos microbianos, através do adensamento parcial do material sedimentado. O sobrenadante clarificado pode ser descartado ou seguir para o tratamento terciário, visando polimento do efluente tratado. Enquanto que parte do lodo sedimentado é recirculado para o tanque de aeração promovendo maior concentração de microrganismos (SANT'ANNA, JR., 2010). O reator pode operar tanto em batelada como em fluxo

contínuo. A biomassa alimenta-se da matéria orgânica (substrato), e em algumas circunstâncias de matéria nitrogenada, convertendo-a em mais biomassa. Na etapa posterior, a biomassa é separada do efluente no decantador sendo parte dela recirculada ao reator e parte retirada do sistema. A concentração de biomassa é aumentada no reator principal, ao longo do tempo, o que eleva a eficiência do processo (VON SPERLING, 1997).

O fator fundamental para o bom desempenho do processo convencional de lodo ativado é a chamada sedimentabilidade do lodo, que precisa ocorrer de maneira adequada para atingir a concentração microbiana necessária no tanque de aeração, aumentando a qualidade do efluente tratado. (SANT'ANNA JR., 2010).

A sedimentação da biomassa no decantador ocorre com facilidade devida a sua propriedade flocular. Isso acontece porque as bactérias possuem uma matriz gelatinosa que as permite aglutinar entre si e com outros micro-organismos formando flocos com tamanhos maiores o que facilita a sedimentação (VON SPERLING, 1997).

Em comparação com uma lagoa aerada, o processo com recirculação de lodos é capaz de concentrar o tanque de aeração com sólidos suspensos mais de 10 vezes mais que a lagoa. Isso implica que os sólidos permanecem no sistema por um tempo superior ao do líquido aumentando a idade do lodo, ou seja, aumentando o tempo de permanência dos sólidos no tanque de aeração. A maior permanência dos sólidos é o fator principal que garante a elevada eficiência do processo, uma vez que a biomassa possui um tempo maior para metabolizar toda a matéria orgânica alimentada ao tanque de aeração (VON SPERLING, 1997).

No interior do tanque de aeração os micro-organismos crescem e se reproduzem ininterruptamente devido à alimentação contínua de matéria orgânica, o que acarreta o seu crescimento incontrolável e permitindo que a população de micro-organismos atinja concentrações excessivas. Isso dificulta a distribuição de oxigênio para as células e, conseqüentemente, na etapa posterior, o decantador

ficará sobrecarregado impedindo que os sólidos possam sedimentar de forma satisfatória e sendo carreados no efluente final, deteriorando a qualidade esperada. Para impedir que isso aconteça e para manter o sistema em equilíbrio, é retirada na purga de recirculação, aproximadamente, a mesma quantidade de biomassa que é aumentada por reprodução, o lodo excedente (VON SPERLING, 1997).

#### II. 4. 2 – Variantes do processo de lodos ativados

O processo de lodos ativados vem sofrendo diversas modificações desde sua criação, em 1914, com o objetivo de adequar o efluente tratado a especificações e às legislações ambientais. Estas modificações têm com base os mesmos princípios básicos, contudo as diferenças ocorrem no tipo de fluxo hidráulico no tanque de aeração, na forma como o oxigênio é distribuído ao tanque de aeração por meio dos aeradores, nos parâmetros operacionais do processo como a idade do lodo e no tipo de pré-tratamento que os afluentes sofrem (JORDÃO et al., 1995).

Os processos de lodos ativados podem ser divididos quanto à idade do lodo, quanto ao fluxo de alimentação ou quanto ao afluente à etapa biológica do sistema de lodos ativados (VON SPERLING, 1997).

Para cada uma das divisões mencionadas temos as seguintes subdivisões:

##### 1- Divisão quanto à idade do lodo

- Lodos ativados convencional;
- Aeração prolongada.

## 2 - Divisão quanto ao fluxo

- Fluxo contínuo;
- Fluxo intermitente.

### II. 4. 2. 1- Lodos ativados convencional

O sistema convencional opera com um decantador primário na entrada do tanque de aeração cujo objetivo principal é retirar parte da matéria orgânica em suspensão, ou seja, a parte mais densa e sedimentável (VON SPERLING, 1997). Com isso é obtido uma maior economia de energia que seria despendida para aerar um volume maior de matéria orgânica e, também, uma redução do volume do reator. Portanto, o sistema convencional tem como parte integrante e inicial o tratamento primário (VON SPERLING, 1997).

Para o sistema convencional, a idade do lodo é da ordem de 4 a 10 dias e o tempo de detenção hidráulica no reator é da ordem de 6 a 8 horas. A biomassa retirada do sistema no lodo excedente possui ainda um alto teor de matéria orgânica, como consequência da idade do lodo. Por isso requer ainda uma etapa de estabilização que ocorre em digestores primários e secundários. Para reduzir o volume dos digestores, o lodo é submetido, previamente, a uma etapa de adensamento em que é retirada a umidade, o que diminui o volume do lodo. A Figura 6 mostra o fluxograma do processo de lodos ativados convencional (VON SPERLING, 1997).

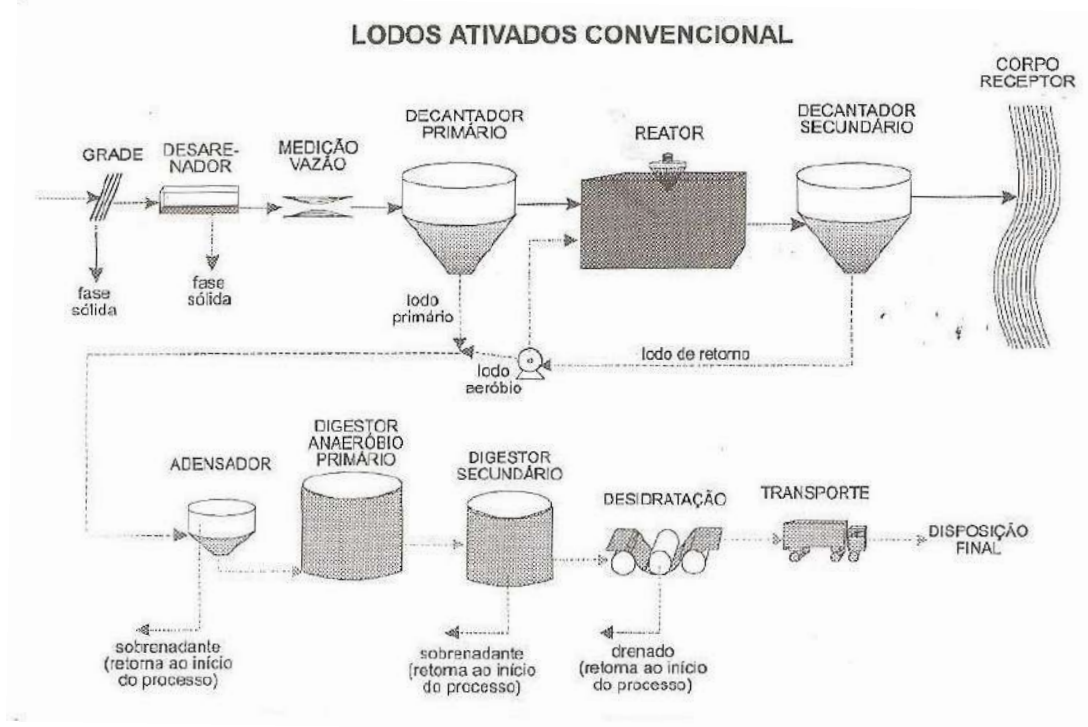


Figura 6. Fluxograma do processo de lodos ativados convencional

Fonte: VON SPERLING, 1997

#### II. 4. 2. 2 – Lodos Ativados - Aeração prolongada

Na aeração prolongada, os micro-organismos presentes no efluente possuem a capacidade de utilizarem a matéria orgânica para elaborarem filmes de massas gelatinosas que formam com os próprios organismos o conjunto principal do processo, que transfere para si substâncias liberadoras de energia e devolve à água os produtos do metabolismo como  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$  e  $\text{SO}_4^{2-}$  (JORDÃO et al., 1995).

O sistema de aeração prolongada tem como característica a permanência da biomassa no sistema por um período mais longo, da ordem de 18 a 30 dias, recebendo a mesma carga de DBO do esgoto bruto que o sistema convencional, o

que acarreta uma menor disponibilidade de alimento para as bactérias. Neste sistema, a quantidade de biomassa e o volume do reator aeróbio são maiores do que no sistema de lodos ativados convencional e o tempo de detenção do líquido é em torno de 16 a 24 horas (VON SPERLING, 1997). Assim, há menos matéria orgânica por unidade de volume do tanque de aeração e por unidade de biomassa do reator. Como consequência, as bactérias utilizam nos seus processos metabólicos, mais intensamente, a matéria orgânica biodegradável componente de suas células, para poderem sobreviver. A matéria orgânica celular é convertida em CO<sub>2</sub> e água através da respiração. Isso corresponde a uma estabilização da biomassa no próprio tanque de aeração enquanto no sistema convencional esta etapa ocorre posteriormente, na etapa de tratamento de lodo (VON SPERLING, 1997).

Pelo fato de não haver uma etapa posterior para a estabilização do lodo, é necessário evitar a geração de outras formas de lodo no tanque de aeração, que necessitem de estabilização nas etapas posteriores. Deste modo, os sistemas de aeração prolongada não possuem decantadores primários (Tratamento primário) antes do tanque de aeração, para evitar a necessidade de estabilização do lodo primário (VON SPERLING, 1997). Deste fato tem-se uma configuração simplificada para o fluxograma do processo de aeração prolongada (VON SPERLING, 1997). A Figura 7 ilustra o fluxograma do processo de aeração prolongada.



Figura 7. Fluxograma do processo de aeração prolongada

Fonte: VON SPERLING, 1997

#### II. 4. 2. 3 – Fluxo intermitente (Reatores de bateladas sequenciais)

Os sistemas de lodos ativados convencionais e de aeração prolongada são processos de fluxo contínuo com relação ao esgoto, em que este está entrando e saindo continuamente do tanque de aeração enquanto ocorrem os processos de remoção da matéria orgânica, porém há uma variante do sistema com operação em fluxo intermitente (VON SPERLING, 1997).

No processo de lodos ativados com operação intermitente, todas as unidades, processos e operações, associados ao tratamento tradicional, ocorrem em um único tanque de aeração, ou seja, a decantação primária, oxidação biológica e decantação secundária ocorrem no mesmo espaço físico, porém as etapas ocorrem em seqüências cronológicas e não em unidades separadas. O

processo intermitente pode ser aplicado tanto na modalidade convencional quanto na aeração prolongada. No caso da aeração prolongada, o tanque único também incorpora a etapa de digestão do lodo (VON SPERLING, 1997).

O processo intermitente consiste de um ou mais reatores de mistura completa onde ocorrem todas as etapas do tratamento. A chave para que todos os processos ocorram em um mesmo espaço físico é o estabelecimento de ciclos de operação com duração definida. A carga biológica permanece no reator durante todos os ciclos, o que dispensa o uso de decantadores em uma etapa posterior (VON SPERLING, 1997). A Figura 8 ilustra o fluxograma do processo em fluxo intermitente.

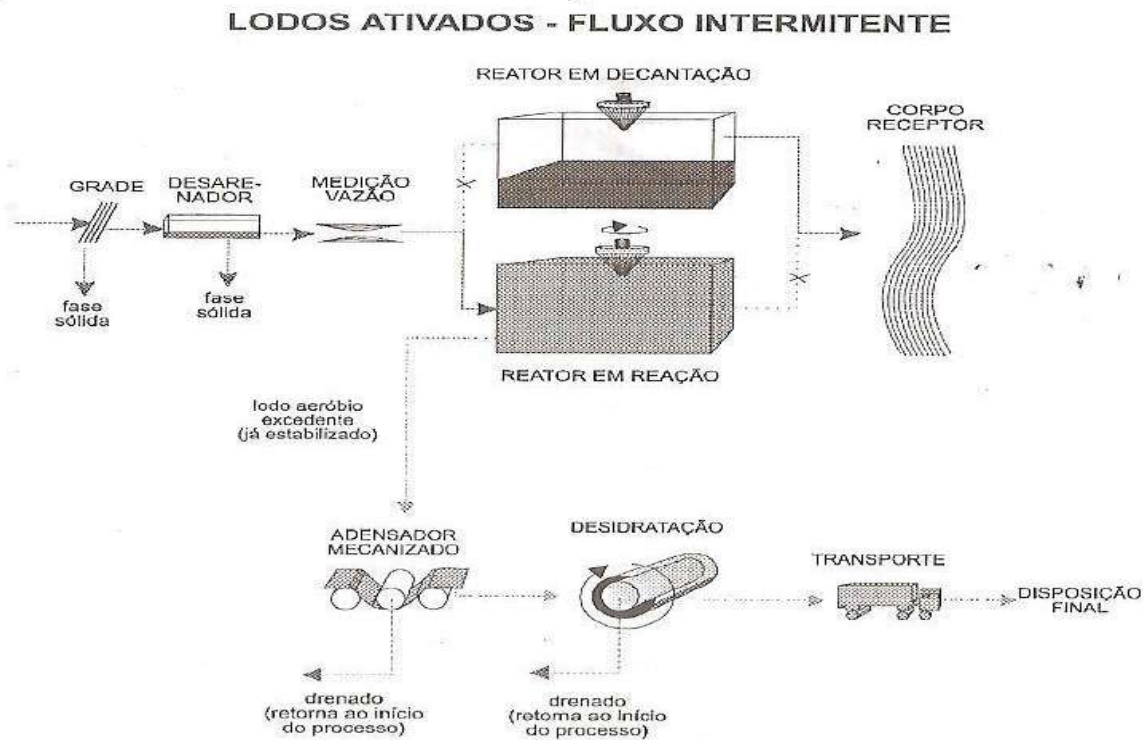


Figura 8. Fluxograma do processo em fluxo intermitente

Fonte: VON SPERLING, 1997



Os ciclos normais de tratamento no processo intermitente são:

1. Enchimento (Entrada de esgoto bruto no reator);
2. Reação (Aeração/Mistura de massa líquida contida no reator);
3. Sedimentação (Sedimentação e separação dos sólidos em suspensão do esgoto tratado);
4. Descarte do efluente tratado (Retirado do esgoto tratado do reator);
5. Repouso (Ajuste de ciclos e remoção do lodo excedente).

A duração de cada ciclo é uma função da vazão de afluente, das necessidades do tratamento e das características do esgoto e da biomassa no sistema.

## II. 5 - Processo PACT®

### II. 5. 1 – Introdução

O PACT® (*POWDERED ACTIVATED CARBON TREATMENT*) é um processo de tratamento de lixiviado que combina o processo de lodos ativados com uso de carvão ativado em pó. O PACT foi desenvolvido pela empresa DuPont no início dos anos 70, visando a remoção de alguns compostos que apresentam baixa biodegradabilidade ou que conferem toxicidade ao efluente (BORNHARDT et al., 1997; SHER et al., 2000).

Neste processo a adição de CAP é feita diretamente ao tanque de aeração, onde o processo de adsorção física e a oxidação biológica ocorrem simultaneamente, aumentando o rendimento do processo em relação aos processos convencionais de lodos ativados (SHER et al., 2000).

A adição de CAP ao processo traz varias vantagens, tais como (ECKENFELDER, 1999, METCALF& EDDY, 2003, SHER, 2000).

1. Estabilidade do sistema durante choques de carga;
2. Redução dos poluentes refratários prioritários;
3. Remoção de cor, odor e amônia;
4. Melhora a sedimentabilidade do lodo;
5. Reduzir ou eliminar essa inibição biológica.

As vantagens do processo PACT® em relação ao sistema de lodos ativado são devidas: à diminuição da toxicidade pela adsorção que permite a biodegradação adicional de matéria orgânica; a degradação de compostos não biodegradáveis ocasionadas pelo aumento da exposição destes a biomassa celular pela adsorção no carvão (ECKENFELDER, 2000).

O processo PACT® apresentou maior estabilidade para afluentes com altas cargas de fenol e melhores controles do processo em estudo realizado por Nayar e Sylvester (1978).

Experimentos realizados por Flynn & Barry (1978) em escala de bancada com efluentes da DuPont Chambers Works mostraram que o processo PACT® apresentava um efluente tratado com maior qualidade quando comparado ao sistema de lodos ativado.

Há uma relação de proporcionalidade direta entre a biomassa contendo carvão e a idade do lodo, pelo fato do descarte diário para manter a idade do lodo ser constituído de partículas de carvão aglomeradas aos flocos microbianos, o que diminui a concentração acumulada no reator (MEIDL, 1997). A equação 4 mostra a relação entre a biomassa contendo CAP e a idade do lodo.

$$X_{ca} = \frac{X_{ci} \times IL}{TRH} \quad (4)$$

Onde:  $X_{ca}$  = concentração de carvão no interior do reator;  $X_{ci}$  = reposição de carvão por volume de efluente;  $IL$  = idade do lodo e  $TRH$  = tempo de retenção hidráulica.

Muitas pesquisas relatam que há um efeito sinérgico aparente entre a biomassa celular e o carvão ativado. Estipula-se que o sinergismo pode estimular

a atividade biológica ou a biorregeneração da capacidade de adsorção do carvão ativado. Por outro lado, algumas pesquisas defendem que o aumento da eficiência observado resulta da combinação da degradação biológica causada pelo lodo ativado e a adsorção física pelo carvão ativado (ÇEÇEN, 1994, BORNHARDT et al., 1997 apud COSTA et al, 2003).

A biorregeneração pode ser definida como a renovação da capacidade de adsorção do carvão ativado pela ação de microrganismos. O mecanismo para explicar o incremento na atividade biológica inclui a alteração da população microbiana e/ou a proteção dos microrganismos pela adsorção de compostos tóxicos (SHER et al, 2000 apud COSTA et al, 2003).

A Tabela 4 mostra o resultado do desempenho do sistema PACT® para efluentes contendo os compostos orgânicos explicitados:

<b>Compostos (todos os valores em microgramas/litro)</b>	<b>Desempenho com PACT®</b>		<b>EPA</b>
	<b>Afluente</b>	<b>Efluente</b>	
Acrilonitrila	11700	-	96
Benzeno	290	1	37
Tetracloroeto de Carbono	870	1	18
1,2,4- Triclorobenzeno	210	0,21	68
2-Clorofenol	31,9	0,05	31
2,4-Diclorofenol	19	1,33	39

Fonte: Adaptado de *Siemens Water Technologies* (1999).

Para todos os compostos citados na Tabela 4, foi verificado que o processo PACT® mostrou-se eficiente na remoção dos poluentes oriundos dos processos

industriais, pois os valores pós-tratamento foram reduzidos alcançando valores menores do que os recomendados pela EPA.

## Capítulo III – MATERIAIS E MÉTODOS

### III. 1 – Efluente utilizado

O trabalho foi realizado com amostras de lixiviado geradas e coletadas no Aterro de Gericinó. Todas as amostras foram coletadas pela COMLURB (Companhia Municipal de Limpeza Urbana) e acondicionadas em bombonas de 10 litros à temperatura ambiente no Laboratório de Tratamento de Águas e Reuso de Efluentes (LABTARE) na Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, onde foram realizados os experimentos. Os experimentos foram realizados logo em seguida da chegada das amostras ao laboratório.

Para os ensaios de levantamento de isotermas e para o tratamento de lodos ativados, foram utilizadas as amostras brutas de lixiviado oriundas do aterro de Gericinó tendo-se ajustado os valores de pH para 6,5 – 7,0, no caso dos ensaios de biotratabilidade.

#### III. 1. 1 – Caracterização do lixiviado

O lixiviado de Gericinó foi caracterizado com base nos parâmetros de Absorvância em 254nm, Demanda Química de oxigênio (DQO), Carbono Orgânico Total (COT) e pH, conforme descrito no item III. 5.

#### III. 2 – Lodo ativado utilizado nos ensaios de biotratabilidade

O lodo utilizado nas etapas de biotratabilidade passou por um período de aclimação com o lixiviado de Gericinó em pH de 6,50 a 7,00 em um volume total de 2 litros, aumentando sua proporção com o tempo. Para isso o lodo foi mantido por aeração de compressores de aquário a temperatura ambiente. A cada 24 horas a aeração era interrompida e o sobrenadante era descartado e o volume repostado com novo lixiviado, retomando-se a aeração. Esse processo foi repetido durante uma semana. A Figura 9 ilustra o lodo ativado em processo de aclimação.



Figura 9: Reservatório com lodo ativado para aclimação com lixiviado de Gericinó.

### III. 3 – Carvões ativados em pó utilizados nos ensaios

Os carvões ativados em pó (CAP) utilizados na etapa de escolha preliminar foram de três marcas: Brasilac, Carbomafra e Norit. Após os ensaios preliminares

apenas duas marcas foram escolhidas e utilizadas nos ensaios de biotratabilidade. A Tabela 5 mostra o número de série do tipo, a origem e a nacionalidade das três marcas de carvões.

Tabela 5: Origem e país de fabricação dos carvões utilizados

Carvão	Origem	País de fabricação
Brasilac (Tipo Carbonado Kapa L)	Vegetal (Nó de Pinho)	Brasil
Carbomafra (Tipo: 118 CB AS nº 170)	Vegetal (Madeira)	Brasil
Norit (Tipo Sae-super E114)	Betuminoso	Holanda

### III. 4 – Etapas do estudo

O presente estudo foi dividido em duas etapas. A primeira consistiu na avaliação de três marcas distintas de carvão ativado em pó quanto a sua capacidade de adsorver a matéria orgânica presente no lixiviado e comparar o desempenho das três marcas através de ensaios realizados em dois diferentes tempos de equilíbrio. Com os resultados foram montadas isotermas utilizando o modelo matemático de Freundlich e foram avaliadas as eficiências de remoção. A segunda etapa consistiu em ensaios de biotratabilidade onde quatro sistemas foram montados, em duplicata. Um contendo apenas o lixiviado, outro simulando o processo convencional (lixiviado + lodo ativado), e os dois últimos simulando o processo PACT® em concentrações de 3,0 e 5,0 g CAP/L respectivamente. O



objetivo desta etapa foi avaliar as diferentes dosagens de carvão ativado em pó quando adicionado o lodo ativado e avaliar a eficiência do processo.

#### III. 4. 1 – Escolha do carvão ativado

O levantamento das isotermas se utilizou das recomendações da ASTM 3860. Na primeira etapa, foram realizados ensaios onde seis amostras de 100 mL de lixiviado, contidas em erlenmeyers de 250 mL, foram postas em contato com carvão ativado em pó, previamente seco por quatro horas em estufa, nas concentrações de: 0,1; 0,4; 0,7; 1,0; 3,0 e 5,0 g/L. Utilizou-se como controle 100 mL de lixiviado bruto. Os ensaios foram realizados em incubadora com agitação (marca Nova Ética) Modelo 430-RDBP com velocidade de 170 rpm, a 25°C. Para cada tipo de carvão, foram realizados dois ensaios diferentes, sendo o primeiro com tempo de contato de 2h e, o segundo, de 24h, onde foram analisados DQO, COT e Absorvância em 254nm.

#### III. 4. 2 – Ensaios de biotratabilidade

Após o levantamento das isotermas de adsorção, as duas marcas de carvão ativado que apresentaram melhores eficiências de remoção de matéria orgânica foram utilizadas nos ensaios de biotratabilidade. Os experimentos foram realizados em duas etapas sendo estas, respectivamente, sem reposição e com reposição de CAP, totalizando quatro ensaios, duas para o CAP Carbomafra (com e sem reposição) e duas para o CAP Norit (com e sem reposição).

Em todos os experimentos de biotratabilidade, o carvão foi seco por 4h, em estufa a 130°C. A Tabela 6 mostra os detalhes dos ensaios de biotratabilidade. O volume reacional de cada ensaio foi de 300 mL, foi utilizado inicialmente 20%

(em volume) de lodo sedimentado e o pH foi mantido na faixa de 6,5 - 7,0. Ressalta-se que o processo de lodos ativados foi operado em regime batelada.

Tabela 6. Resumo das condições operacionais dos ensaios de Biotratabilidade

Ensaio	Lixiviado	CAP	Condições	Tempo de Operação
EB1	Aterro de Gericinó	Carbomafra	-Tempo de batelada= 24h -Sem Reposição de Carvão	5 dias
EB2		Norit	-Xca* = 3 e 5 g/L -IL=∞ (sem purga de lodo) -Vol. reacional= 300mL	
EB3		Carbomafra	-Tempo de batelada= 24h -Com Reposição de Carvão	
EB4		Norit	-Xci**=100 e 167 mg/L -Xca =3 e 5 g/L -IL=30 dias -Vol. reacional= 300mL	

\*Xca= Concentração de CAP no interior do reator (g CAP/L de reator)

\*\*Xci = reposição de carvão diária: MG CAP/L de lixiviado

Em cada ensaio foram monitorados, simultaneamente, quatro diferentes testes em provetas de 500 mL, durante cinco dias, cujas identificações estão mostradas abaixo:

- 1º Teste - Controle: lixiviado bruto + aeração
- 2º Teste – Lodos Ativados: lixiviado e biomassa (lodo) + aeração
- 3º Teste – PACT 3g/L: lixiviado, biomassa e 3,0 g/L CAP + aeração
- 4º Teste – PACT 5g/L: lixiviado, biomassa e 5,0 g/L CAP + aeração

A cada 24 horas era retirada uma alíquota da suspensão, que era filtrada e submetida às análises DQO, COT e Absorvância a 254nm. Todos os ensaios foram realizados em provetas com 500 mL de volume, sob aeração de compressores de aquário, em temperatura ambiente. A Figura 10 mostra os ensaios de biotratabilidade em andamento.

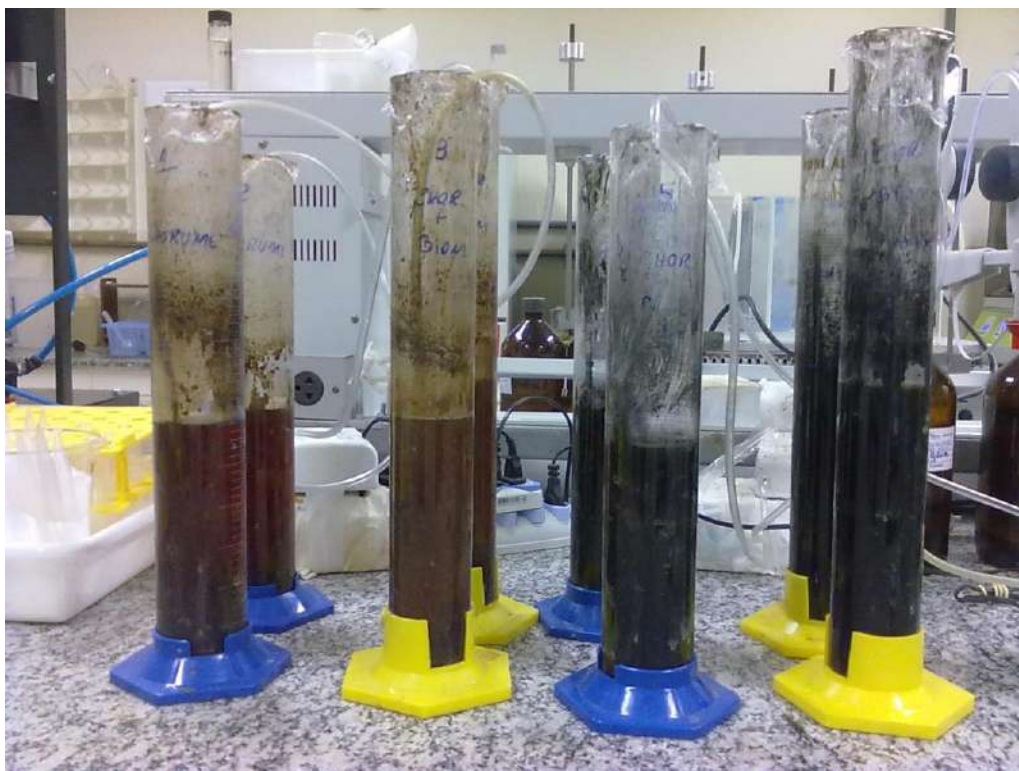


Figura 10. Testes operando em sistema aeróbio de batelada, nos EB

Nos ensaios EB3 e EB4, com reposição de carvão, foram realizadas diariamente a purga do lodo para manter a idade do lodo em 30 dias. Os valores de 100 e 167 mg/L utilizados, respectivamente, na reposição dos ensaios com 3 e 5g/L de carvão, foram obtidos segundo a equação 5 abaixo:

$$X_{ca} = \frac{X_{ci} \times IL}{TRH} \quad (5)$$

Onde:  $X_{ca}$  = concentração de carvão no interior do reator;  $X_{ci}$  = reposição de carvão (por volume de efluente); IL= idade do lodo; TRH= tempo de retenção hidráulica.

### III. 5 – Metodologia analítica

Para avaliar uma correta e eficiente operação do processo de lodos ativados com carvão ativado foram avaliados os seguintes parâmetros:

#### III. 5. 1 – Demanda Química de Oxigênio (DQO)

Segundo Jordão (1995), a DQO corresponde à quantidade de oxigênio necessária para oxidar a fração de matéria orgânica de uma amostra que seja oxidável pelo permanganato ou dicromato de potássio em solução ácida.

O método de DQO pode ser realizado por meio de uma mistura em ebulição de ácido crômico e ácido sulfúrico (Dicromato de Potássio em meio ácido),

conforme o “método de refluxo fechado” descrito na seção 5220 D recomendado pela AWWA (APHA, 2005).

Os compostos de baixa massa molecular e os ácidos graxos não são oxidados com dicromato de potássio em meio ácido sendo somente em presença de sulfato de prata que atua como catalisador. Os cloretos são oxidados pelo dicromato de potássio ( $K_2Cr_2O_7$ ) sendo, portanto, um interferente e atuando de forma negativa nos resultados. Para solucionar a interferência pode-se utilizar sulfato de mercúrio proporcionalmente a concentração de cloretos para minimizar os erros.

As análises foram realizadas em digestor e espectrofotômetro da marca HACH.

### III. 5. 2 – Potencial Hidrogeniônico (pH)

O controle do pH de um sistema aquoso é fundamental para o efetivo monitoramento de crescimento de microrganismos, pois muitas espécies só se desenvolvem em certa faixa de pH.

As análises de pH foram realizadas no medidor de pH da marca QUIMIS.

### III. 5. 3 – Carbono orgânico total (COT)

O carbono orgânico em esgotos, lixiviado ou águas em geral (rios, lagos etc...) engloba uma grande variedade de compostos orgânicos em diferentes estados de oxidação. Alguns destes compostos podem ser oxidados tanto por processos químicos ou biológicos (GREENBERG et. al., 2005)

Os métodos e instrumentos para determinação de COT analisam duas frações totais de carbono que são definidas como: carbono inorgânico formada por  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$  e  $\text{CO}_2$  dissolvido e carbono orgânico total (COT) formado por todo carbono ligada covalentemente em moléculas orgânicas (GREENBERG et. al., 2005).

As análises de COT foram realizadas em aparelho de COT Analyzer-HiperCOT 1000 Modelo 5310-C.

### III. 5. 4 – Absorvância em 254nm

Para as análises de ultravioleta, utilizou-se espectrofotômetro UV mini 1240 da marca Shimadzu e cubeta de quartzo de volume 3,5 mL. O equipamento foi ajustado para comprimento de onda de 254nm e as leituras foram feitas considerando o valor mais baixo e o valor mais alto das oscilações entre valores apresentados pelo espectrofotômetro. O valor considerado foi à média entre esses dois valores. A Absorvância fornece indicação do conteúdo aromático presente que absorvem neste comprimento de onda (APHA 2005).

### III. 6 – Cálculo da eficiência de remoção

A eficiência de remoção (ou redução no caso da Absorvância) foi calculada de acordo com a equação 6. O ensaio controle foi utilizado como valor de referência para o cálculo da eficiência de remoção.

$$E.R(\%) = \frac{(C_o - C_n)}{C_o} \times 100 \quad (6)$$

Onde: E.R=Eficiência de remoção; C<sub>o</sub>=Valor do parâmetro medido no controle; C<sub>n</sub>=Valor do parâmetro medido no ensaio com lodo ativado e/ou lodo ativado+carvão ativado.

## Capítulo IV – RESULTADOS E DISCUSSÕES

### IV. 1 – Caracterização do lixiviado de Gericinó

A Tabela 7 ilustra a caracterização do bruto de lixiviado de Gericinó:

Tabela 7: Parâmetros de caracterização do lixiviado bruto de Gericinó.

Parâmetros	Aterro de Gericinó
	Valor Médio
Absorvância em 254 nm	12,755
COT (mgC/L)	1863
DQO (mgO <sub>2</sub> /L)	616,4
pH	8,36

Os valores de COT e DQO indicam que a quantidade de matéria orgânica presente no lixiviado bruto do aterro de Gericinó é elevada. O pH encontra-se na faixa básica, o que demonstra que o lixiviado é oriundo de um aterro estabilizado. O elevado valor da absorvância indica alto teor de substâncias aromáticas, provavelmente as substâncias húmicas e fúlvicas, normalmente presentes em lixiviados antigos.

Lixiviado proveniente de aterros mais antigos possuem a característica de serem mais estabilizados e, por isso, possuem uma maior quantidade de compostos recalcitrantes, que resistem à biodegradação e tendem a persistir e se acumular no ambiente (FELICE, 2010).



## IV. 2 – Avaliação da adsorção dos CAP

### IV. 2. 1 – Eficiências de remoção de matéria orgânica

A Tabela 8 mostra as eficiências de remoção para os ensaios de CAP de 0,1 a 5,0 g/L com lixiviado em tempo de equilíbrio de 2 e 24 horas.

Tabela 8: Eficiência de remoção dos ensaios de CAP em equilíbrio com lixiviado.

T = 25°C. Volume= 100 mL

Ensaio		2 horas			24 horas		
		Absorvância	COT	DQO	Absorvância	COT	DQO
Brasilac	0,1 g/L	5%	3%	6%	4%	0%	3%
	0,4 g/L	9%	7%	17%	8%	7%	15%
	0,7 g/L	13%	11%	21%	12%	15%	21%
	1 g/L	22%	11%	29%	24%	13%	27%
	3 g/L	25%	26%	30%	35%	37%	33%
	5 g/L	32%	42%	30%	39%	51%	39%
Carbomafra	0,1 g/L	5%	10%	4%	11%	2%	5%
	0,4 g/L	7%	11%	2%	16%	10%	12%
	0,7 g/L	16%	15%	8%	23%	10%	19%
	1 g/L	24%	19%	17%	37%	19%	34%
	3 g/L	43%	22%	33%	49%	20%	48%
	5 g/L	62%	33%	46%	67%	31%	66%
Norit	0,1 g/L	3%	7%	12%	11%	11%	11%
	0,4 g/L	9%	16%	17%	23%	18%	25%
	0,7 g/L	9%	29%	20%	35%	30%	34%
	1 g/L	13%	33%	24%	54%	42%	45%
	3 g/L	34%	43%	41%	76%	52%	62%
	5 g/L	57%	51%	53%	90%	69%	83%

A partir da análise da Tabela 8, observa-se que o CAP Norit alcançou as maiores eficiências de remoção de matéria orgânica, com exceção da Absorvância em 2 horas na concentração de 5,0 g/L, no qual o carvão Carbomafra obteve eficiência de remoção de 62% contra 57% para o CAP Norit. Pode-se observar também que ao aumentar o tempo de ensaio de 2 para 24 horas ocorreu um aumento na eficiência de remoção do CAP Norit em relação ao Carbomafra e uma variação muito baixa para o CAP Brasilac. Desta observação conclui-se que a adsorção do CAP Brasilac entra em equilíbrio dentro do tempo recomendado pela ASTM 3860 (2 horas), enquanto para os CAP Carbomafra e Norit o tempo de equilíbrio é maior, o que pode ser comprovado pela observação da Absorvância para o CAP Norit, que teve um aumento na eficiência de redução de 57% em duas horas para 90% em 24 horas. Isto também significa que houve remoção quase completa de toda a matéria orgânica aromática, que ficou adsorvida no carvão. De forma análoga ocorreu para a DQO do CAP Norit. Ressalta-se também que a variação da eficiência de remoção de 2 para 24 horas do CAP Brasilac 3,0 e 5,0 g/L permaneceu quase constante para COT e DQO, o que demonstra, como discutido para a Absorvância, que o equilíbrio de adsorção da matéria orgânica pelo CAP Brasilac ocorreu próximo ao tempo de 2 horas não sendo possível a adsorção de mais matéria orgânica com o aumento do tempo de ensaio.

Apesar da ASTM 3860 recomendar que os ensaios de isoterma sejam realizados para tempo de 2 horas e, esta norma ser justificada por se acreditar que duas horas é o tempo necessário para que a concentração do adsorvato em solução entre em equilíbrio com a massa de adsorvente adsorvida no carvão, as observações experimentais neste trabalho mostraram o contrário para os CAP Carbomafra e Norit. O aumento significativo na eficiência de remoção do CAP Norit pode ter ocorrido pela sua origem betuminosa que pode agregar a este CAP características porosas diversas dos CAP Brasilac e Carbomafra com um volume de poros adequado a acomodação da matéria orgânica presente no lixiviado. Tais características porosas podem ser as responsáveis por uma interação mais favorável entre a matéria orgânica e a superfície do CAP Norit e sua alta

capacidade adsorviva poderia ser a responsável por um tempo de equilíbrio entre adsorvato e adsorvente maior.

Pelo fato da eficiência de remoção ter sido muito maior para o CAP Norit nas concentrações de 3,0 e 5,0 g/L para os parâmetros COT e DQO (em 2 horas) e Absorvância, COT e DQO (em 24 horas), este foi um dos CAP escolhidos para a segunda fase do trabalho, os ensaios de biotratabilidade. Como o CAP Carbomafra também apresentou eficiências significantes e, por esse ser de origem nacional, também foi escolhido para a próxima etapa.

#### IV. 2. 2 – Construção das isotermas

A partir dos ensaios de adsorção, de 2 e 24 horas, realizados com as três diferentes marcas de CAP (Brasilac, Carbomafra e Norit) obteve-se os seguintes valores experimentais tabelados no ANEXO 1. Os valores experimentais foram ajustados ao modelo de Freundlich, e, posteriormente, linearizados para a obtenção dos parâmetros experimentais  $1/n$  e  $K_f$ . Os gráficos da linearização foram gerados na planilha eletrônica Excel 2007 e estão mostrados no ANEXO 2.

Utilizou-se a isoterma de Freundlich na avaliação dos CAP pelo fato deste modelo se ajustar melhor para processos de adsorção entre fases heterogêneas (neste caso líquido/sólido) do que outros modelos, tais como a isoterma de Langmuir ou BET e por este modelo ser o mais adequado ao ajuste como mostrado no trabalho anterior (MAIA, 2012).

O parâmetro  $K_f$  é o mais indicado para a comparação da capacidade adsorviva entre os adsorventes experimentados (BRASIL, 2005). Segundo Müller (2009), no parâmetro  $1/n$ , o  $n$  representa a força de ligação entre os agentes da adsorção, ou seja, quanto maior o valor do parâmetro  $n$ , maior a irreversibilidade do processo de adsorção. Assim, valores de  $1/n$  menores do que um é desejável.

A Tabela 9 mostra os parâmetros  $1/n$  e  $K_f$  obtidos na linearização dos resultados experimentais.

Tabela 9: Valores de  $1/n$ ,  $K_f$  e o coeficiente de regressão ( $R^2$ ) para os ajustes à isoterma de Freundlich dos valores experimentais de adsorção de 2 e 24 horas para os três carvões avaliados para a análise de Absorvância.

Ensaio			$1/n$	$K_f$	$R^2$
2 Horas	Brasilac	Absorvância	5,342	5,902e-6	0,910
		COT	2,14	1,047e-4	0,755
		DQO	6,819	1,513e-19	0,922
	Carbomafra	Absorvância	1,365	0,1452	0,757
		COT	5,686	2,138e-14	0,8
		DQO	2,515	5,224e-6	0,819
	Norit	Absorvância	0,192	1,135	0,7
		COT	3,022	1,45e-6	0,93
		DQO	2,183	9,057e-5	0,868
24 Horas	Brasilac	Absorvância	2,399	0,00895	0,729
		COT	0,845	0,515	0,601
		DQO	4,287	1,905e-11	0,893
	Carbomafra	Absorvância	1,067	0,245	0,903
		COT	3,639	2,7e-8	0,783
		DQO	1,175	0,1233	0,822
	Norit	Absorvância	0,761	0,588	0,898
		COT	1,692	0,00933	0,822
		DQO	1,801	0,00367	0,919

As Figuras 11 e 12 mostram os gráficos das isotermas montadas com os valores de  $1/n$  e  $K_f$  e os pontos experimentais dos ensaios de lixiviado com CAP para 2 e 24 horas do parâmetro Absorvância. As expressões matemáticas das isotermas estão no anexo 3.

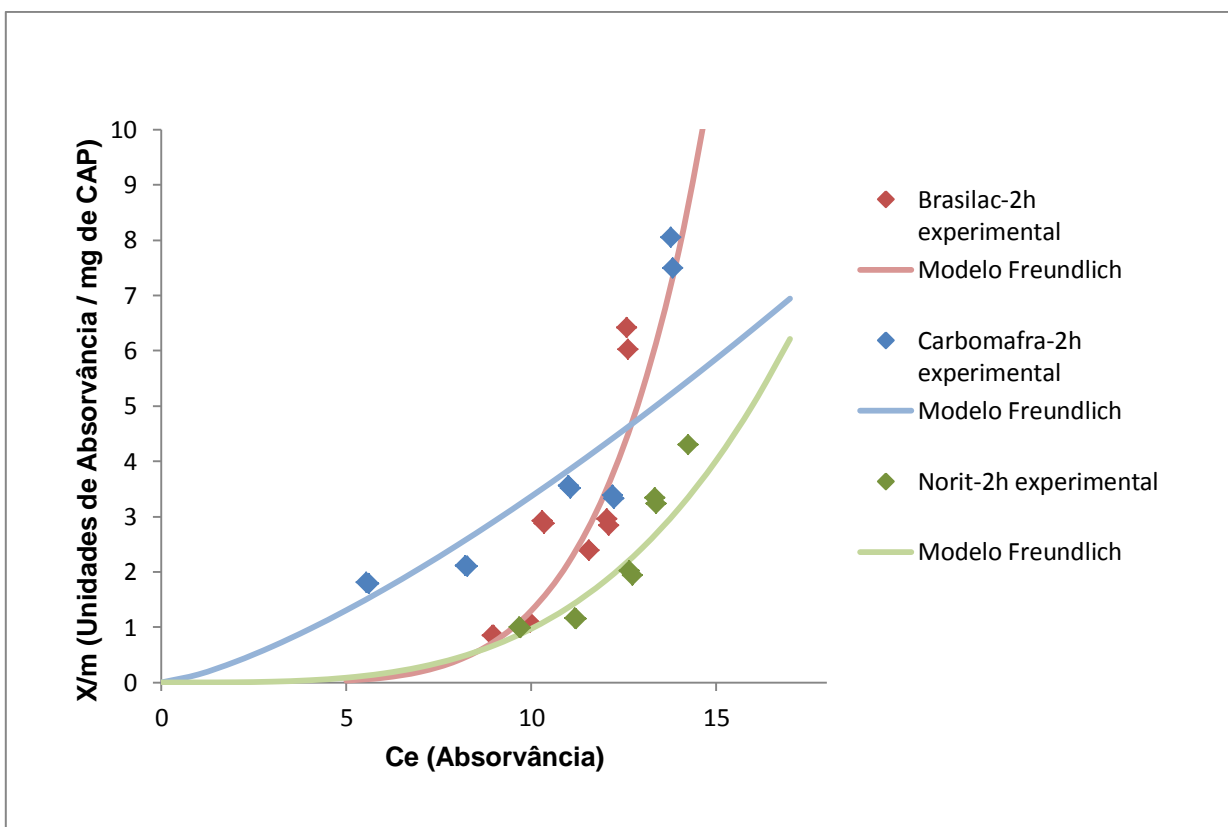


Figura 11. Resultados de Absorvância nos ensaios de adsorção do lixiviado de Gericinó com o carvão Brasilac, Carbomafra e Norit e Modelos de Freundlich ajustados aos dados experimentais. Tempo de equilíbrio = 2 horas. Temperatura= 25 °C. Volume de ensaio = 100 mL

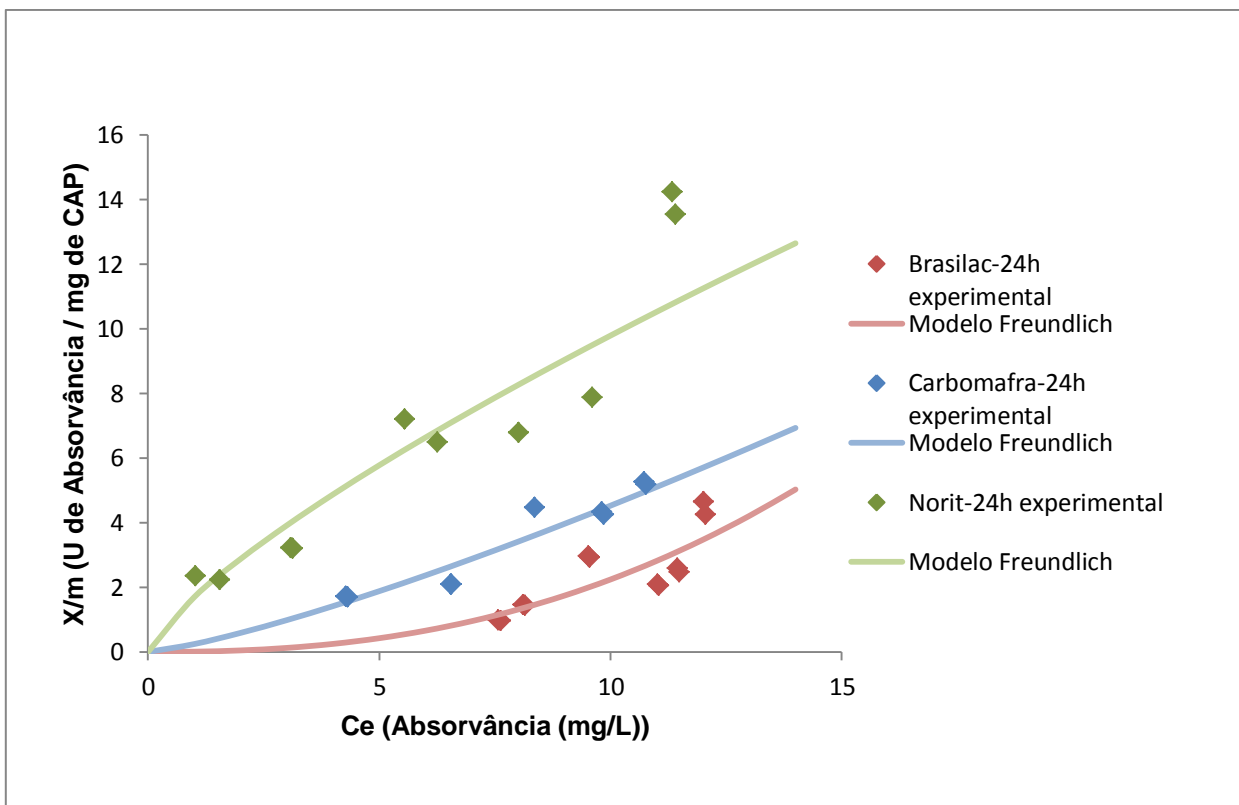


Figura 12. Resultados de Adsorvância nos ensaios de adsorção do lixiviado de Gericinó com os carvões Brasilac, Carbomafra e Norit e Modelos de Freundlich ajustados aos dados experimentais. Tempo de equilíbrio = 24 horas. Temperatura= 25 °C. Volume de ensaio = 100 mL

As Figuras 13 e 14 mostram os gráficos das isotermas montadas com os valores de  $1/n$  e  $K_f$  e os pontos experimentais dos ensaios de lixiviado com CAP para 2 e 24 horas do parâmetro COT. As expressões matemáticas das isotermas estão no anexo3.

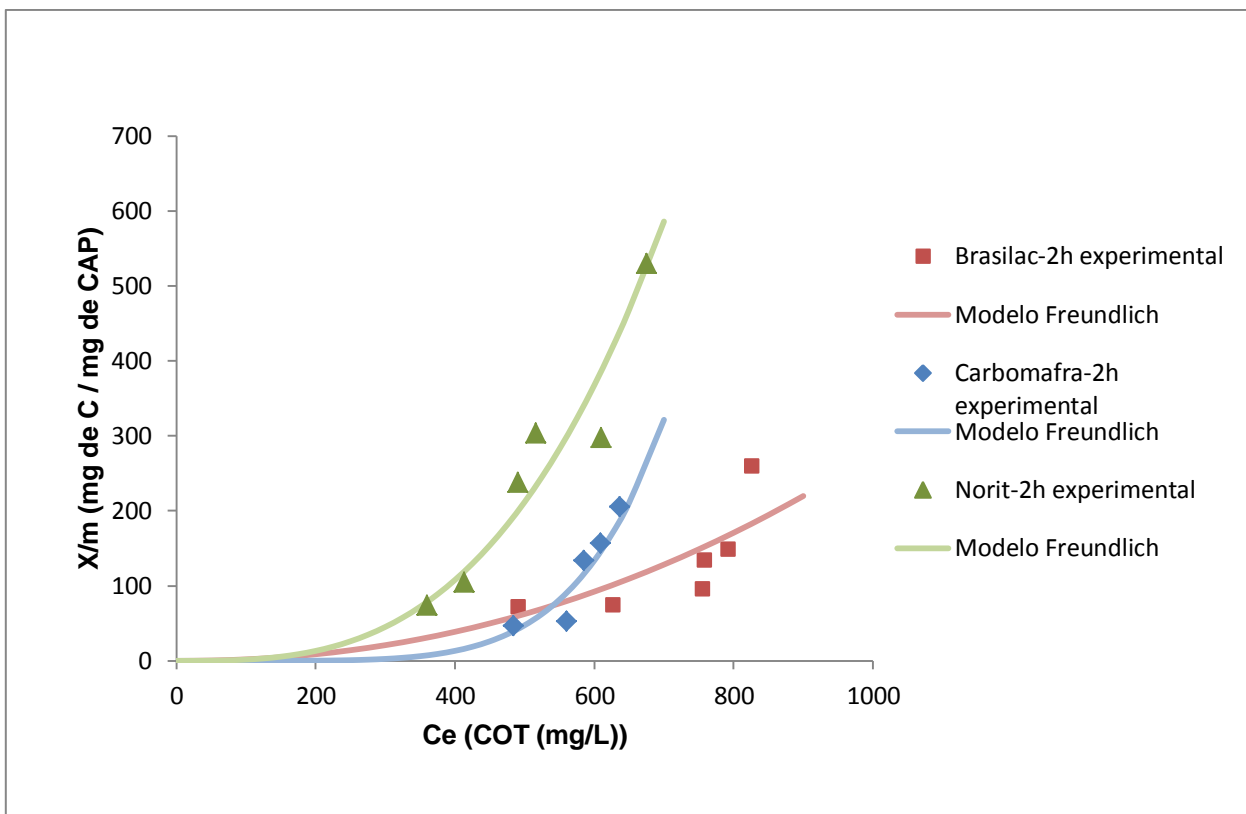


Figura 13. Resultados de COT nos ensaios de adsorção do lixiviado de Gericinó com os carvões Brasilac, Carbomafra e Norit e Modelos de Freundlich ajustados aos dados experimentais. Tempo de equilíbrio = 2 horas. Temperatura= 25 °C. Volume de ensaio = 100 mL



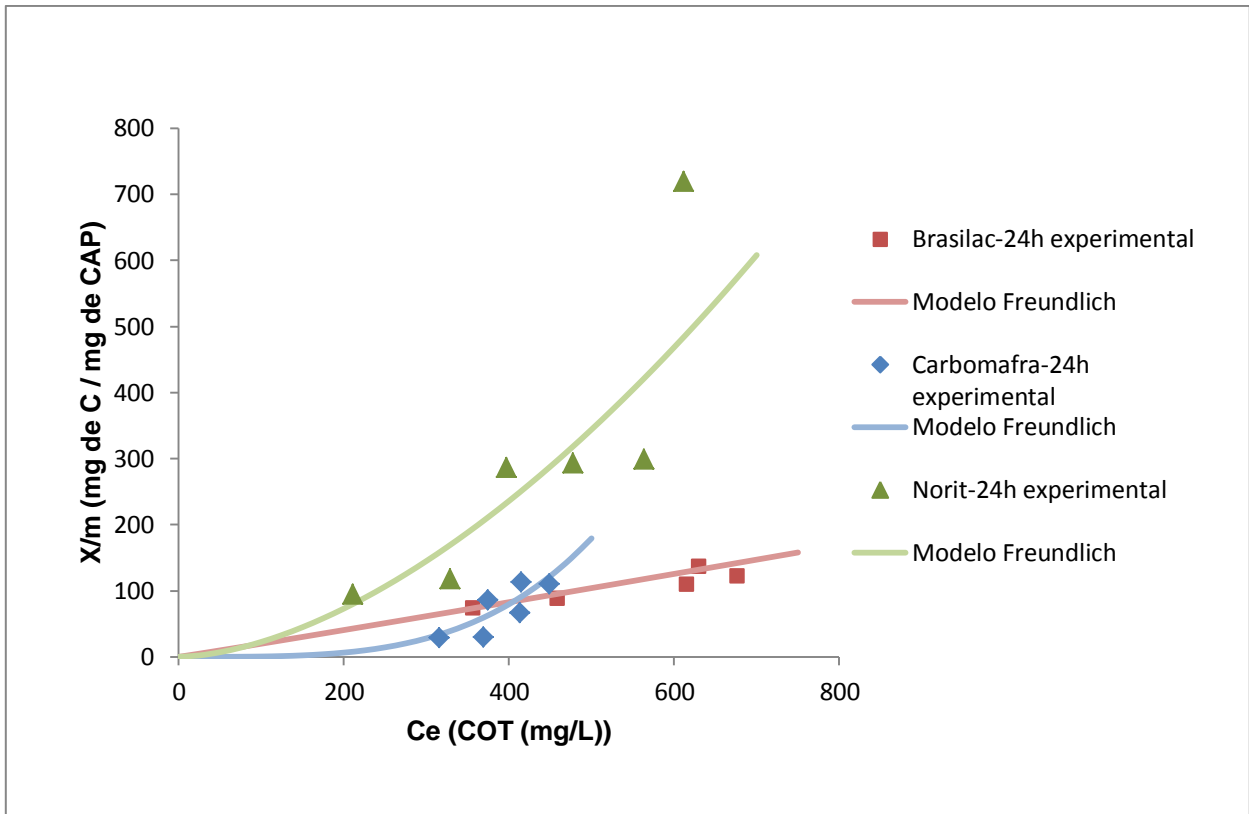


Figura 14. Resultados de COT nos ensaios de adsorção do lixiviado de Gericinó com os carvões Brasilac, Carbomafra e Norit e Modelos de Freundlich ajustados aos dados experimentais. Tempo de equilíbrio = 24 horas. Temperatura= 25 °C. Volume de ensaio = 100 mL

As Figuras 15 e 16 mostram os gráficos das isotermas montadas com os valores de  $1/n$  e  $K_f$  e os pontos experimentais dos ensaios de lixiviado com CAP para 2 e 24 horas do parâmetro DQO. As expressões matemáticas das isotermas estão no anexo3.

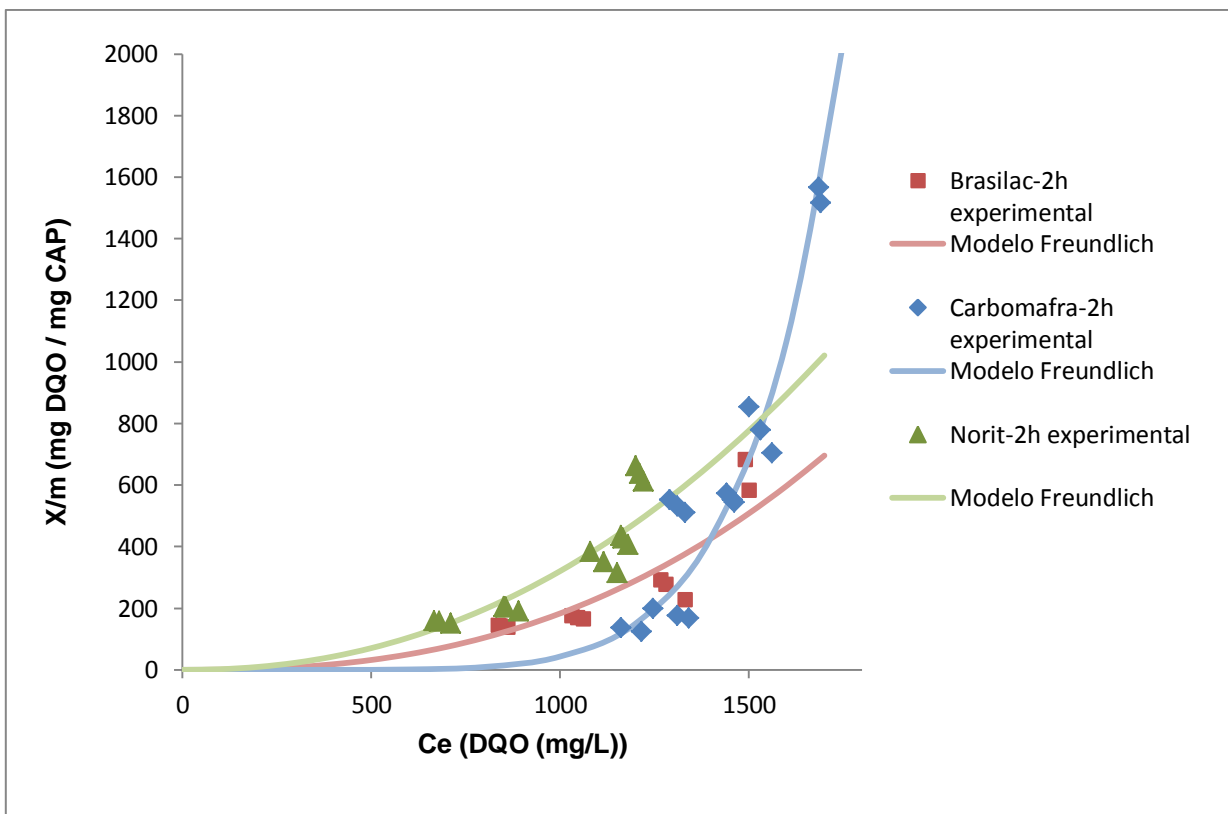


Figura 15. Resultados de DQO nos ensaios de adsorção do lixiviado de Gericinó com os carvões Brasilac, Carbomafra e Norit e Modelos de Freundlich ajustados aos dados experimentais. Tempo de equilíbrio = 2 horas. Temperatura= 25 °C. Volume de ensaio = 100 mL

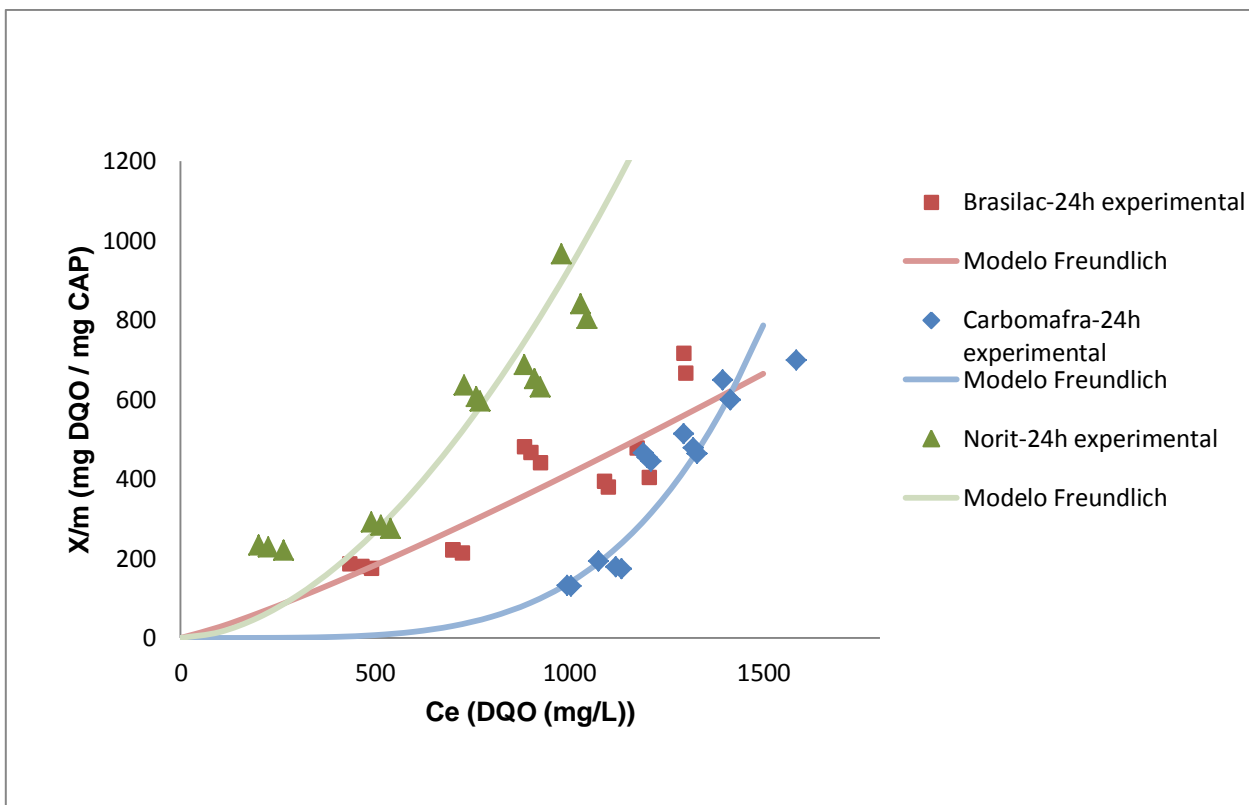


Figura 16. Resultados de DQO nos ensaios de adsorção do lixiviado de Gericinó com os carvões Brasilac, Carbomafra e Norit e Modelo de Freundlich ajustados aos dados experimentais. Tempo de equilíbrio = 24 horas. Temperatura= 25 °C. Volume de ensaio = 100 mL

Da Tabela 9 e dos gráficos das isotermas, observa-se que a grande maioria dos parâmetros  $1/n$  apresentaram valores maiores que 1, o que mostra que a maioria dos valores de  $n$  são menores que 1. Isso indica uma baixa afinidade do CAP com o lixiviado. Apenas é possível observar valores de  $1/n$  menores que 1 para Absorvância do lixiviado tratado com CAP Norit nos ensaios de 2 e 24 horas e para COT no ensaio de 24 horas para o CAP Brasilac.

Observa-se também que para o parâmetro Absorvância 2 e 24h a ordem crescente dos valores de  $1/n$  foi: Carvão Norit, Carvão Carbomafra e Carvão Brasilac. Isso demonstra uma maior força de interação entre o carvão Norit com a matéria orgânica aromática presente no lixiviado em relação às outras duas

marcas e uma maior interação do carvão Carbomafra em relação ao Brasilac. Para o COT e a DQO os carvões Carbomafra e Norit respectivamente apresentaram melhores valores de  $1/n$  do que o carvão Brasilac.

O carvão Brasilac apresentou valores muito baixos para  $K_f$  para todas as análises de Absorvância e DQO, tanto nos ensaios de 2 e 24 horas, o que significa que este CAP possui a menor afinidade com o lixiviado e portanto apresenta baixa remoção de matéria orgânica entre as três marcas de CAP. Este fato pode ser comprovado visualmente após os ensaios de 2 e 24 horas em que o lixiviado tratado com carvão Brasilac apresentou a coloração mais escura em relação ao lixiviado tratado com carvão Carbomafra e Norit. O Carvão Norit nos ensaios de 2 e 24 horas para a análise de Absorvância apresentou os maiores valores de  $K_f$  demonstrando que entre as três marcas de CAP estudadas o CAP Norit apresentou a melhor afinidade.

Ressalta-se ainda que o coeficiente de regressão ( $R^2$ ), para a grande maioria dos ajustes, foi maior do que 0,7 mostrando que os pontos experimentais dos ensaios de carvão ativado em pó e lixiviado, em equilíbrio, tiveram um ajuste razoável ao modelo, apesar de alguns pontos experimentais não seguirem esta tendência. Para um melhor ajuste, alguns pontos, em geral de menor concentração de carvão, foram descartados de forma a não prejudicar os ajustes e os resultados finais.

## IV. 3 – Ensaios de biotratabilidade

### IV. 3. 1 – Ensaio de Biotratabilidade1 (EB1)

As Figuras 17 e 18 apresentam os monitoramentos e as eficiências de redução para Absorvância sem reposição de carvão nos sistemas controle, Lodo ativado, PACT® 3,0 g/L e PACT® 5,0 g/L para o CAP Carbomafra.

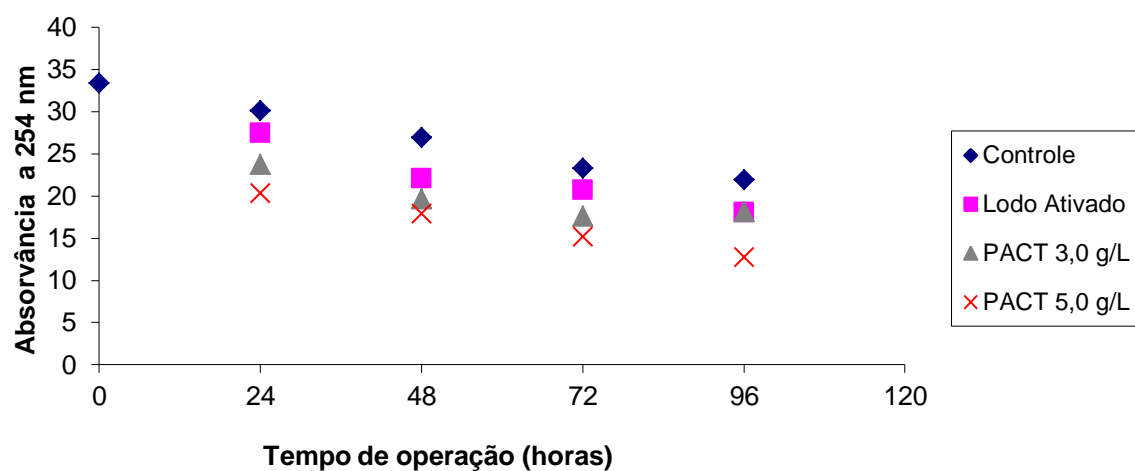


Figura 17. Monitoramento da Absorvância a 254nm do lixiviado de Gericinó. Carvão Carbomafra, sem reposição de CAP. Volume reacional = 300 mL.  $C_{\text{carvão}} = 3,0$  e  $5,0\text{g/L}$ .

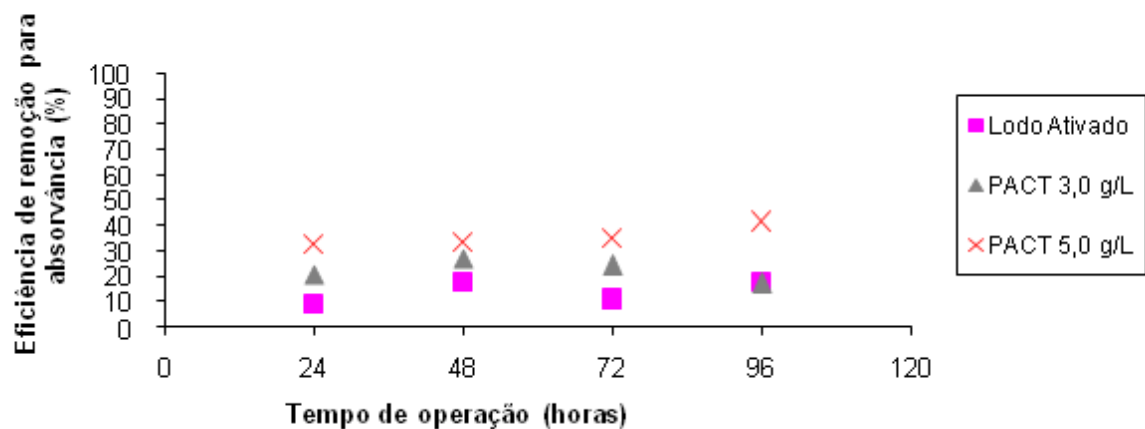


Figura 18. Eficiência de redução da Absorvância a 254nm do lixiviado de Gericinó. Carvão Carbomafra, sem reposição de CAP. Volume reacional = 300 mL.  $C_{\text{carvão}} = 3,0$  e  $5,0$  g/L

As Figuras 19 e 20 apresentam o monitoramento e as eficiências de remoção para o COT sem reposição de carvão nos sistemas controle, Lodo ativado, PACT® 3,0 g/L e PACT® 5,0 g/L para o CAP Carbomafra.

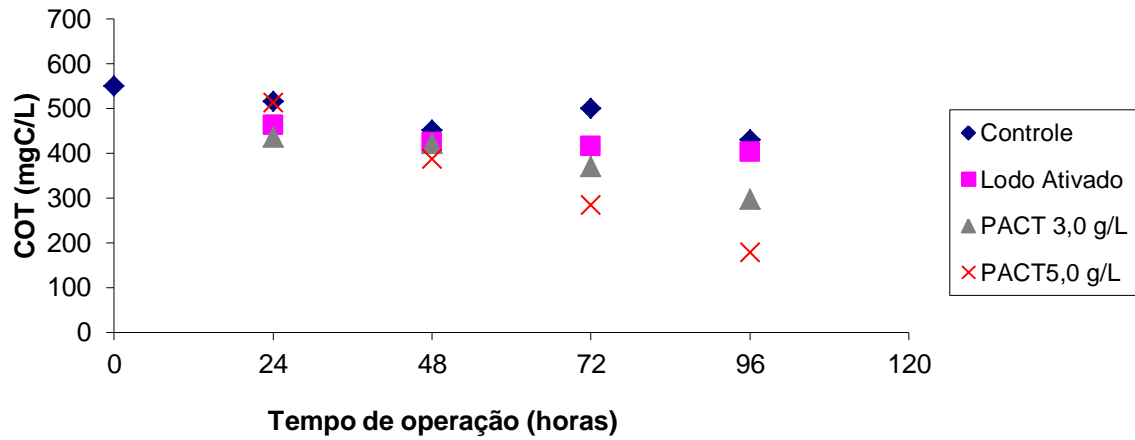


Figura 19. Monitoramento do COT do lixiviado de Gericinó. Carvão Carbomafra, sem reposição de CAP. Volume reacional = 300 mL.  $C_{\text{carvão}} = 3,0$  e  $5,0$  g/L.

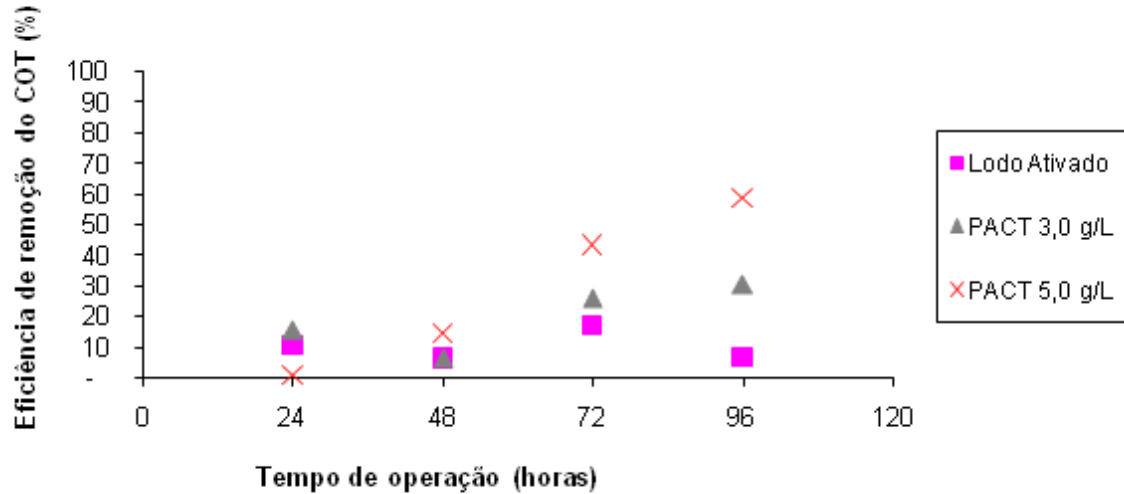


Figura 20. Eficiência de remoção do COT do lixiviado de Gericinó. Carvão Carbomafra, sem reposição de CAP. Volume reacional = 300 mL.  $C_{\text{carvão}} = 3,0$  e  $5,0$  g/L.

As Figuras 21 e 22 apresentam o monitoramento e as eficiências de remoção para a DQO sem reposição de carvão nos sistemas controle, Lodo ativado, PACT® 3,0 g/L e PACT® 5,0 g/L.

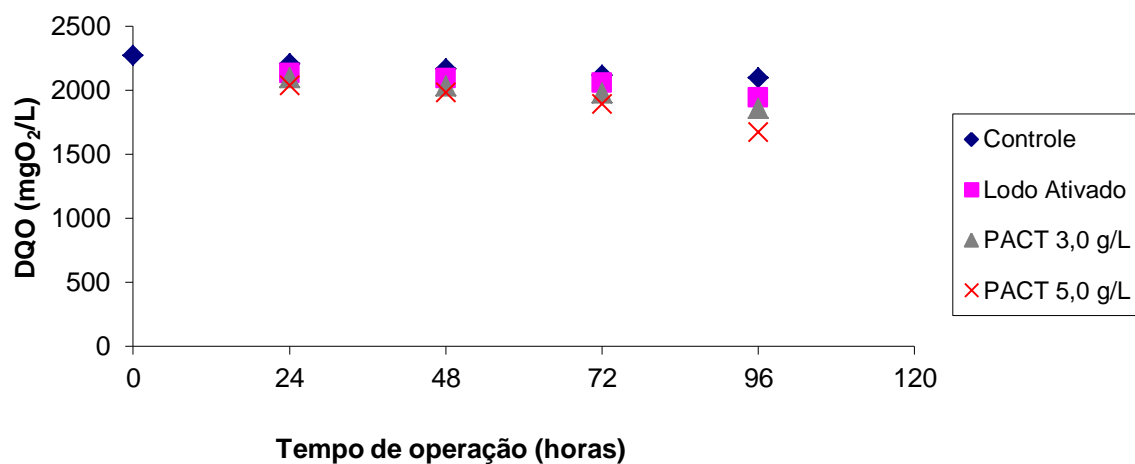


Figura 21. Monitoramento da DQO do lixiviado de Gericinó. Carvão Carbomafra, sem reposição de CAP. Volume reacional = 300 mL.  $C_{\text{carvão}} = 3,0$  e  $5,0$  g/L.



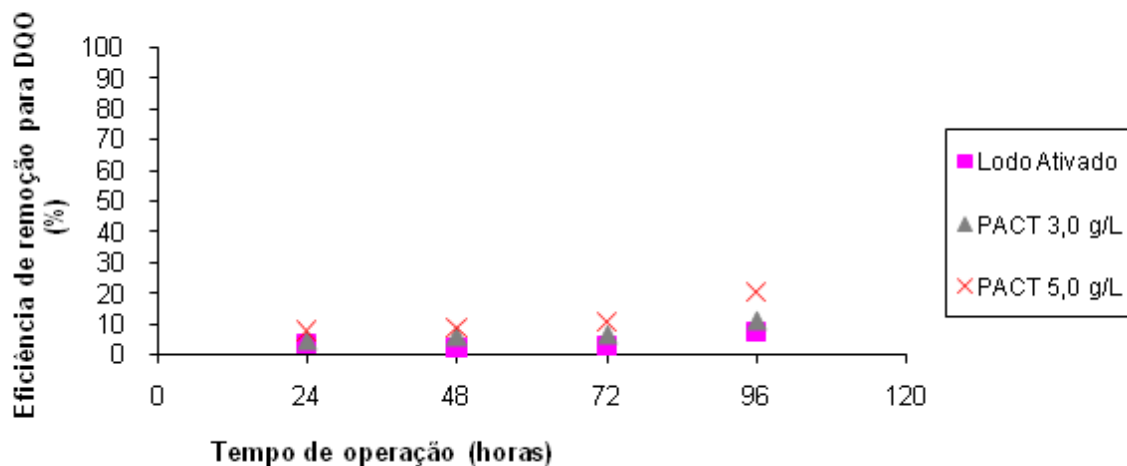


Figura 22. Eficiência de remoção da DQO do lixiviado de Gericinó. Carvão Carbomafra, sem reposição de CAP. Volume reacional = 300 mL.  $C_{\text{carvão}} = 3,0$  e  $5,0$  g/L.

Analisando os resultados do EB1, verifica-se que os processos PACT® obtiveram melhores resultados de remoção do que os apresentados pelos processos de Lodos Ativados.

Da observação das Figuras 17 e 18, percebe-se que a redução da Absorvância promovida nos sistemas PACT® foram maiores do que àquelas do sistema lodo ativado, durante os tempos de operação. Nota-se também que o processo PACT® 5,0 g/L foi o mais eficiente e que essa eficiência tendia a aumentar de acordo com o tempo de operação. Esse resultado era esperado já que, possivelmente, a maior concentração de CAP faça com que adsorção de matéria orgânica aumente, uma vez que haverá um maior número de poros disponíveis. O sistema PACT® 5,0 g/L alcançou eficiência de redução acima de 40%, enquanto que os processos Lodo Ativado e PACT® 3,0 g/L apresentaram eficiência de redução de aproximadamente 20% e essa redução apresentou um comportamento oscilante. Este comportamento pode estar associado à reposição de lixiviado em cada batelada realizada de 24 em 24 horas, que pode ter afetado a

fase de adaptação dos microrganismos aos sistemas influenciando a degradação biológica da matéria orgânica pelos mesmos.

Nos ensaios para COT e DQO, verifica-se que, assim como para a absorvância, os processos PACT® são mais eficientes para remoção do que sistema de lodo ativado. A remoção máxima de COT observada para o Lodo foi de aproximadamente 6%, enquanto o PACT® 3,0 g/L alcançou 30% e o PACT® 5,0 g/L alcançou 59%. Em relação à DQO, o Lodo Ativado promoveu redução superior a 6 % e o valor máximo alcançado com o PACT® 5 g/L foi de 20%. Percebe-se que a eficiência do Lodo Ativado, além de discreta em relação aos PACT®, também apresentou uma distribuição irregular, com quedas e aumentos de acordo com o tempo de batelada. O fato de o lixiviado apresentar altos valores de COT e DQO indica que ele tem uma grande quantidade de matéria orgânica que pode ser de origem predominantemente recalcitrante e que o lodo ativado não tem capacidade de degradar, o que explicaria os baixos valores de eficiência de remoção para o sistema convencional.

Os valores baixos de  $K_f$  e altos de  $1/n$  indicam que esse carvão, atuando sozinho, não promoveu uma boa remoção para os três parâmetros considerados. No entanto, a superioridade dos processos PACT®s sugere que o efeito sinérgico da união do CAP Carbomafra com os sistemas dos Lodos Ativados serviu para conferir uma maior estabilidade ao sistema favorecendo uma melhor remoção da matéria orgânica.

#### IV. 3. 2 – Ensaio de Biotratabilidade 2 (EB2)

As Figuras 23 e 24 apresentam os monitoramentos e as eficiências de redução para a Absorvância sem reposição de carvão nos sistemas controle, Lodo ativado, PACT® 3,0 g/L e PACT® 5,0 g/L para o CAP Norit.

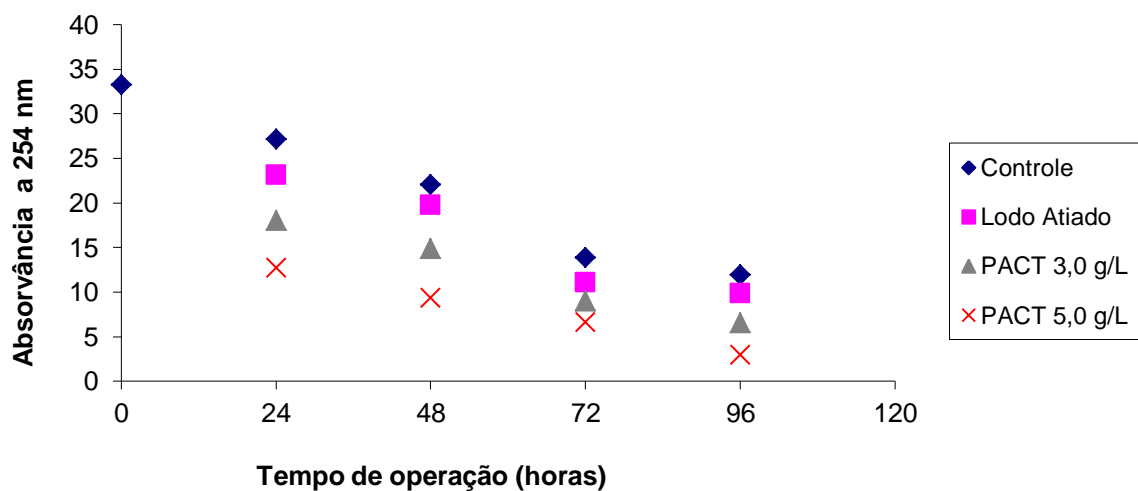


Figura 23. Monitoramento da Absorvância a 254nm do lixiviado de Gericinó. Carvão Norit, sem reposição de CAP. Volume do meio reacional = 300 mL.  $C_{\text{carvão}} = 3,0$  e  $5,0$  g/L.

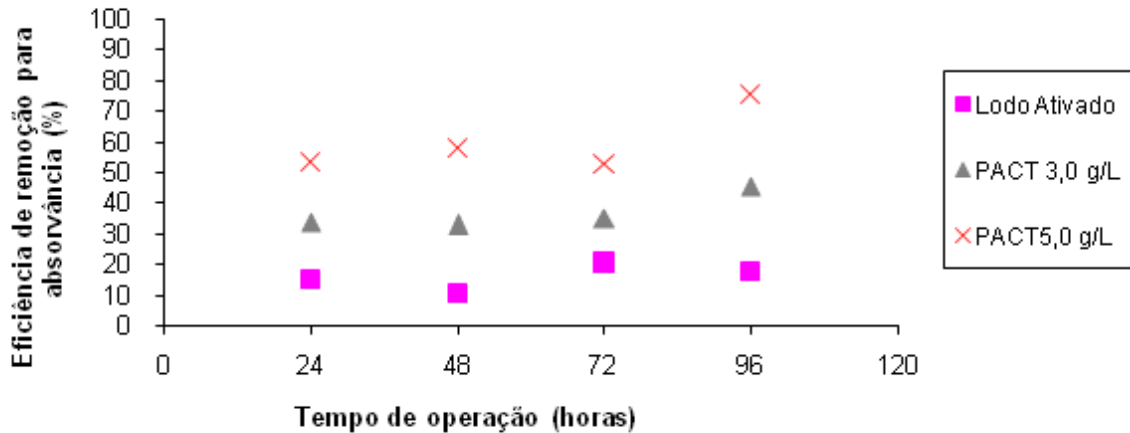


Figura 24. Eficiência de redução da Absorvância a 254nm do lixiviado de Gericinó. Carvão Norit, sem reposição de CAP. Volume reacional = 300 mL.  $C_{\text{carvão}} = 3,0$  e  $5,0$  g/L.

As Figuras 25 e 26 apresentam o monitoramento e as eficiências de remoção para o COT sem reposição de carvão nos sistemas controle, Lodo ativado, PACT® 3,0 g/L e PACT® 5,0 g/L, para o CAP Norit

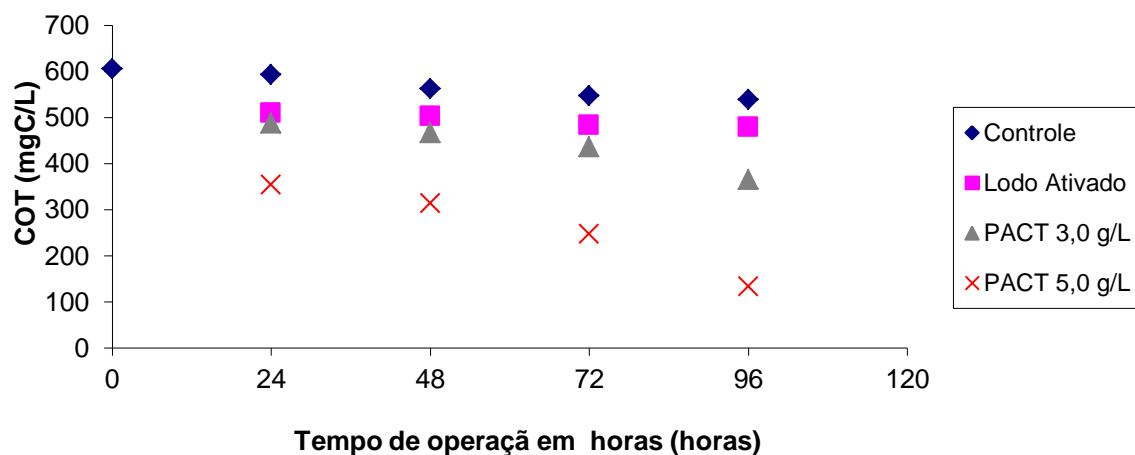


Figura 25. Monitoramento do COT do lixiviado de Gericinó. Carvão Norit, sem reposição de CAP. Volume reacional = 300 mL.  $C_{\text{carvão}} = 3,0$  e  $5,0$  g/L.

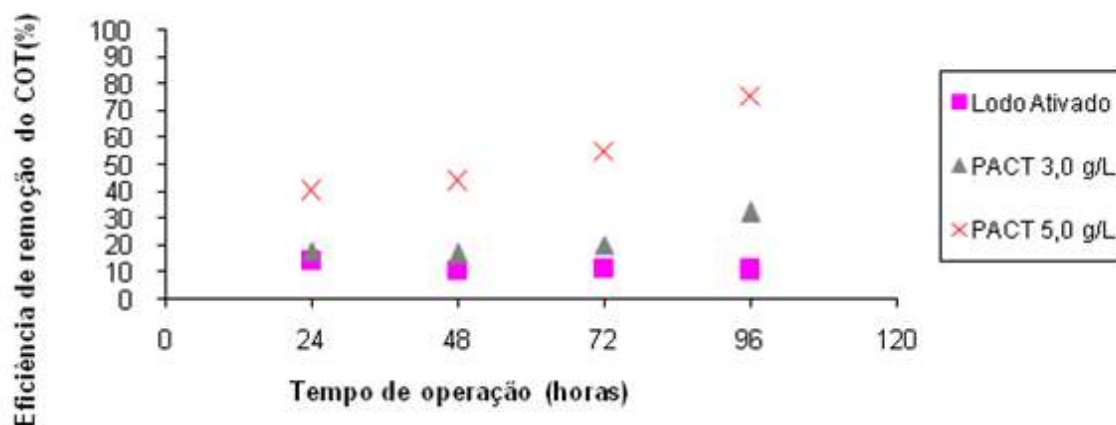


Figura 26. Eficiência de remoção do COT do lixiviado de Gericinó. Carvão Norit, sem reposição de CAP. Volume reacional = 300 mL.  $C_{\text{carvão}} = 3,0$  e  $5,0$  g/L.

As Figuras 27 e 28 apresentam o monitoramento e as eficiências de remoção para a DQO sem reposição de carvão nos sistemas controle, Lodo ativado, PACT® 3,0 g/L e PACT® 5,0 g/L.

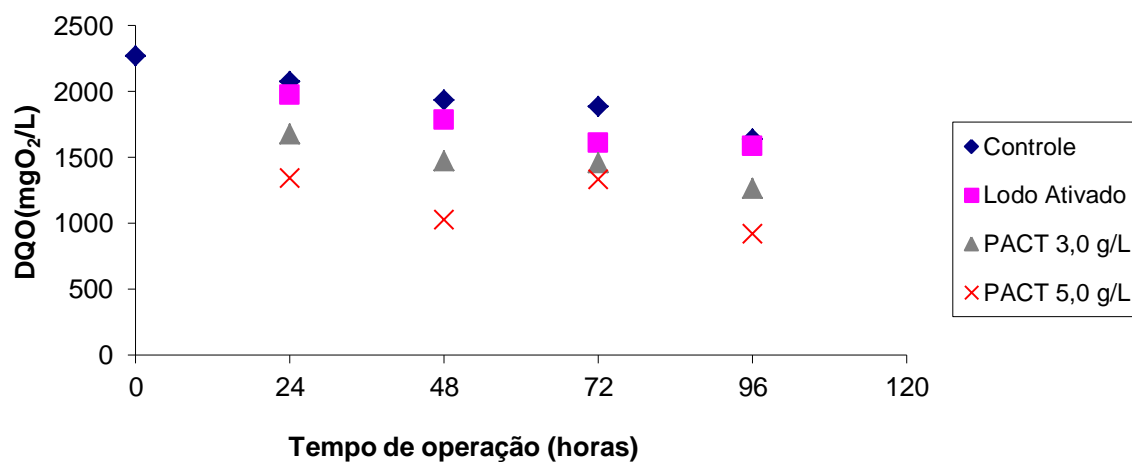


Figura 27. Monitoramento da DQO do lixiviado de Gericinó. Carvão Norit, sem reposição de CAP. Volume reacional = 300 mL.  $C_{\text{carvão}} = 3,0$  e  $5,0$  g/L.

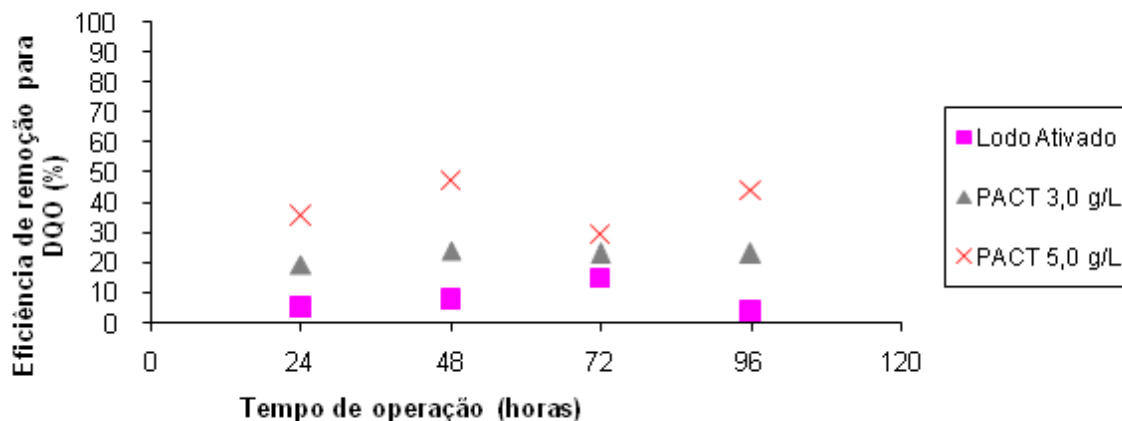


Figura 28. Eficiência de remoção da DQO do lixiviado de Gericinó. Carvão Norit, sem reposição de CAP. Volume reacional = 300 mL.  $C_{\text{carvão}} = 3,0$  e  $5,0$  g/L.

Analisando o EB2, verifica-se que os processos PACT®, novamente foram mais eficientes que o Lodo Ativado, como se pode observar pela Figura 24. A eficiência de remoção foi de 17% do Lodo Ativado e de 75% para o PACT® com 5 g CAP/L. Nesse ensaio a redução em de um sistema para o outro foi mais acentuado do que aquele verificado no EB1. Como a única diferença entre os ensaios foi o tipo de CAP, isso pode indicar que o CAP Norit é mais eficiente na remoção da matéria orgânica e conseqüente na diminuição dos valores de absorvância.

Para o COT e DQO, os resultados dos PACT®s também foram mais satisfatórios que os do Lodo Ativado. No caso do COT, a eficiência verificada usando o PACT® com 5 g/L foi de 75% enquanto à do Lodo Ativado foi de apenas 11%. A melhora na remoção foi mais acentuada do que àquela verificada no EB1. No caso da DQO, verifica-se que a remoção da matéria orgânica promovida pelo lodo ativado ficou em torno de 3% PACT®, bastante inferior à promovida pelo pelos PACT®, como podemos observar na Figura 28. Isso sugere que a adição

de CAP, especialmente de CAP Norit, ao Lodo é fundamental numa boa remoção de matéria orgânica.

Para os três parâmetros estudados, o CAP Norit apresentou melhores resultados de  $K_f$  e  $1/n$  melhores que os observados que o CAP Carbomafra. Este resultado provavelmente refletiu no suposto efeito sinérgico surgido pela combinação da oxidação biológica com a adsorção física do carvão ocorridos nos processos PACT®, onde se observou valores altos de remoção.

#### IV. 3. 3 – Ensaio de Biotratabilidade 3 (EB3)

As Figuras 29 e 30 apresentam os monitoramentos e as eficiências de redução para a Absorvância com reposição de carvão nos sistemas controle, Lodo ativado, PACT® 3,0 g/L e PACT® 5,0 g/L.

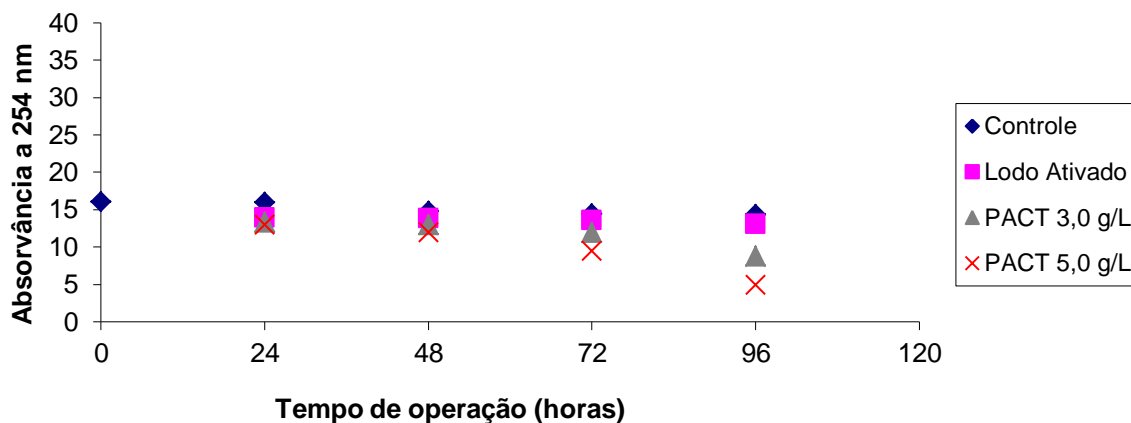


Figura 29. Monitoramento da Absorvância a 254nm do lixiviado de Gericinó. Carvão Carbomafra, com reposição de CAP. Volume do meio reacional = 300 mL.  $C_{\text{carvão}} = 3,0$  e  $5,0$  g/L. Massa de CAP repostada: 100 mg CAP/ L dia e 167 mg CAP/ L dia.

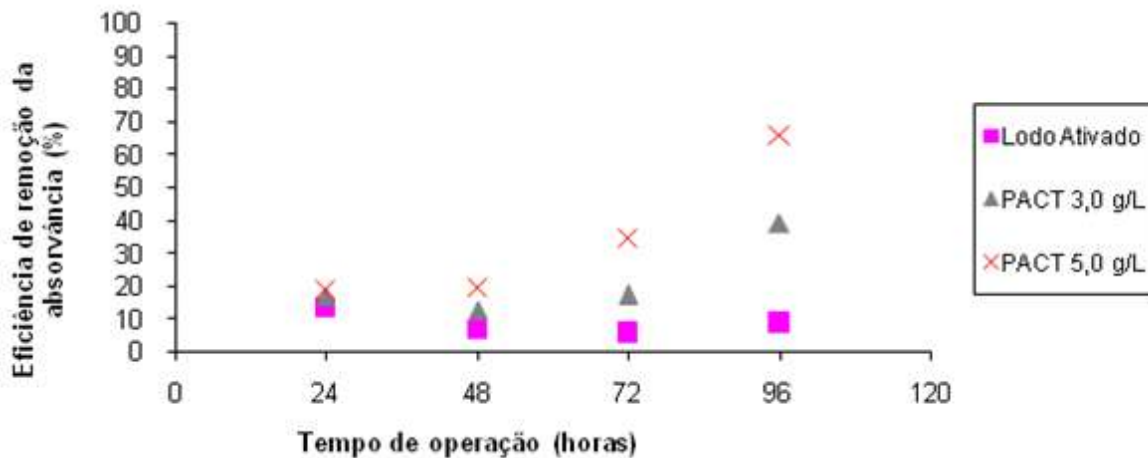


Figura 30. Eficiência de redução da Absorvância a 254nm do lixiviado de Gericinó. Carvão Carbomafra, com reposição de CAP. Volume reacional = 300 mL.  $C_{\text{carvão}} = 3,0$  e  $5,0$  g/L. Massa de CAP repostada: 100 mg CAP/ L dia e 167 mg CAP/ L dia.

As Figuras 31 e 32 apresentam o monitoramento e as eficiências de remoção para o COT com reposição de carvão nos sistemas controle, Lodo ativado, PACT® 3,0 g/L e PACT® 5,0 g/L.



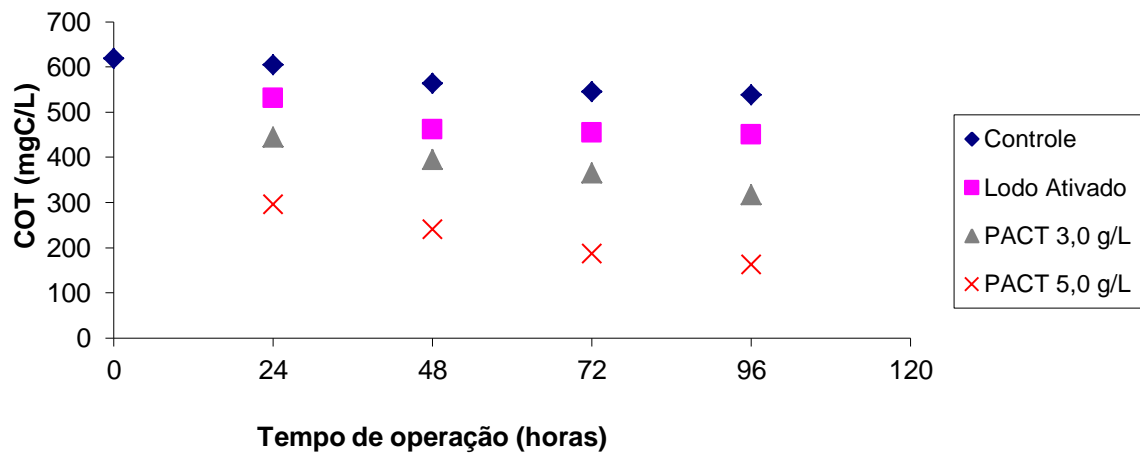


Figura 31. Monitoramento do COT do lixiviado de Gericinó. Carvão Carbomafra, com reposição de CAP. Volume reacional = 300 mL.  $C_{\text{carvão}} = 3,0$  e  $5,0\text{g/L}$ . Massa de CAP reposta: 100 mg CAP/ L dia e 167 mg CAP/ L dia.

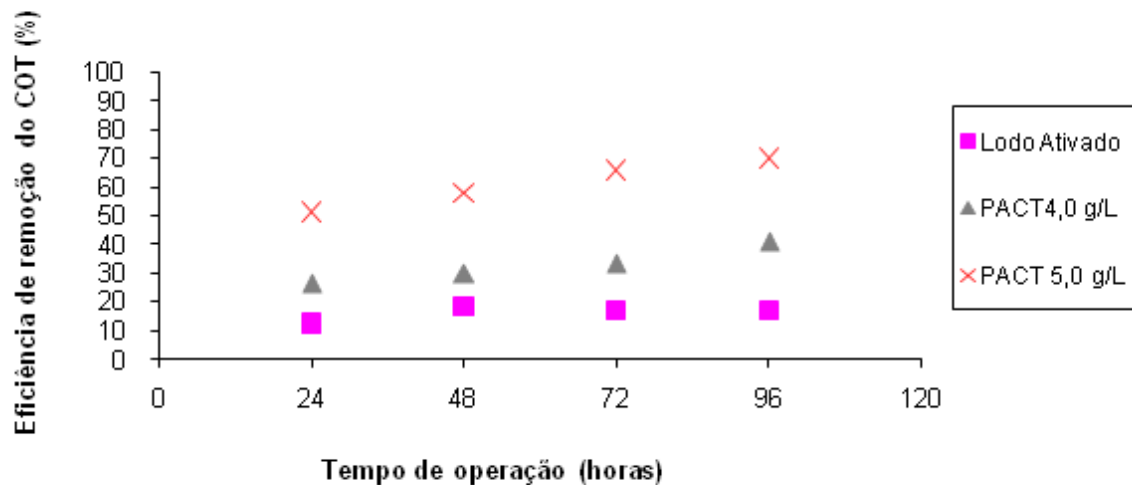


Figura 32. Eficiência de remoção do COT do lixiviado de Gericinó. Carvão Carbomafra, com reposição de CAP. Volume reacional = 300 mL.  $C_{\text{carvão}} = 3,0$  e  $5,0\text{g/L}$ . Massa de CAP reposta: 100 mg CAP/ L dia e 167 mg CAP/ L dia.

As Figuras 33 e 34 apresentam o monitoramento e as eficiências de remoção para a DQO sem reposição de carvão nos sistemas controle, Lodo ativado, PACT® 3,0 g/L e PACT® 5,0 g/L.

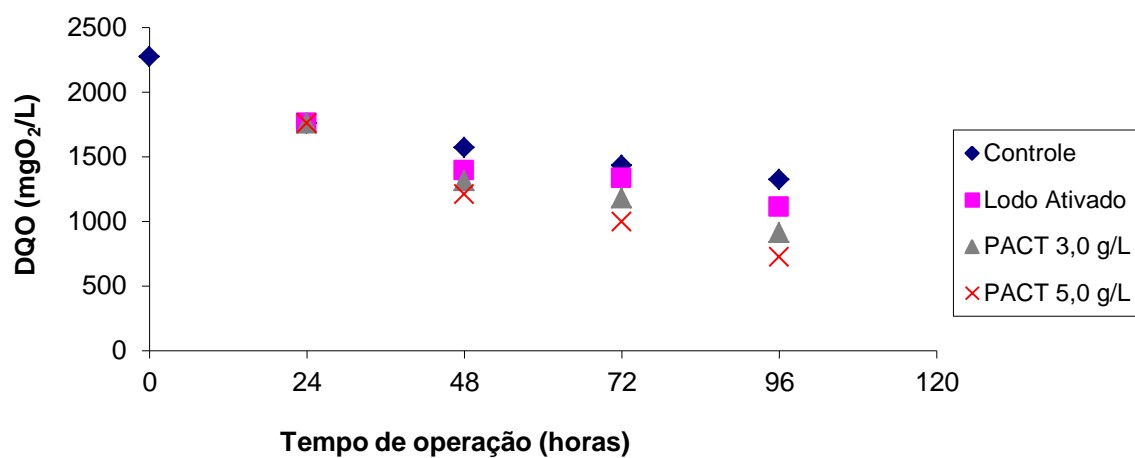


Figura 33. Monitoramento da DQO do lixiviado de Gericinó. Carvão Carbomafra, com reposição de CAP. Volume reacional = 300 mL.  $C_{\text{carvão}} = 3,0$  e  $5,0$  g/L. Massa de CAP repostada: 100 mg CAP/ L dia e 167 mg CAP/ L dia.

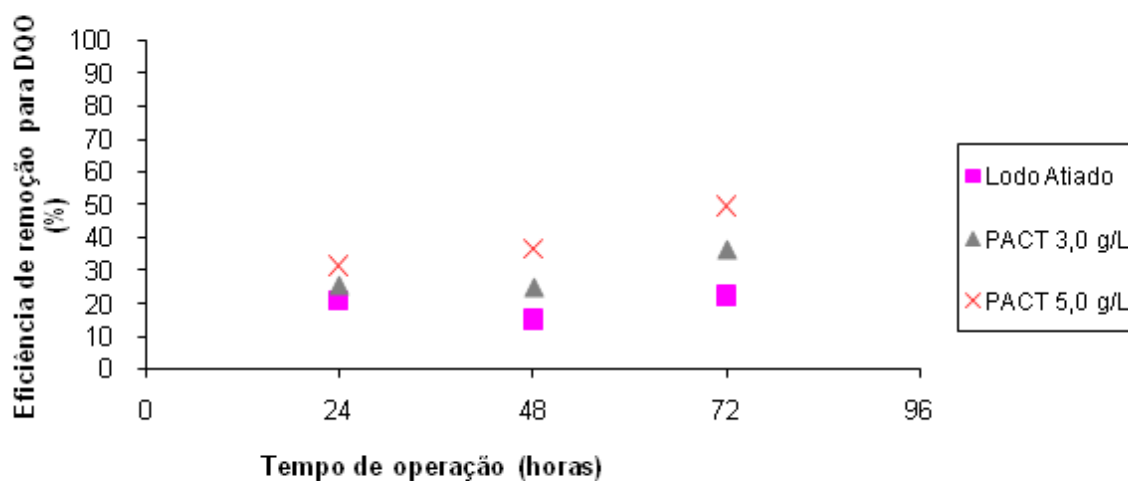


Figura 34. Eficiência de remoção da DQO do lixiviado de Gericinó. Carvão Carbomafra, com reposição de CAP. Volume reacional = 300 mL.  $C_{\text{carvão}} = 3,0$  e  $5,0$  g/L. Massa de CAP repostada: 100 mg CAP/ L dia e 167 mg CAP/ L dia.

Pela análise das Figuras 29 a 34, percebe-se que a reposição do CAP Carbomafra feita no EB3 forneceu melhores resultados que aqueles do EB1.

Da comparação das Figuras 17 e 18 do EB1 com as Figuras 29 e 30 do EB3, observa-se que os sistemas PACT® 3,0 e 5,0 g/L do segundo alcançaram, respectivamente, reduções próximas de 40 e 65 %, resultados superiores ao primeiro. Neste ensaio é possível notar mais uma vez que o aumento da concentração de CAP realizada no PACT® 5,0 g/L melhorou a eficiência de remoção de substâncias que absorvem a 254 nm.

Para os outros dois parâmetros analisados, o EB3 também se mostrou mais eficiente. No caso do COT, a eficiência aumentou para 70% (Figuras 31 e 32) e, para a DQO, a nova eficiência foi de 50% (Figuras 33 e 34).

Os resultados superiores do EB3 indicam que a adição de CAP virgem realizada na reposição serviu para aumentar as eficiências de remoção, uma vez

que as novas partículas de carvão eram adicionadas aos sistemas aumentavam a capacidade de adsorção. Já que algum carvão era perdido durante a purga do lodo, necessária para renovar a biomassa dos sistemas e manter a idade do lodo, a reposição possivelmente contribuiu também para manter as concentrações de carvão mais estáveis, o que também contribuiu para melhorar e estabilizar os efeitos sinérgicos dos processos PACT®.

#### IV. 3. 4 – Ensaio de Biotratabilidade 4 (EB4)

As Figuras 35 e 36 apresentam os monitoramentos e as eficiências de redução para a Absorvância com reposição de carvão nos sistemas controle, Lodo ativado, PACT® 3,0 g/L e PACT® 5,0 g/L.

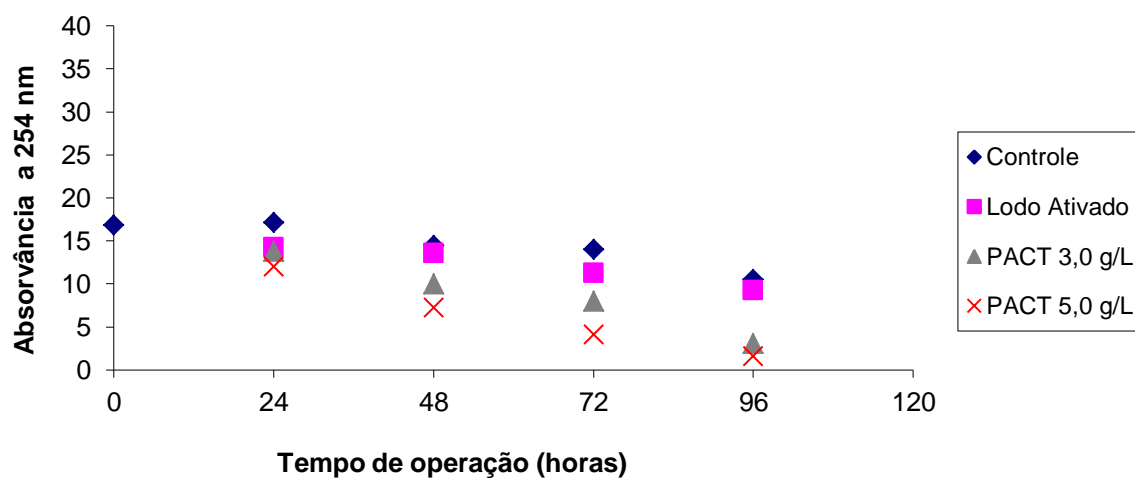


Figura 35. Monitoramento da Absorvância a 254 nm do lixiviado de Gericinó. Carvão Norit, com reposição de CAP. Volume do meio reacional = 300 mL.  $C_{\text{carvão}} = 3,0$  e  $5,0$  g/L. Massa de CAP reposta: 100 mg CAP/ L dia e 167 mg CAP/ L dia.

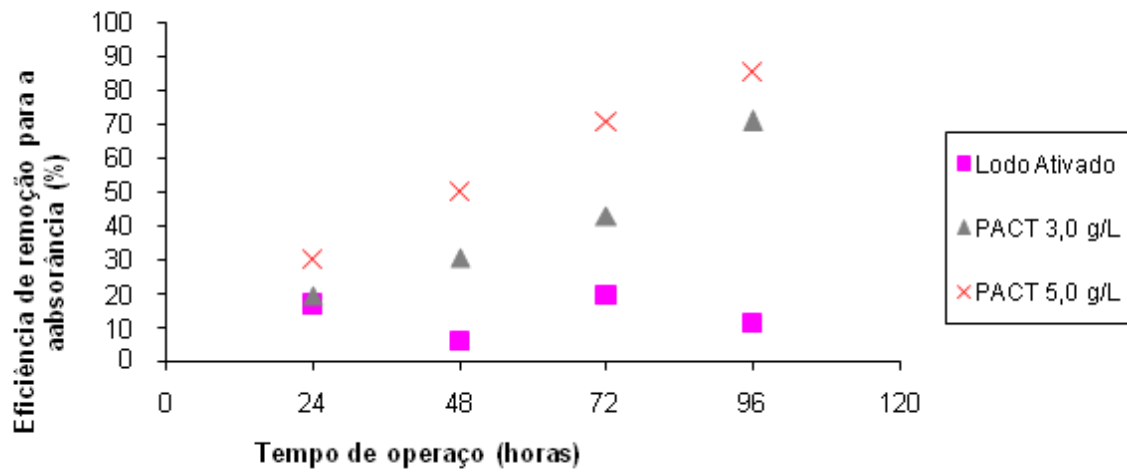


Figura 36. Eficiência de redução da Absorvância a 254 nm do lixiviado de Gericinó. Carvão Norrit, com reposição de CAP. Volume reacional = 300 mL.  $C_{\text{carvão}} = 3,0$  e  $5,0\text{g/L}$ . Massa de CAP reposta: 100 mg CAP/ L dia e 167 mg CAP/ L dia.

As Figuras 37 e 38 apresentam o monitoramento e as eficiências de remoção para o COT com reposição de carvão nos sistemas controle, Lodo ativado, PACT® 3,0 g/L e PACT® 5,0 g/L.

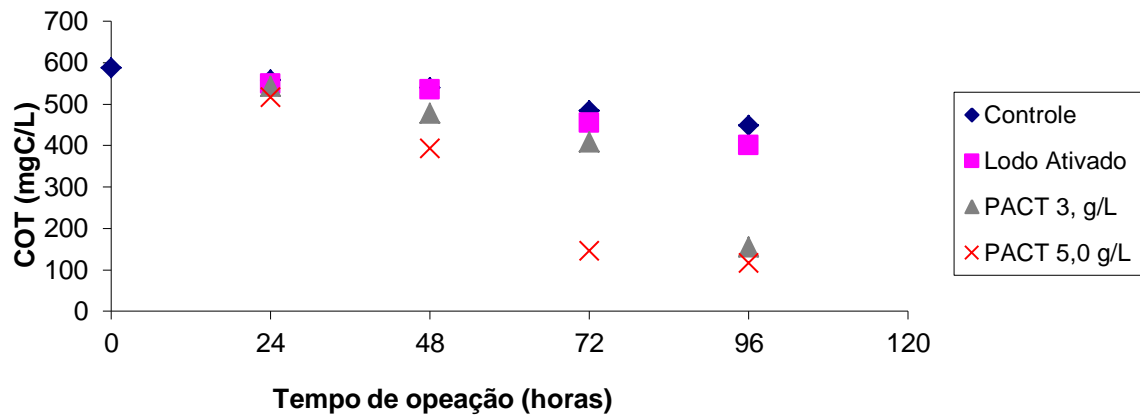


Figura 37. Monitoramento do COT do lixiviado de Gericinó. Carvão Norit, com reposição de CAP. Volume reacional = 300 mL.  $C_{\text{carvão}} = 3,0$  e  $5,0$  g/L. Massa de CAP repostada: 100 mg CAP/ L dia e 167 mg CAP/ L dia.

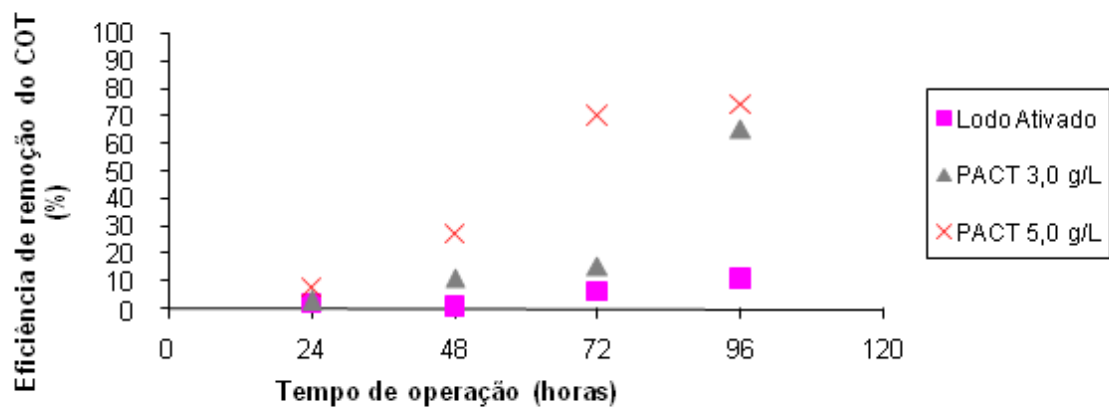


Figura 38. Eficiência de remoção para o COT do lixiviado de Gericinó. Carvão Norit, com reposição de CAP. Volume reacional = 300 mL.  $C_{\text{carvão}} = 3,0$  e  $5,0$  g/L. Massa de CAP repostada: 100 mg CAP/ L dia e 167 mg CAP/ L dia.

As Figuras 39 e 40 apresentam o monitoramento e as eficiências de remoção para a DQO com reposição de carvão nos sistemas controle, Lodo ativado, PACT® 3,0 g/L e PACT® 5,0 g/L.

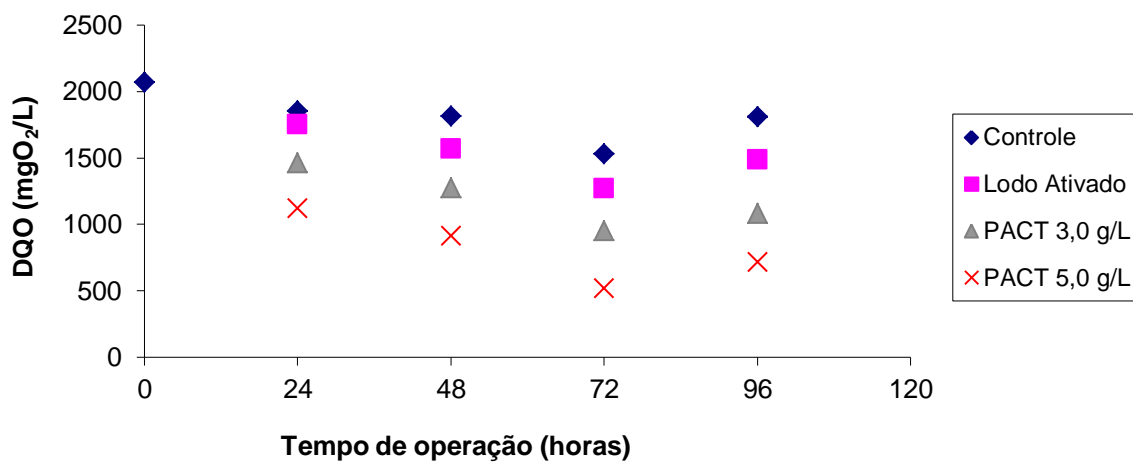


Figura 39. Monitoramento da DQO do lixiviado de Gericinó. Carvão Norit, com reposição de CAP. Volume reacional = 300 mL.  $C_{\text{carvão}} = 3,0$  e  $5,0\text{g/L}$ . Massa de CAP repostada: 100 mg CAP/ L dia e 167 mg CAP/ L dia.

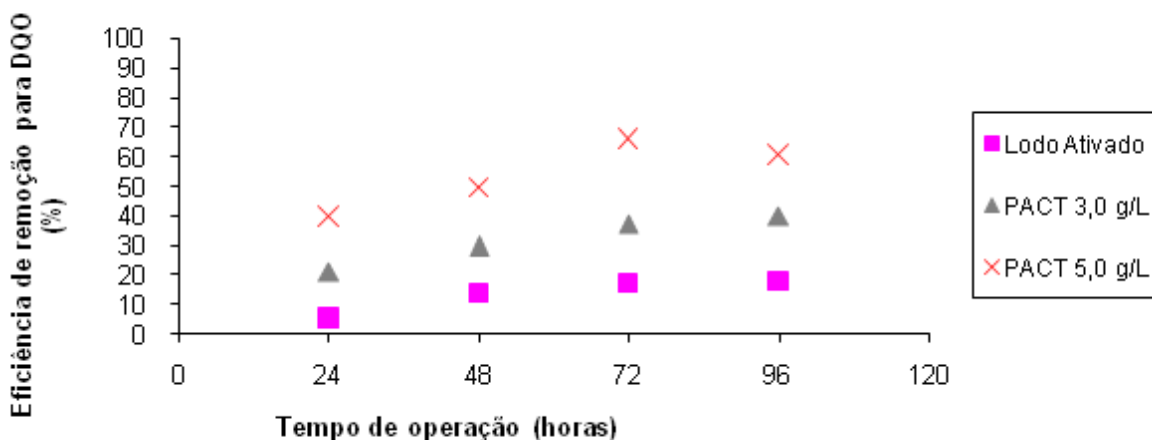


Figura 40. Eficiência de remoção da DQO a 254nm do lixiviado de Gericinó. Carvão Norit, com reposição de CAP. Volume reacional = 300 mL.  $C_{\text{carvão}} = 3,0$  e  $5,0\text{g/L}$ . Massa de CAP repostada: 100 mg CAP/ L dia e 167 mg CAP/ L dia.

Analisando o EB4, verifica-se que os processos envolvendo o a reposição do CAP Norit foram os mais eficientes dentre todos os ensaios, para os parâmetros considerados.

Para a Absorvância os processos PACT® apresentaram reduções próximas a 70% (3,0 g/L) e 85% (5,0 g/L). Estes resultados foram melhores do que os bons resultados obtidos com o CAP Norit no EB2 e também aos observados no EB3 com reposição de CAP Carbomafra. Estas altas eficiências de redução do EB4 podem indicar que a degradação biológica associada à melhor capacidade adsortiva do CAP Norit tornou-se mais eficiente com a reposição da massa de carvão após a renovação do meio. Isso sugere que o uso do CAP Norit nos processos PACT® é uma boa alternativa para aumentar os supostos efeitos sinérgicos que garantem uma melhor remoção das substâncias aromáticas que absorvem na faixa de 254 nm.



Os outros parâmetros estudados também seguiram a tendência dos ensaios anteriores, ou seja, a reposição realizada nos sistemas PACT® melhorou as eficiências observadas.

O COT no caso com reposição alcançou remoções próximas de 65 % no sistema PACT® 3,0 g/L . Este resultado foi bem superior ao observado no mesmo sistema do EB2. No caso do PACT® 5,0 g/L as remoções foram semelhantes ficando próximas a 75%. Nesse caso a reposição melhorou a eficiência de um sistema e manteve a boa eficiência do outro, indicando a massa de carvão reposta pode aumentar e estabilizar o processo de remoção da matéria orgânica.

O EB4 também mostrou melhoras para a DQO, em relação ao EB2. A remoção, nesse caso, aumentou para ambos os sistemas chegando a 45% para o PACT® 3,0 g/L e 60% para o PACT 5,0 g/L.

## Capítulo V – CONCLUSÕES E SUGESTÕES

### V. 1 – Conclusões

Abaixo se encontram listadas as conclusões do presente trabalho:

1. Dentre as três marcas de CAP utilizadas na etapa preliminar de ensaios de isotermas de adsorção, o Norit de origem betuminosa apresentou melhor desempenho seguido pelo CAP Carbomafra de origem vegetal. Portanto conclui-se que o CAP Norit possui uma capacidade de remoção de matéria orgânica muito mais efetiva do que os CAP Brasilac e Carbomafra.
2. Quando introduzidos nos sistemas de lodos ativados para simular o processo PACT®, Os CAP Norit e Carbomafra agregaram uma eficiência maior de remoção da matéria orgânica. Estes resultados puderam ser observados através das análises de Absorvância em 254nm, COT e DQO. A eficiência obtida pela adição de CAP não se deve somente a remoção de matéria orgânica por adsorção, mas também através da estabilidade que o CAP proporciona ao sistema em condições adversas (Variação da vazão de alimentação, lixiviado com altas cargas de fenóis e compostos recalcitrantes, etc.)
3. Entre os processos PACT, observa-se que o de maior concentração (5,0 g/L) teve eficiências de remoção maiores do que o PACT ® 3,0 g/L. Isso indica que o aumento da concentração de CAP no sistema de Lodos ativados agrega maior estabilidade ao processo, porque promove uma

remoção maior da matéria orgânica recalcitrante responsável por aumentar a toxicidade do lixiviado.

## V. 2 – Sugestões

Como sugestão para o aperfeiçoamento deste trabalho, recomenda-se a realização das análises de nitrogênio amoniacal para a verificação da capacidade de remoção de matéria nitrogenada pelo processo PACT® e suas vantagens frente ao processo convencional de Lodos ativados.

Recomenda-se também um estudo de viabilidade econômica do processo PACT e os custos para sua implementação. Este estudo é imprescindível para uma avaliação dos gastos de uma empresa ou do governo com o tratamento de lixiviado para adequá-lo as normas ambientais de descarte.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, J. F., “Desenvolvimento, modelagem e controle de uma planta de lodos ativados para tratamento de efluentes e contendo Fenol”; Tese de mestrado; Universidade Federal de Uberlândia, MG; 2004.

APHA / AWWA / WEF: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 21th. Ed. USA, APHA, 2005.

ATKINS, P. W; De Paula, J. Físico – Química. Editora LTC, 7º Edição, 2005.

BORNHARDT, C., DREWES, J. E., JEKEL, M. Removal of Organic Halogens (AOX) from Municipal Wastewater by Powdered Activated Carbon (PAC)/ Activated Sludge (AS) Treatment, Water Science & Technology, v. 35, n. 10, 1997.

BRASIL, 2005. C.P. Brandão, CCS. Avaliação da remoção de microcistina em águas de abastecimento público por diferentes carvões ativados em pó produzidos no Brasil. Im: 23º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, Anais. Campo Grande; ABES-2005.

CASTELLAN, G. Fundamentos de físico-química. Editora LTC, 1º Edição, 1986.

ÇEÇEN, F. Activated Carbon Adition to activated Sludge in the Treatment of Kraft Pulp Bleaching Wastes, Water Science & Technology, v. 30, n. 3, 1994.

CHEREMISINOFF, P.N., ELLERBUSCH, F. Carbon Adsorption Handbook. Ann Arbor Science 1 Ed, 1978.

CHIRSTENSEN, T.H., KLELDSEN, P., BJERG, P.L., JENSEN, D.L., CHRISTENSEN, J.B., BAUM, A., ALBRECHTSEN, H.J. e HERON, G. *Biogeochemistry of Landfill Leachate Plumes*. Applied Chemistry 16: 659-718, 2001.

CIOLA, R.; Fundamentos da Catálise. Editora da USP: Moderna 1, p. 377, 1981.

CLAUDINO, 2000. CLAUDINO, A.; MINOZZO, A. P.; Projeto de uma Indústria de Carvão Ativado. Trabalho Referente à Disciplina de Projetos, Universidade Estadual do Oeste do Paraná.

COMPANHIA DE LIMPEZA URBANA DO RIO DE JANEIRO (COMLURB). Ampliação do Centro de Tratamento de Resíduos de Gericinó-RJ, Abril, 2009.

COSTA, F.C, et al., M. Aplicação de Carvão Ativado em Pó (CAP) ao Processo Biológico de Tratamento de um Efluente da Indústria Química. Engenharia Sanitária e Ambiental, 2003.

Di Bernardo, L.; Mendes, C.G.N.; Brandão, C.C.S.; et al. Tratamento de águas para abastecimento por filtração direta. São Carlos: ABES/PROSAB – Programa de Pesquisa em Saneamento Básico 3, 2003.

EATON, A. D; CLESCERI, I. S; GREENBERG, A. E. Standard methods for examination of water & wastewater. 21<sup>st</sup> Edition. American public health association, 2005.

ECKENFELDER, W. W. J. Industrial Water Pollution Control, Third Edition, The McGraw-Hill Series in Water Resources and Environmental Engineering, 1999.

ECKENFELDER, W. W. J. Industrial Water Pollution Control, Third Edition, *The McGraw-Hill Series in Water Resources and Environmental Engineering*, 2000

FOO, K.Y.; HAMEED, B.H. An overview of landfill leachate treatment via activated carbon adsorption process. *The Journal of Hazardous Materials*. Disponível online em 12/11/2012 <[doi:10.1016/j.jhazmat.2009.06.038](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.06.038)> (2012)

JORDÃO & PESSÔA, 1995. JORDÃO, E. P.; PESSÔA, C. A.; Tratamento de Esgotos Domésticos. 3<sup>o</sup> ed., Rio de Janeiro: ABES, 1995.

MACEDO, J. A. B. Águas & águas. CRQ-MG, 3<sup>o</sup> edição, 2007.

MAIA, L. S. Uso de carvão ativado em pó no tratamento biológico de lixiviado de aterro de resíduos. Dissertação de mestrado. UFRJ, 2012.

MANNARINO, C.F. Uso de Wetland Sub-Superficial no Tratamento de Efluente de Estação de Tratamento de Chorume Por Lodos Ativados. xiv, 87 p. 29,7 cm.

Dissertação de Mestrado - Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ (2003).

MASEL, R. I. Principles of adsorption and reaction on solid surfaces. A volume in the wiley series in chemical engineering, A Wiley-interscience publication, 1996.

MEIDL, 1997. J. A. Meidl. U.S. Filter/ Zimpro, Rothschild, USA. Responding to changing conditions: How powered activated carbon system can provide the operational flexibility necessary to treat contaminated groundwater and industrial wastes. Pergamon. Elsevier. Vol. 35, Nº 9, 1997.

METCALF, L; EDDY, H. Wastewater engineering: treatment disposal reuse. Revisão de George Tchobanoglous e Franklin Burton. 3.ed. New York: McGraw-Hill, 1991.

MORAVIA, W.G. Avaliação Do Tratamento de Lixiviado de Aterro Sanitário Através de Processo Oxidativo Avançado Conjugado Com Sistema de Separação Por Membranas. Tese de pós-graduação. UFMG, 2010.

MÜLLER, 2009. Adsorção em carvão ativado em pó para remoção de microcistina de água de abastecimento público. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 14 n.1/ jan/março 2009.

QUINTAES, B.R. (2013). Centro de Pesquisas da COMLURB. Comunicação Pessoal.

RHYNER, C. R; SCHWARTZ, L. J; WENGER, R. B; KOHRELL, M. G. Waste Management and Resource Recovery. Lewis Publishers, CRC Press, 1995.

SANT'ANNA JR, G. L. Tratamento biológico de efluentes: Fundamentos e aplicações. Editora Interciência. Rio de Janeiro, 2010.

SAWYER, C.N; MCCARTY, P.L; PARKING, G.F. Chemistry for environmental engineering. McGraw-Hill, Inc. Fourth Edition. 1994.

SHER, M. I., ARBUCKLE, W. B., SHEN, Z., 2000. Oxygen Uptake Rate Inhibition with PACTTM Sludge. Journal of Hazardous Materials, v.B73, 2000.

SILVA, A.C.. Tratamento do percolado de aterro sanitário e avaliação da toxicidade do efluente bruto tratado. Dissertação de Mestrado, Programa de Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil (2002).

URASE, T., SALEQUZZAMAN, M., KOBAYASHI, S., MATSUO, K.Y.T e SUZUKI, N. *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. Vol. 36, 1997.

VON SPERLING. LODOS ATIVADOS. Princípios do Tratamento Biológico de Águas residuárias. 1996.

WEINER, E. R. Application of Environment Aquatic Chemistry - A Practical Guide; CRC Press, 2008.





**ANEXO 1 – Resultados experimentais dos ensaios de adsorção de CAP com lixiviado bruto de Gericinó para construção de isotermas.**

Tabela 10 – Resultados das análises de Absorvância do lixiviado de Gericinó com carvão Brasilac.

Tempo de equilíbrio	Dosagem do carvão	Abs1	Abs2	Diluição	Valor 1	Valor 2
2h	Controle	0,265	0,2639	50	13,25	13,195
	0,1 g/L	0,2524	0,2516	50	12,62	12,58
	0,4 g/L	0,2417	0,2408	50	12,085	12,04
	0,7 g/L	0,231	0,231	50	11,55	11,55
	1,0 g/L	0,206	0,2068	50	10,3	10,34
	3,0 g/L	0,1993	0,1987	50	9,965	9,935
	5,0 g/L	0,1797	0,1788	50	8,985	8,94
24h	Controle	0,2488	0,2502	50	12,44	12,51
	0,1 g/L	0,2402	0,241	50	12,01	12,05
	0,4 g/L	0,2288	0,2297	50	11,44	11,485
	0,7 g/L	0,2202	0,2208	50	11,01	11,04
	1,0 g/L	0,1902	0,1908	50	9,51	9,54
	3,0 g/L	0,162	0,1628	50	8,1	8,14
	5,0 g/L	0,1514	0,1523	50	7,57	7,615

Tabela 11 – Resultados das análises de COT do lixiviado de Gericinó com carvão Brasilac.

Tempo de equilíbrio	Ensaio	Valor final de TOC
2h	Controle	851,2
	0,1 g/L	825,2
	0,4 g/L	791,4
	0,7 g/L	757,2
	1,0 g/L	754,6
	3,0 g/L	625,8
	5,0 g/L	489,6
24h	Controle	724,8
	0,1 g/L	724,4
	0,4 g/L	675,8
	0,7 g/L	614,6
	1,0 g/L	629
	3,0 g/L	458,2
	5,0 g/L	355,2

Tabela 12 – Resultados das análises de DQO do lixiviado de Gericinó com carvão Brasilac.

Tempo de equilíbrio	Ensaio	DQO 1	DQO 2	DQO 3	Diluição	Valor 1	Valor 2	Valor 3
2h	<b>Controle</b>	371	368	366	5	1855	1840	1830
	<b>0,1 g/L</b>	337	338	361	5	1685	1690	1805
	<b>0,4 g/L</b>	306	300	312	5	1530	1500	1560
	<b>0,7 g/L</b>	292	288	291	5	1460	1440	1455
	<b>1,0 g/L</b>	258	262	266	5	1290	1310	1330
	<b>3,0 g/L</b>	262	249	268	5	1310	1245	1340
	<b>5,0 g/L</b>	302	232	243	5	1510	1160	1215
24h	<b>Controle</b>	327	330	336	5	1635	1650	1680
	<b>0,1 g/L</b>	320	324	317	5	1600	1620	1585
	<b>0,4 g/L</b>	279	283	283	5	1395	1415	1415
	<b>0,7 g/L</b>	266	259	264	5	1330	1295	1320
	<b>1,0 g/L</b>	242	240	238	5	1210	1200	1190
	<b>3,0 g/L</b>	227	224	215	5	1135	1120	1075
	<b>5,0 g/L</b>	199	201	201	5	995	1005	1005

Tabela 13 – Resultados das análises de Absorvância do lixiviado de Gericinó com carvão Carbomafra.

Tempo de equilíbrio	Dosagem Carbomafra	Abs1 (mg/L)	Abs2 (mg/L)	Diluição	Valor 1 (mg/L)	Valor 2 (mg/L)
2h	<b>Controle</b>	0,2909	0,2919	50	14,545	14,595
	<b>0,1 g/L</b>	0,2753	0,2764	50	13,765	13,82
	<b>0,4 g/L</b>	0,2719	0,2727	50	13,595	13,635
	<b>0,7 g/L</b>	0,244	0,2448	50	12,2	12,24
	<b>1,0 g/L</b>	0,2202	0,2212	50	11,01	11,06
	<b>3,0 g/L</b>	0,1642	0,1655	50	8,21	8,275
	<b>5,0 g/L</b>	0,1106	0,1119	50	5,53	5,595
24h	<b>Controle</b>	0,2909	0,2919	50	12,805	12,855
	<b>0,1 g/L</b>	0,2753	0,2764	50	11,445	11,48
	<b>0,4 g/L</b>	0,2719	0,2727	50	10,72	10,755
	<b>0,7 g/L</b>	0,244	0,2448	50	9,8	9,85
	<b>1,0 g/L</b>	0,2202	0,2212	50	7,75	8,35
	<b>3,0 g/L</b>	0,1642	0,1655	50	6,535	6,555
	<b>5,0 g/L</b>	0,1106	0,1119	50	4,27	4,31

Tabela 14 – Resultados das análises de COT do lixiviado de Gericinó com carvão Carbomafra.

Tempo de equilíbrio	Dosagem Carbomafra	Valor final de TOC (mg/L)
2h	Controle	718
	0,1 g/L	642,8
	0,4 g/L	635,8
	0,7 g/L	608,2
	1,0 g/L	584,2
	3,0 g/L	559,6
	5,0 g/L	483,4
24h	Controle	459,8
	0,1 g/L	448,8
	0,4 g/L	414,4
	0,7 g/L	413,2
	1,0 g/L	374
	3,0 g/L	369
	5,0 g/L	315

Tabela 15 – Resultados das análises de DQO do lixiviado de Gericinó com carvão Carbomafra.

Tempo de equilíbrio	Dosagem Carbomafra	DQO 1 (mg/L)	DQO 2 (mg/L)	DQO 3 (mg/L)	Diluição	Valor 1 (mg/L)	Valor 2 (mg/L)	Valor 3 (mg/L)
2h	<b>Controle</b>	298	298	339	5	1490	1490	1695
	<b>0,1 g/L</b>	297	300	298	5	1485	1500	1490
	<b>0,4 g/L</b>	300	306	309	5	1500	1530	1545
	<b>0,7 g/L</b>	286	288	284	5	1430	1440	1420
	<b>1,0 g/L</b>	256	266	253	5	1280	1330	1265
	<b>3,0 g/L</b>	206	209	212	5	1030	1045	1060
	<b>5,0 g/L</b>	168	167	172	5	840	835	860
24h	<b>Controle</b>	280	264	276	5	1400	1320	1380
	<b>0,1 g/L</b>	259	260	257	5	1295	1300	1285
	<b>0,4 g/L</b>	235	241	248	5	1175	1205	1240
	<b>0,7 g/L</b>	218	220	227	5	1090	1100	1135
	<b>1,0 g/L</b>	180	185	177	5	900	925	885
	<b>3,0 g/L</b>	145	140	140	5	725	700	700
	<b>5,0 g/L</b>	87	98	93	5	435	490	465

Tabela 16 – Resultados das análises de Absorvância do lixiviado de Gericinó com carvão Norit

Tempo de equilíbrio	Dosagem do carvão	Abs1	Abs2	Diluição	Valor 1	Valor 2
2h	<b>Controle</b>	0,293	0,294	50	14,65	14,7
	<b>0,1 g/L</b>	0,2833	0,2849	50	14,165	14,245
	<b>0,4 g/L</b>	0,2668	0,2676	50	13,34	13,38
	<b>0,7 g/L</b>	0,2669	0,2671	50	13,345	13,355
	<b>1,0 g/L</b>	0,2531	0,2547	50	12,655	12,735
	<b>3,0 g/L</b>	0,2234	0,2242	50	9,67	9,71
	<b>5,0 g/L</b>	0,1934	0,1942	50	6,345	6,395
24h	<b>Controle</b>	0,2547	0,2555	50	12,735	12,775
	<b>0,1 g/L</b>	0,2266	0,228	50	11,33	11,4
	<b>0,4 g/L</b>	0,192	0,2	50	9,6	10
	<b>0,7 g/L</b>	0,16	0,172	50	8	8,6
	<b>1,0 g/L</b>	0,111	0,125	50	5,55	6,25
	<b>3,0 g/L</b>	0,0617	0,0623	50	3,085	3,115
	<b>5,0 g/L</b>	0,0205	0,031	50	1,025	1,55



Tabela 17 – Resultados das análises de COT do lixiviado de Gericinó com carvão Norit.

Tempo de equilíbrio	Ensaio	Valor final de TOC
2h	Controle	728
	0,1 g/L	675
	0,4 g/L	609
	0,7 g/L	515,6
	1,0 g/L	489,7
	3,0 g/L	412,8
	5,0 g/L	359,6
24h	Controle	683
	0,1 g/L	611,1
	0,4 g/L	563,2
	0,7 g/L	477,4
	1,0 g/L	396,5
	3,0 g/L	328,2
	5,0 g/L	211

Tabela 18 – Resultados das análises de DQO do lixiviado de Gericinó com carvão Norit

Tempo de equilíbrio	Ensaio	DQO 1	DQO 2	DQO 3	Diluição	Valor 1	Valor 2	Valor 3
2h	<b>Controle</b>	294	290	295	5	1470	1450	1475
	<b>0,1 g/L</b>	256	259	262	5	1280	1295	1310
	<b>0,4 g/L</b>	244	240	242	5	1220	1200	1210
	<b>0,7 g/L</b>	232	236	233	5	1160	1180	1165
	<b>1,0 g/L</b>	216	230	223	5	1080	1150	1115
	<b>3,0 g/L</b>	178	171	170	5	890	855	850
	<b>5,0 g/L</b>	133	136	142	5	665	680	710
24h	<b>Controle</b>	276	271	273	5	1380	1355	1365
	<b>0,1 g/L</b>	239	242	246	5	1195	1210	1230
	<b>0,4 g/L</b>	209	206	196	5	1045	1030	980
	<b>0,7 g/L</b>	177	185	182	5	885	925	910
	<b>1,0 g/L</b>	146	154	152	5	730	770	760
	<b>3,0 g/L</b>	103	108	98	5	515	540	490
	<b>5,0 g/L</b>	40	45	53	5	200	225	265

**ANEXO 2 – Linearização das isotermas de absorvância de CAP em equilíbrio com lixiviado bruto de Gericinó relativas à etapa de obtenção dos parâmetros da isoterma de Freundlich para a escolha do carvão ativado a ser utilizado na etapa de biotratabilidade.**

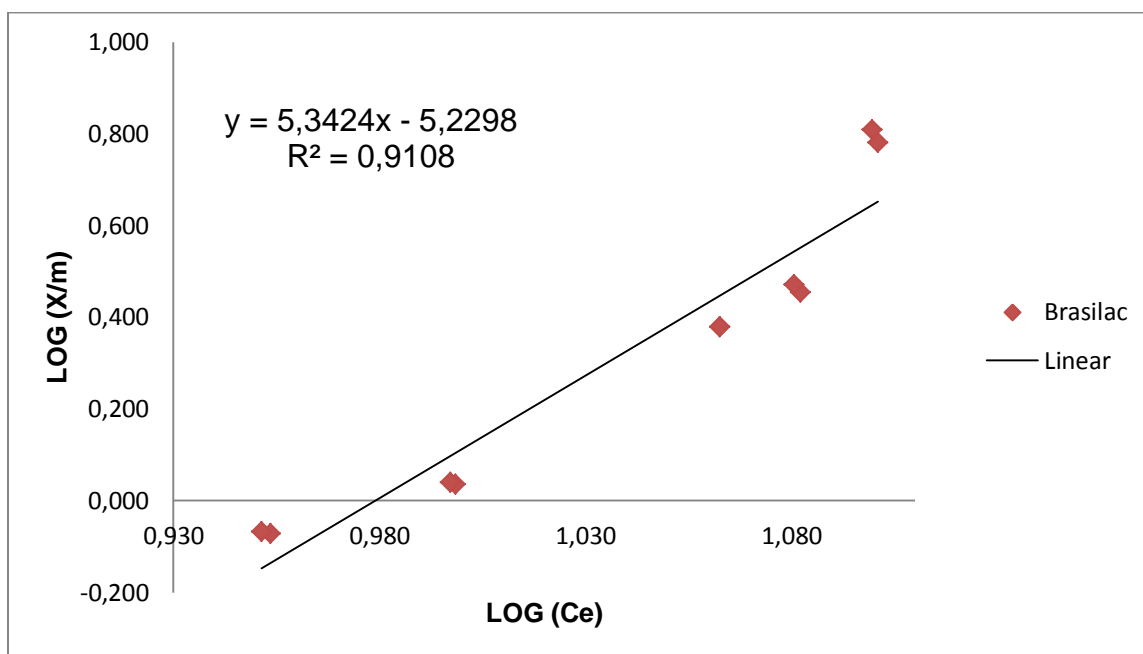


Figura 41. Linearização da isoterma de absorvância para o carvão Brasilac em equilíbrio com lixiviado bruto de Gericinó. Tempo de equilíbrio = 2 horas. Temperatura = 25°C. Volume = 100 mL

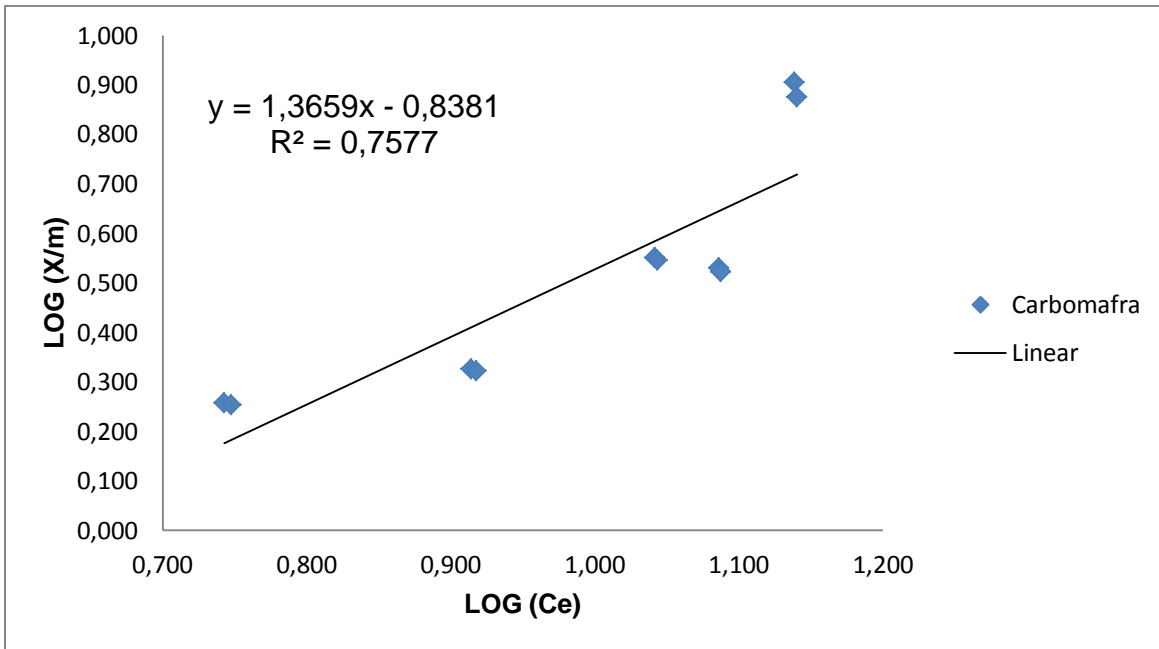


Figura 42. Linearização da isoterma de absorvância para o carvão Carboxyma. Tempo de equilíbrio = 2 horas. Temperatura = 25°C. Volume = 100 mL

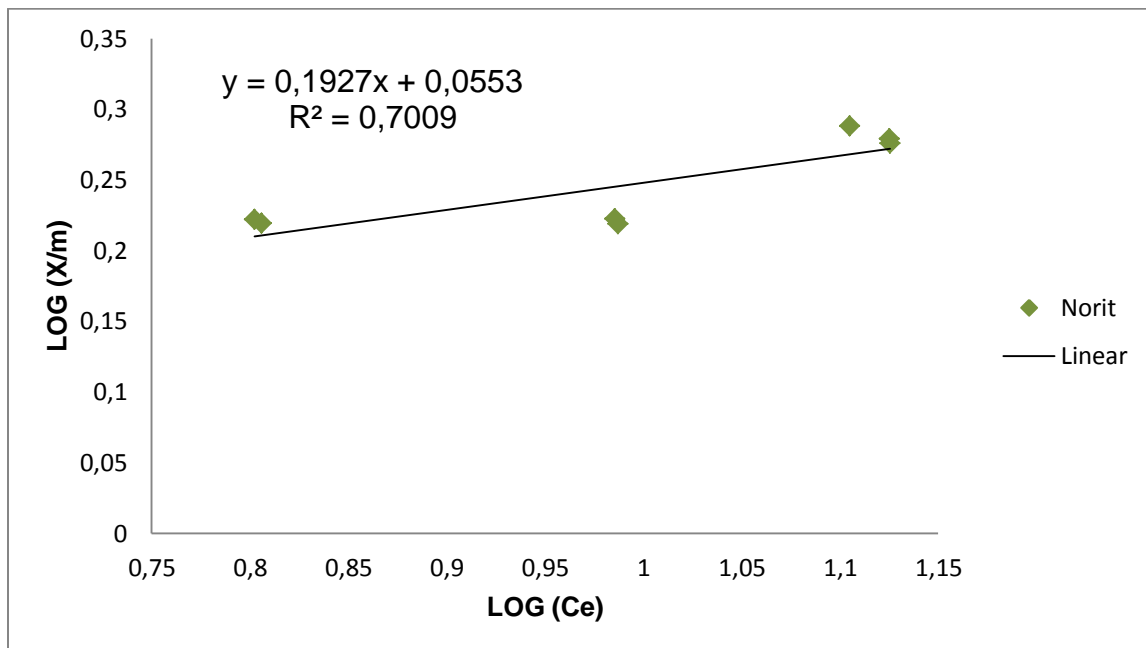


Figura 43. Linearização da isoterma de absorvância para o carvão Norit. Tempo de equilíbrio = 2 horas. Temperatura = 25°C. Volume = 100 mL

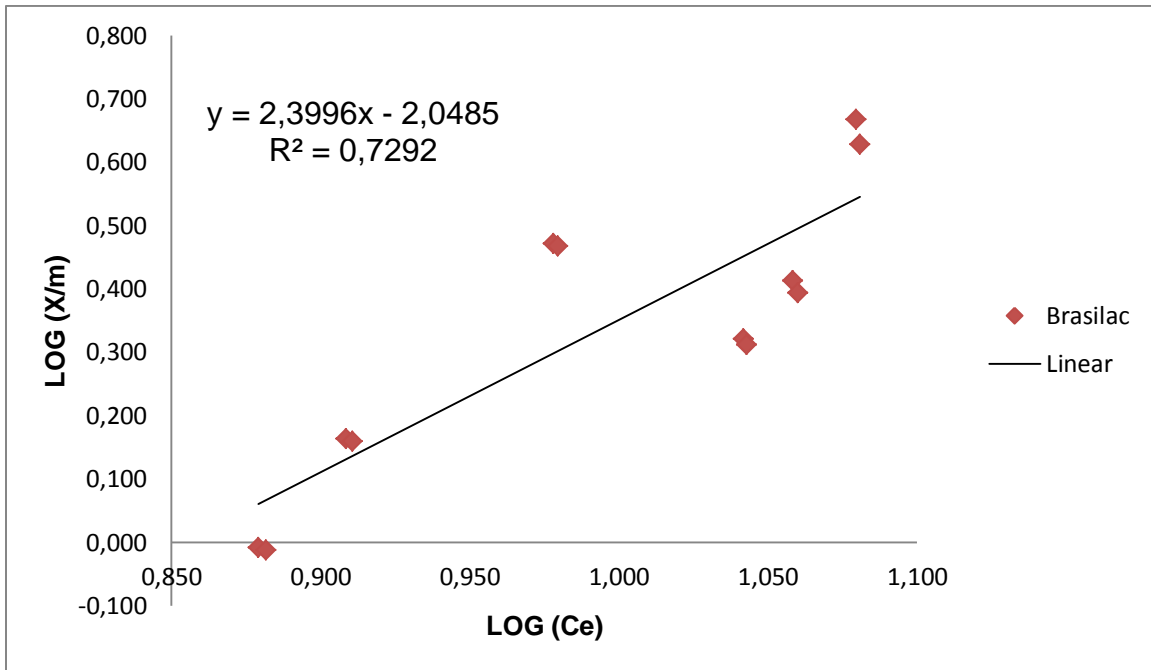


Figura 44. Linearização da isoterma de absorvância para o carvão Brasilac. Tempo de equilíbrio = 24 horas. Temperatura = 25°C. Volume = 100 mL

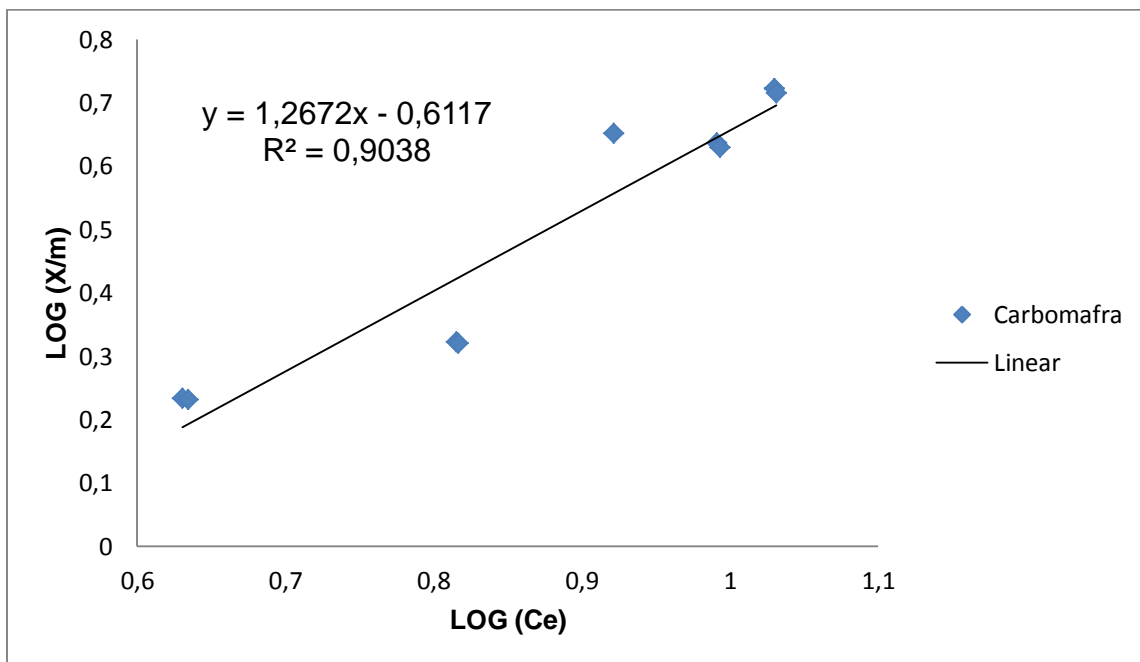


Figura 45. Linearização da isoterma de absorvância para o carvão Carbomafra. Tempo de equilíbrio = 24 horas. Temperatura = 25°C. Volume = 100 mL

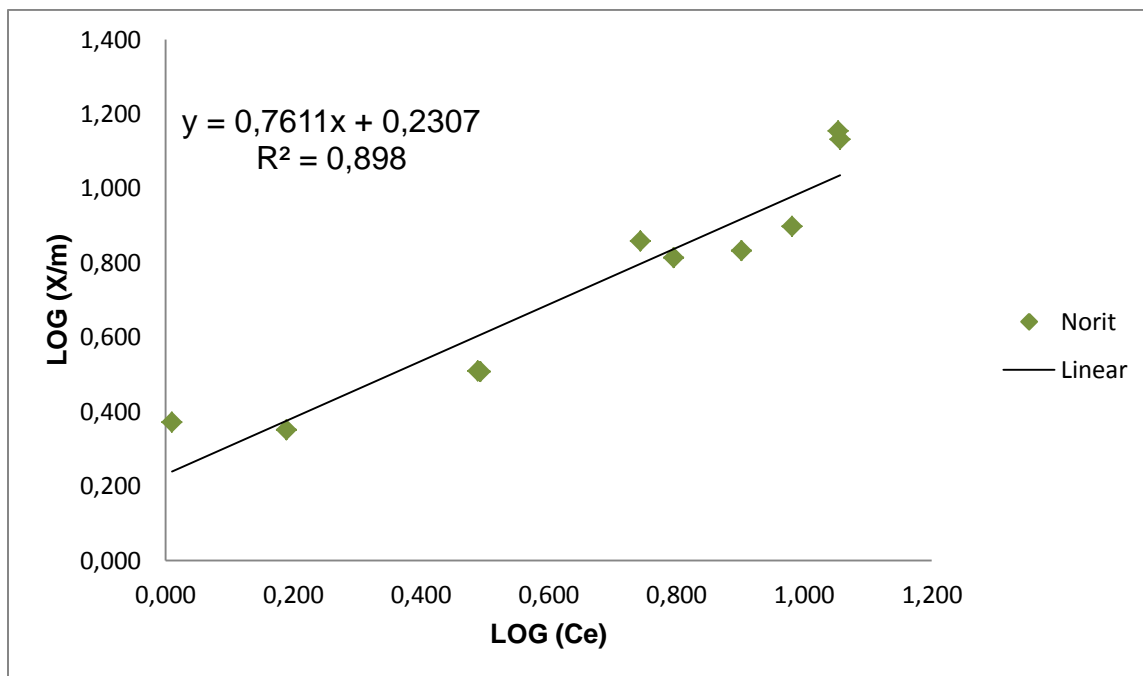


Figura 46. Linearização da isoterma de absorvância para o carvão Norit. Tempo de equilíbrio = 24 horas. Temperatura = 25°C. Volume = 100 mL

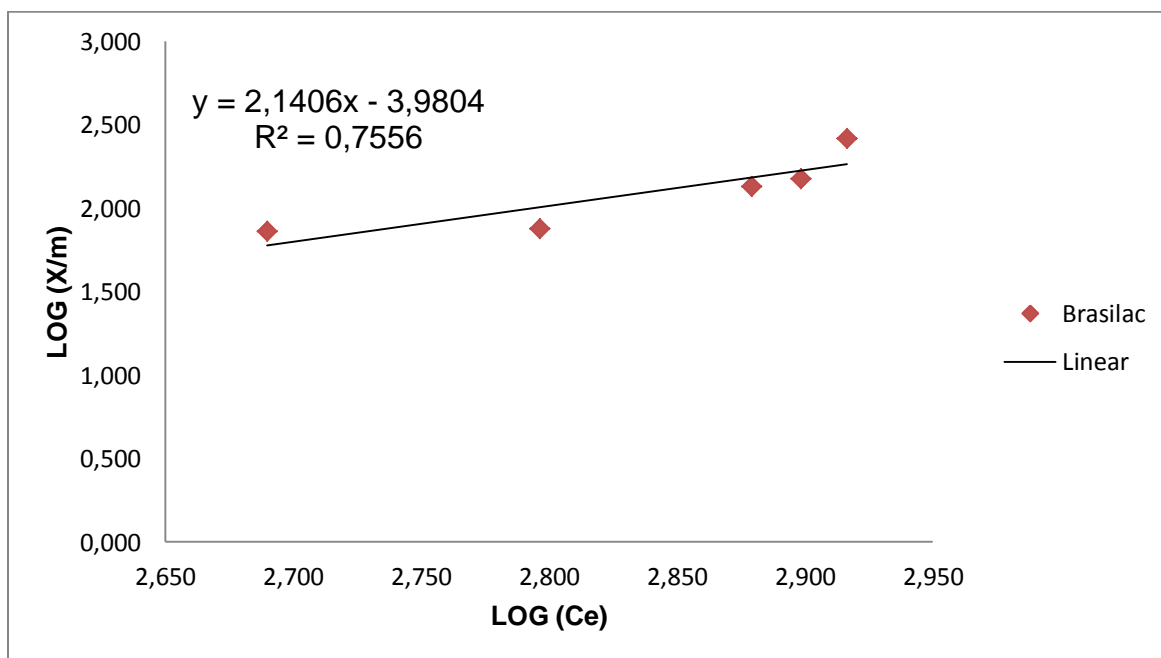


Figura 47. Linearização da isoterma de COT para o carvão Brasilac. Tempo de equilíbrio = 2 horas. Temperatura = 25°C. Volume = 100 mL

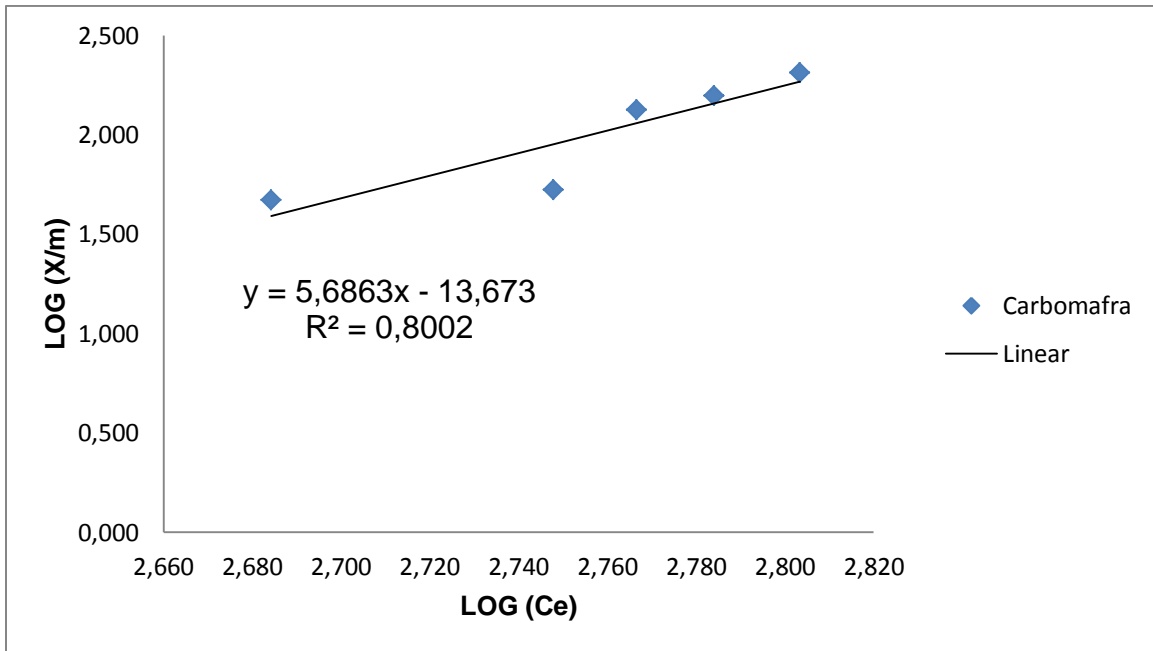


Figura 48. Linearização da isoterma de COT para o carvão Carboneira. Tempo de equilíbrio = 2 horas. Temperatura = 25°C. Volume = 100 mL

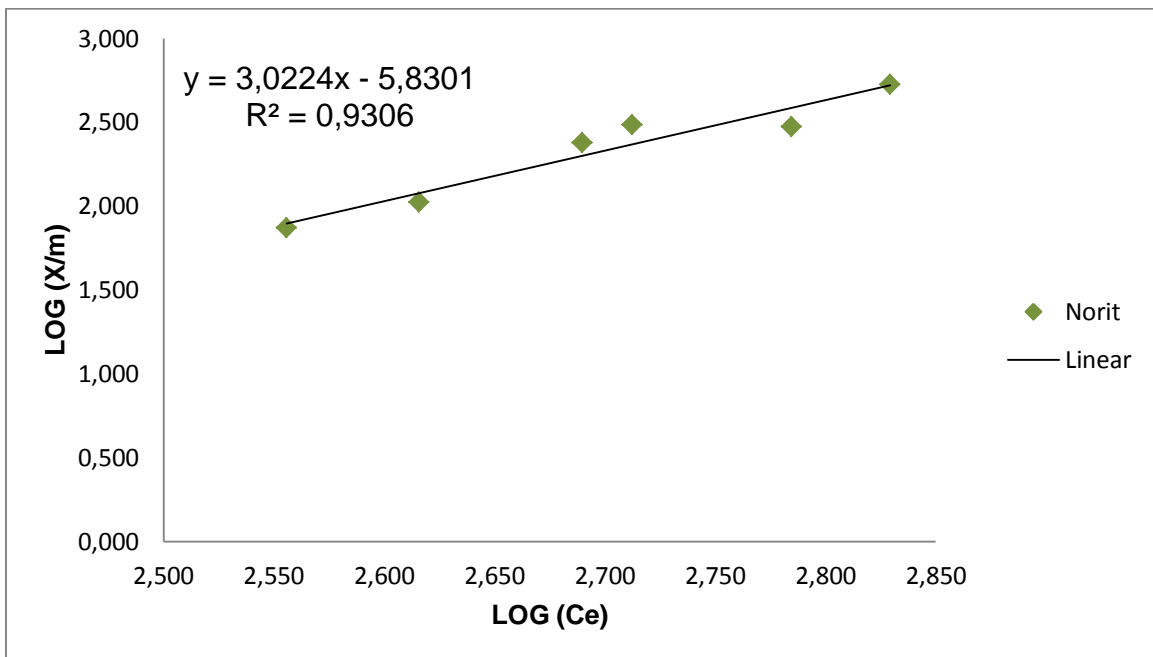


Figura 49. Linearização da isoterma de COT para o carvão Norit. Tempo de equilíbrio = 2 horas. Temperatura = 25°C. Volume = 100 mL

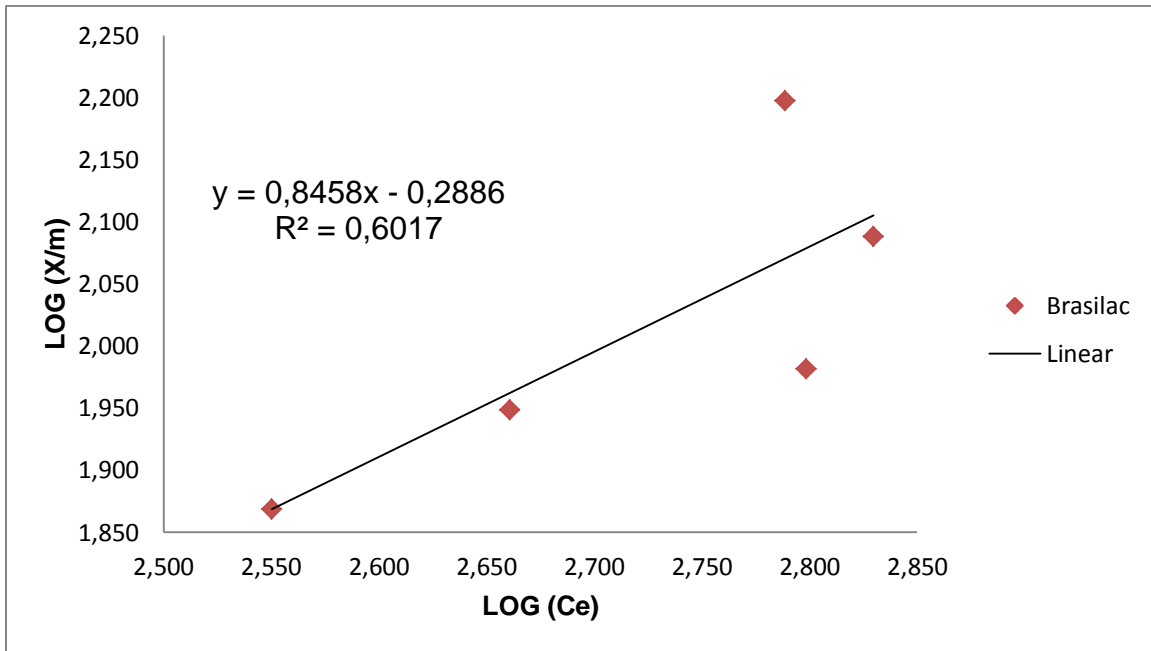


Figura 50. Linearização da isoterma de COT para o carvão Brasilac. Tempo de equilíbrio = 24 horas. Temperatura = 25°C. Volume = 100 mL

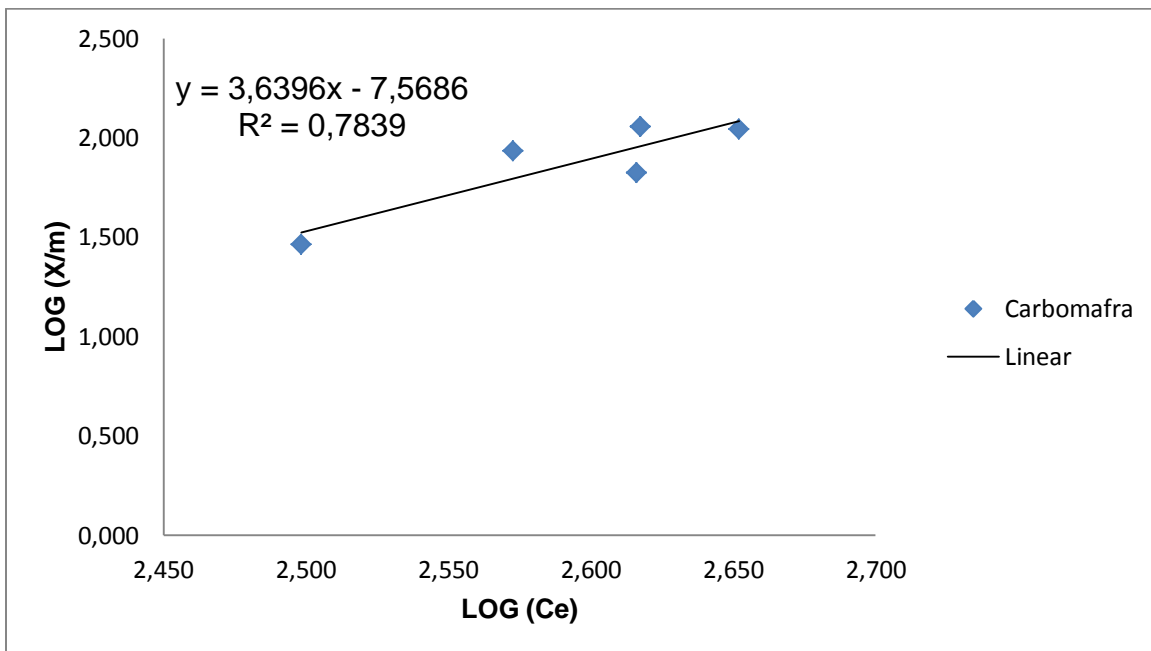


Figura 51. Linearização da isoterma de COT para o carvão Carbomafra. Tempo de equilíbrio = 24 horas. Temperatura = 25°C. Volume = 100 mL



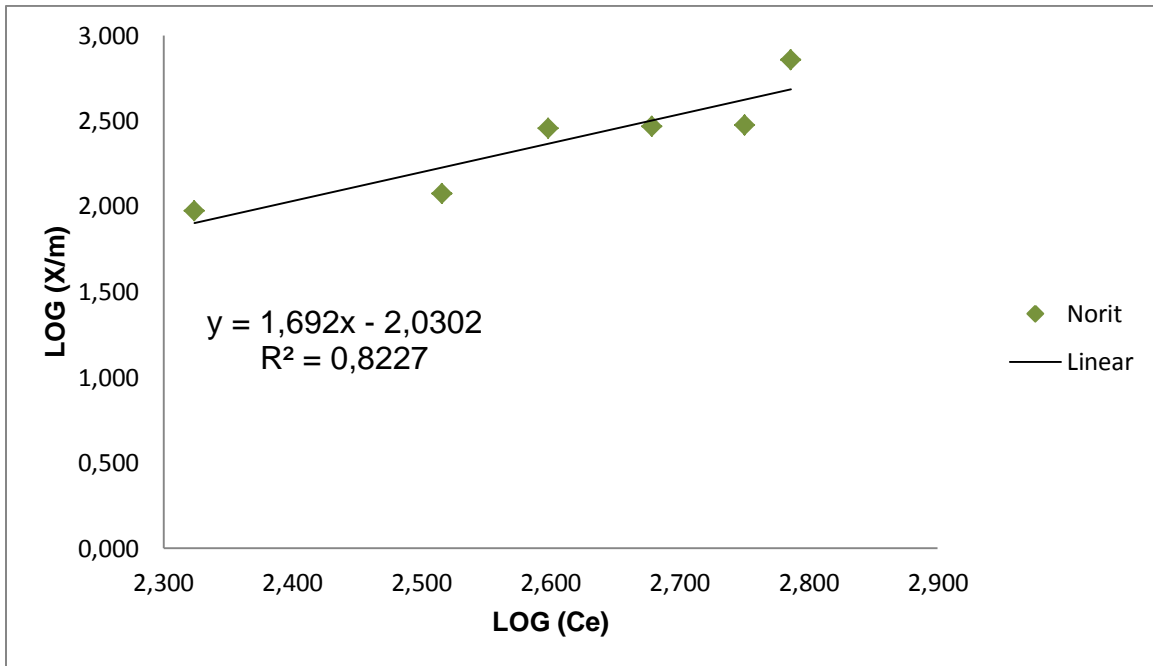


Figura 52. Linearização da isoterma de COT para o carvão Norit. Tempo de equilíbrio = 24 horas. Temperatura = 25°C. Volume = 100 mL

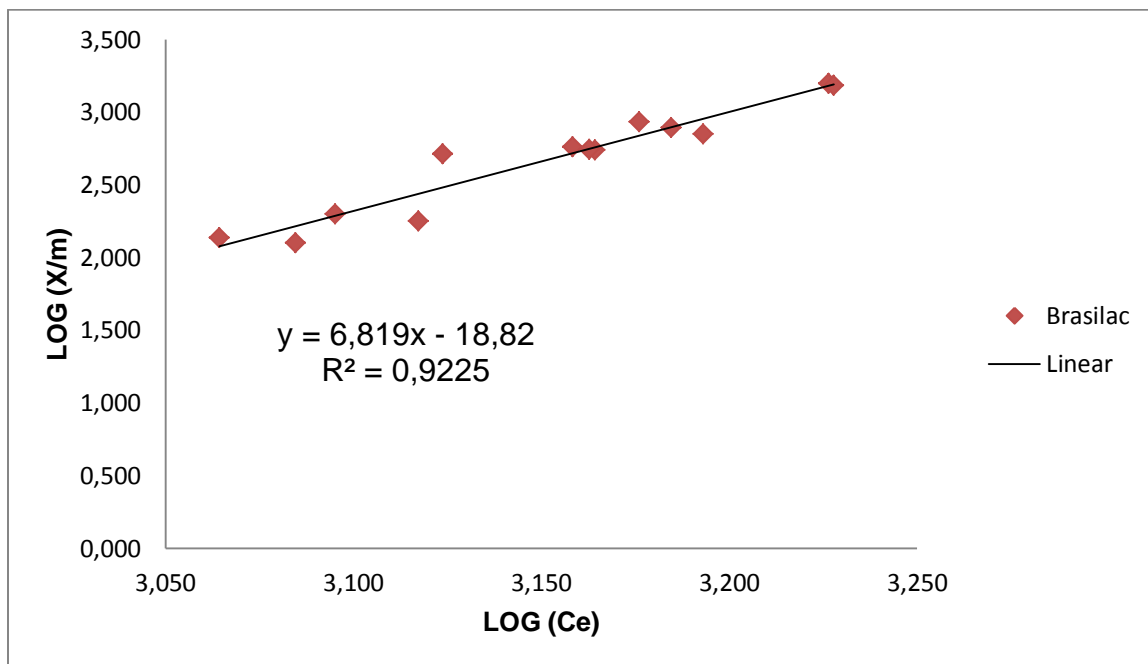


Figura 53. Linearização da isoterma de DQO para o carvão Brasilac. Tempo de equilíbrio = 2 horas. Temperatura = 25°C. Volume = 100 mL

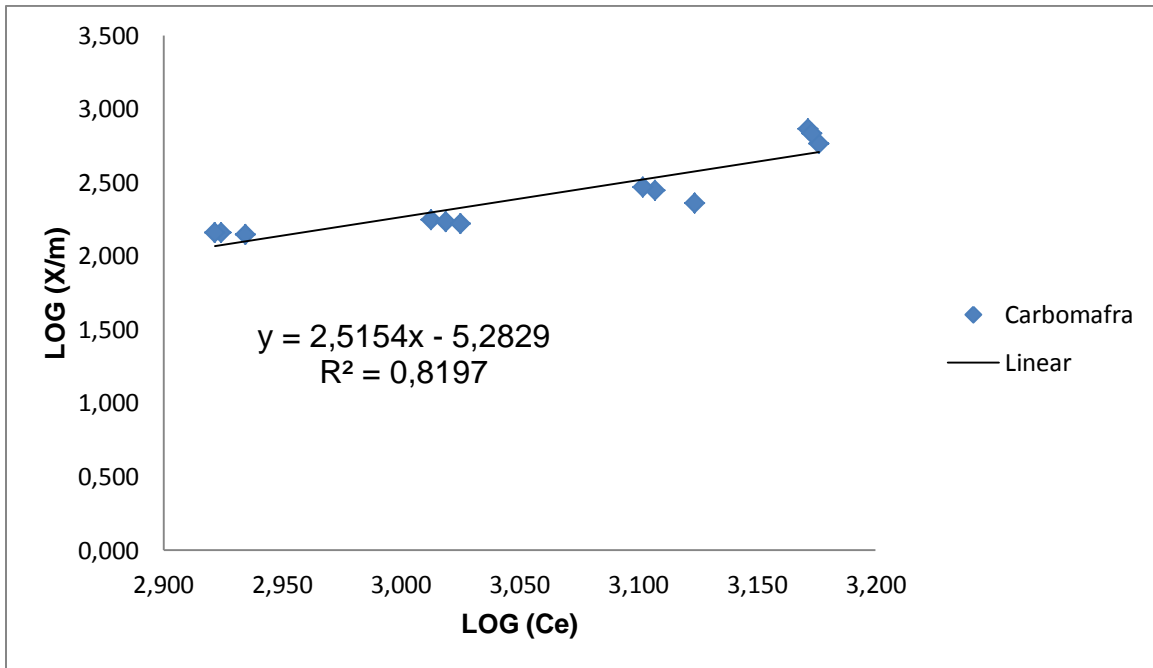


Figura 54. Linearização da isoterma de DQO para o carvão Carboneira. Tempo de equilíbrio = 2 horas. Temperatura = 25°C. Volume = 100 mL

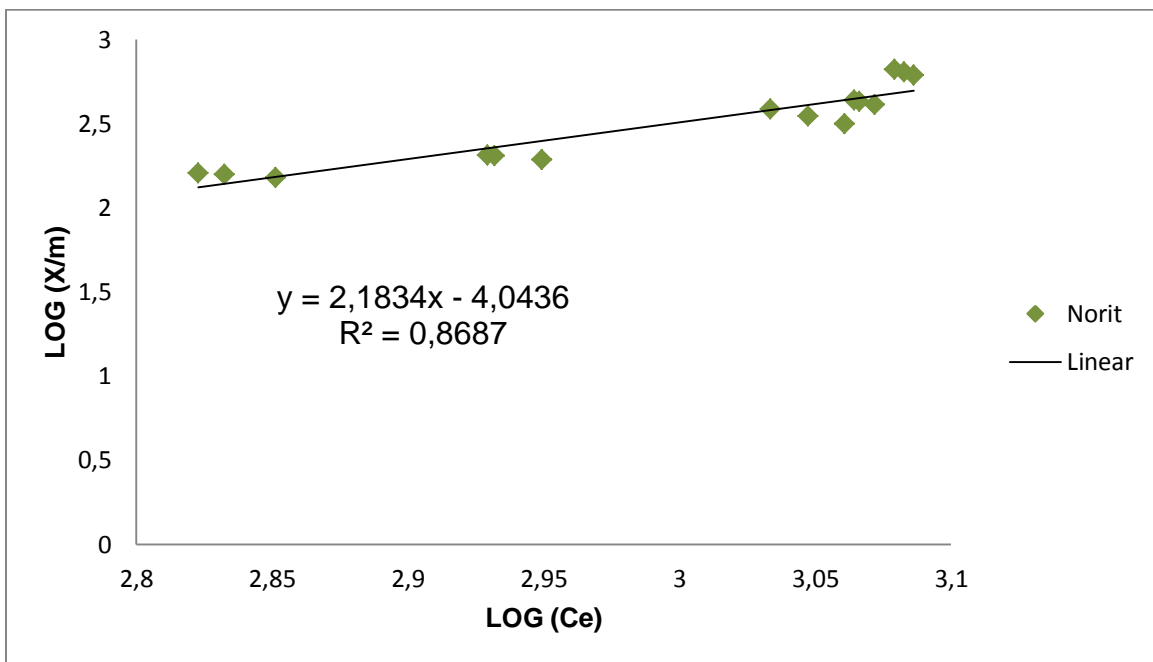


Figura 55. Linearização da isoterma de DQO para o carvão Norit. Tempo de equilíbrio = 2 horas. Temperatura = 25°C. Volume = 100 mL

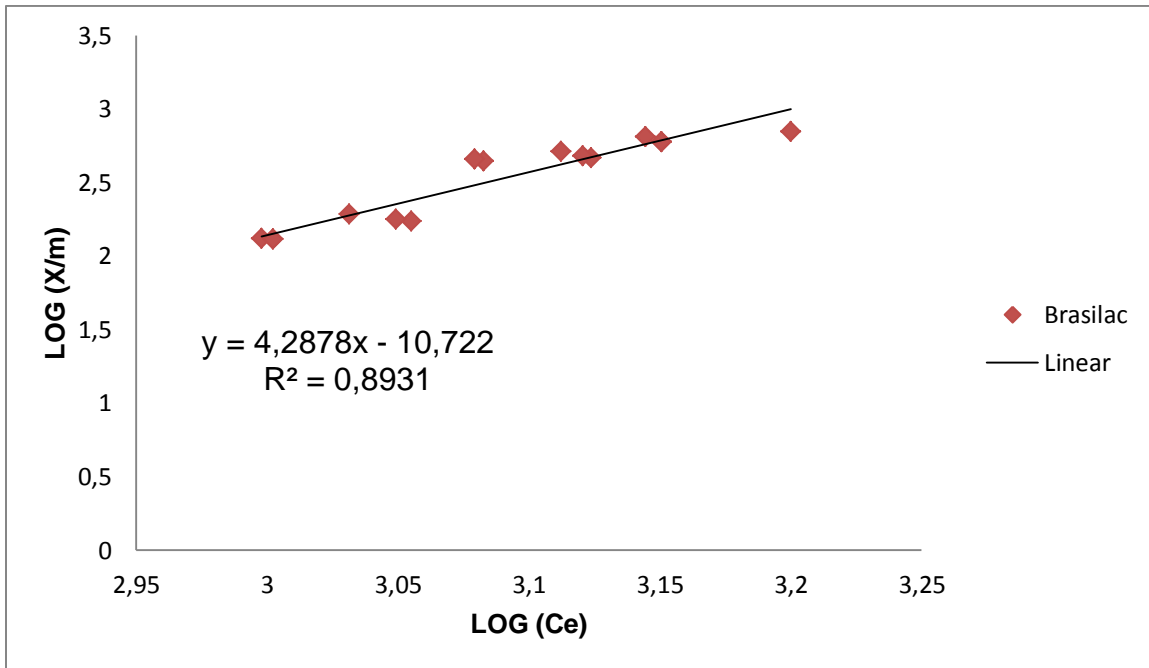


Figura 56. Linearização da isoterma de DQO para o carvão Brasilac. Tempo de equilíbrio = 24 horas. Temperatura = 25°C. Volume = 100 mL

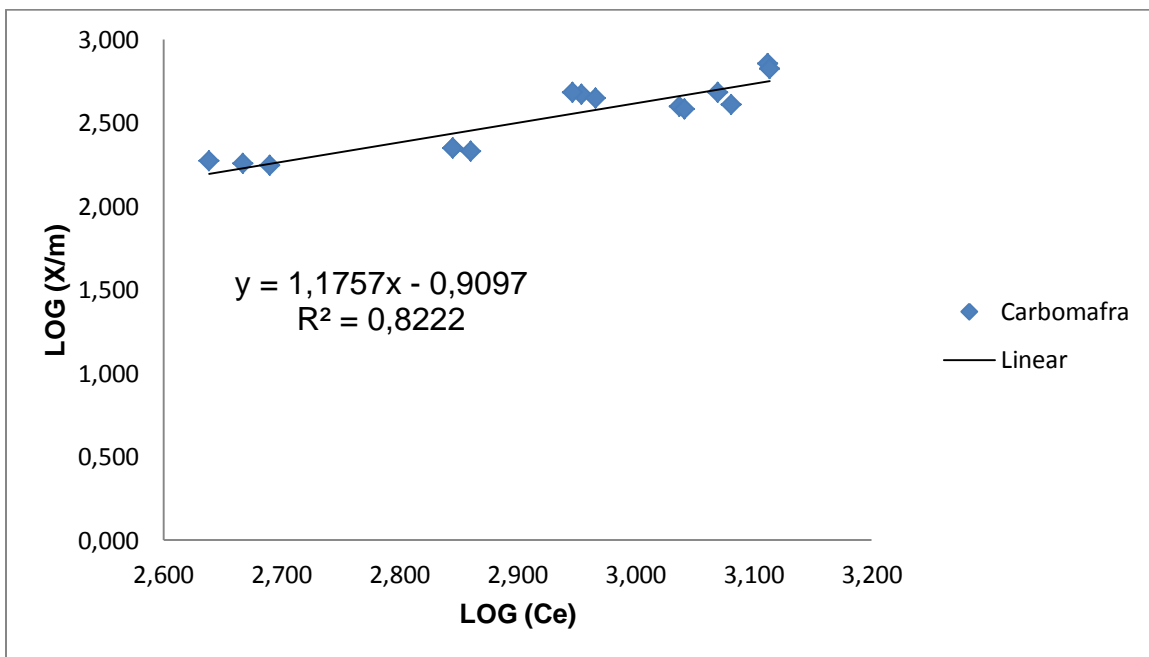


Figura 57. Linearização da isoterma de DQO para o carvão Carbomafra. Tempo de equilíbrio = 24 horas. Temperatura = 25°C. Volume = 100 mL

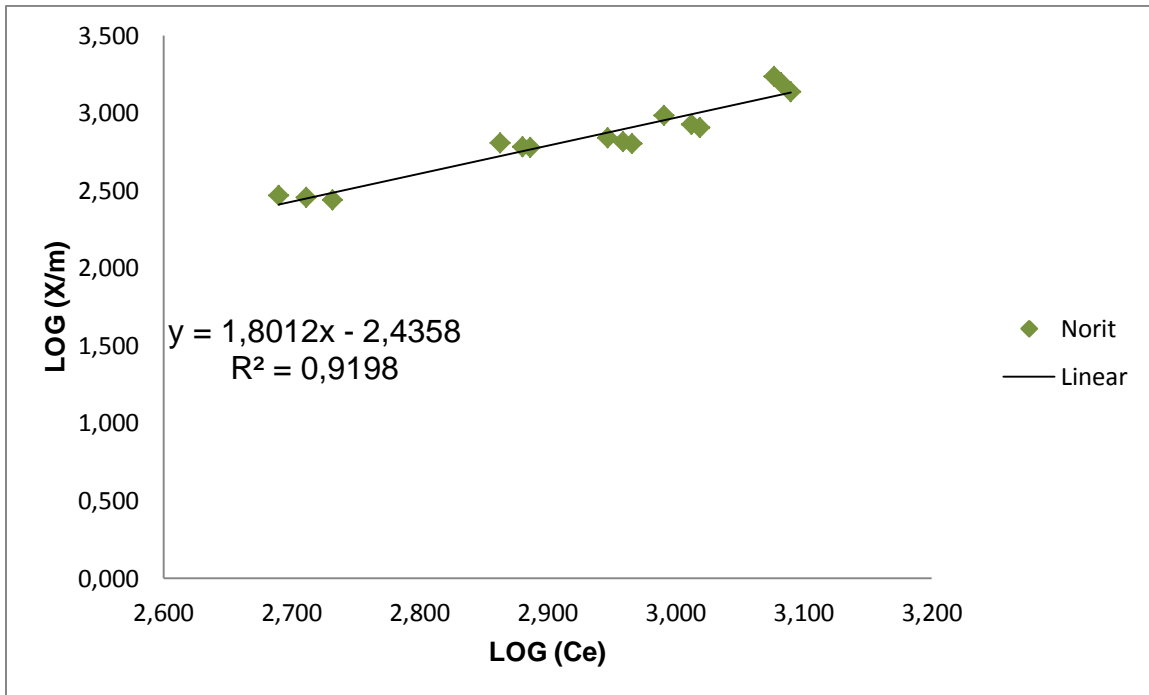


Figura 58. Linearização da isoterma de DQO para o carvão Norit. Tempo de equilíbrio = 24 horas. Temperatura = 25°C. Volume = 100 mL

## ANEXO 3 – Equações matemáticas dos modelos de Freundlich

### ANEXO 3. 1 – CAP Brasilac

$$\frac{X}{m} = 5,92 \times 10^{-6} C_e^{5,342}$$

Equação 7. Modelo Freundlich para Absorvância -2 horas, referente à figura 11.

$$\frac{X}{m} = 1,2 \times 10^{-14} C_e^{5,779}$$

Equação 8. Modelo Freundlich para COT - 2 horas, referente à figura 13.

$$\frac{X}{m} = 1,047 \times 10^{-4} c_e^{2,14}$$

Equação 9. Modelo Freundlich para DQO - 2 horas, referente à figura 15.

$$\frac{X}{m} = 0,00895 C_e^{2,399}$$

Equação 10. Modelo Freundlich para Absorvância -24 horas, referente à Figura 12.

$$\frac{X}{m} = 1,45 \times 10^{-14} C_e^{0,845}$$

Equação 11. Modelo Freundlich para COT - 24 horas, referente à Figura 14.

$$\frac{X}{m} = 1,905 \times 10^{-11} C_e^{4,287}$$

Equação 12. Modelo Freundlich para DQO - 24 horas, referente à figura 16.

Anexo 3. 2 – CAP Carbomafra

$$\frac{X}{m} = 0,1552Ce^{1,365}$$

Equação 13. Modelo Freundlich para Absorvância - 2 horas, referente à figura 11.

$$\frac{X}{m} = 2,138 \times 10^{-14} Ce^{5,686}$$

Equação 14. Modelo Freundlich para COT - 2 horas, referente à figura 13.

$$\frac{X}{m} = 5,224 \times 10^{-6} Ce^{2,515}$$

Equação 15. Modelo Freundlich para DQO - 2 horas, referente à figura 15.

$$\frac{X}{m} = 0,254Ce^{1,067}$$

Equação 16. Modelo Freundlich para Absorvância - 24 horas, referente à figura 12.

$$\frac{X}{m} = 2,7 \times 10^{-8} Ce^{3,639}$$

Equação 17. Modelo Freundlich para COT - 24 horas, referente à figura 14.

$$\frac{X}{m} = 0,1233Ce^{1,175}$$

Equação 18. Modelo Freundlich para DQO - 24 horas, referente à figura 16.

Anexo 3. 3 – CAP Norit

$$\frac{X}{m} = 1,135Ce^{0,192}$$

Equação 19. Modelo Freundlich para absorvância - 2 horas, referente à figura 11.

$$\frac{X}{m} = 1,45 \times 10^{-6} Ce^{3,022}$$

Equação 20. Modelo Freundlich para COT - 2 horas, referente à figura 13.

$$\frac{X}{m} = 9,057 \times 10^{-5} Ce^{2,183}$$

Equação 21. Modelo Freundlich para DQO - 2 horas, referente à figura 15.

$$\frac{X}{m} = 0,588Ce^{0,761}$$

Equação 22. Modelo Freundlich para absorvância - 24 horas, referente à figura 12.

$$\frac{X}{m} = 0,00933Ce^{1,592}$$

Equação 23. Modelo Freundlich para COT - 24 horas, referente à figura 14.

$$\frac{X}{m} = 0,00367Ce^{1,801}$$

Equação 24. Modelo Freundlich para DQO - 24 horas, referente à figura 16.



## ANEXO 4 – Pontos experimentais para os três parâmetros estudados nos Ensaio de Biotratabilidade

Tabela 19: Valores experimentais médios referentes às Figuras 17 e 18 do item IV.

3. 1

Tempo (horas)	Controle	Lodo ativado	PACT® 3,0 g/L	PACT® 5,0 g/L
0	33,3	33,3	33,3	33,3
24	30,07	27,38	23,71	20,29
48	26,85	22,04	19,6	17,84
72	23,24	20,67	17,54	15,12
96	21,87	18,01	18,04	12,73

Tabela 20: valores experimentais médios referentes às Figuras 19 e 20 do item IV.

3. 1

Tempo (horas)	Controle	Lodo ativado	PACT® 3,0 g/L	PACT® 5,0 g/L
0	550,4	550,4	550,4	550,4
24	515,75	463,25	435,25	512,1
48	451,25	423,75	421,25	387,5
72	500,25	415,75	370,25	284
96	429,5	402,5	297,5	178

Tabela 21: valores experimentais médios referentes às Figuras 21 e 22 do item IV.

3. 1

Tempo	Controle	Lodo ativado	PACT® 3,0 g/L	PACT® 5,0 g/L
0	2270	2270	2270	2270
24	2205	2130	2096,67	2036,67
48	2165	2090	2031,67	1978,33
72	2115	2055	1975	1890
96	2093,33	1938,33	1855	1670

Tabela 22: valores experimentais médios referentes às Figuras 23 e 24 do item IV.

3. 2

Tempo (horas)	Controle	Lodo ativado	PACT® 3,0 g/L	PACT® 5,0 g/L
0	33,3	33,3	33,3	33,3
24	27,16	23,15	18,04	12,73
48	22,08	19,77	14,86	9,35
72	13,9	11,07	9,02	6,62
96	11,95	9,86	6,52	2,95

Tabela 23: valores experimentais médios referentes às Figuras 25 e 26 do item IV.

3. 2

Tempo	Controle	Lodo ativado	PACT® 3,0 g/L	PACT® 5,0 g/L
0	605,4	605,4	605,4	605,4
24	593,75	510,25	487,75	354,5
48	562,25	503,33	467,25	314,25
72	547,25	484	436,75	247
96	538,75	479,5	364,75	133,25

Tabela 24: valores experimentais médios referentes às Figuras 27 e 28 do item IV.

3. 2

Tempo	Controle	Lodo ativado	PACT® 3,0 g/L	PACT® 5,0 g/L
0	2270	2270	2270	2270
24	2076,67	1973,33	1676,67	1340
48	1931,67	1785	1473,33	1025
72	1885	1610	1456,67	1333,33
96	1640	1583,33	1265	920

Tabela 25: valores experimentais médios referentes às Figuras 29 e 30 do item IV.

3. 3

Tempo (horas)	Controle	Lodo ativado	PACT® 3,0 g/L	PACT® 5,0 g/L
0	16	16	16	16
24	15,95	13,83	13,26	12,92
48	14,76	13,77	12,89	11,87
72	14,37	13,5	11,89	9,42
96	14,28	13	8,7	4,92

Tabela 26: valores experimentais médios referentes às Figuras 31 e 32 do item IV.

3. 3

Tempo	Controle	Lodo ativado	PACT® 3,0 g/L	PACT® 5,0 g/L
0	618,1	618,1	618,1	618,1
24	604	531	445	296,25
48	564	462	395	240,25
72	545	454	364,75	187,5
96	537,75	450	317,75	162,25

Tabela 27: valores experimentais médios referentes às Figuras 33 e 34 do item IV.

3.3

Tempo (horas)	Controle	Lodo ativado	PACT® 3,0 g/L	PACT® 5,0 g/L
0	2270	2270	2270	2270
24	1756,66	1756,66	1756,66	1756,66
48	1567,67	1390	1310	1206,67
72	1426,67	1331,67	1176,67	995
96	1320	1108,33	908,33	720

Tabela 28: valores experimentais médios referentes às Figuras 35 e 36 do item IV.

3.4

Tempo (horas)	Controle	Lodo ativado	PACT® 3,0 g/L	PACT® 5,0 g/L
0	16,8	16,8	16,8	16,8
24	17,1	14,19	13,78	11,97
48	14,4	13,53	9,97	7,17
72	13,94	11,23	7,92	4,1
96	10,44	9,24	3,05	1,54

Tabela 29: valores experimentais médios referentes às Figuras 37 e 38 do item IV.

3. 4

Tempo	Controle	Lodo ativado	PACT® 3,0 g/L	PACT® 5,0 g/L
0	587	587	587	587
24	558	548,5	541,75	515,5
48	539	534,75	478,25	392,25
72	484,5	454,75	408,75	145,25
96	449	400,25	155	116

Tabela 30: valores experimentais médios referentes às Figuras 39 e 40 do item IV.

3. 4

Tempo	Controle	Lodo ativado	PACT® 3,0 g/L	PACT® 5,0 g/L
0	2068,33	2068,33	2068,33	2068,33
24	1850	1750	1458,33	1116
48	1811,67	1563,33	1273,33	911,67
72	1525	1266,67	951,67	518,33
96	1805	1483,33	1078,33	711,67

## ANEXO 5 – Resultados das eficiências de remoção para os ensaios de biotratabilidade

Tabela 31. Valores da eficiência de remoção para absorvância em 254nm com e sem reposição de CAP Carbomafra e Norit.

CAP	Tempo (horas)	Sem reposição de CAP			Com reposição de CAP		
		Lodo ativado (%)	PACT® 3,0 g/L (%)	PACT® 5,0 g/L (%)	Lodo ativado (%)	PACT® 3,0 g/L (%)	PACT® 5,0 g/L (%)
Carbomafra	0	0	0	0	0	0	0
	24	9	21	33	13	17	19
	48	18	27	34	7	13	20
	72	11	25	35	6	17	34
	96	18	18	44	9	39	66
Norit	0	0	0	0	0	0	0
	0	15	34	53	17	19	30
	24	10	33	58	6	31	50
	48	20	35	52	19	43	71
	72	17	45	72	11	71	85

Tabela 32. Valores da eficiência de remoção para COT com e sem reposição de CAP Carbomafra e Norit.

CAP	Tempo (horas)	Sem reposição de CAP			Com reposição de CAP		
		Lodo ativado (%)	PACT® 3,0 g/L (%)	PACT® 5,0 g/L (%)	Lodo ativado (%)	PACT® 3,0 g/L (%)	PACT® 5,0 g/L (%)
Carbomafra	0	0	0	0	0	0	0
	24	10	16	1	14	28	52
	48	6	7	14	24	35	60
	72	17	26	43	20	35	67
	96	6	31	59	17	42	70
Norit	0	0	0	0	0	0	0
	24	14	18	40	2	3	8
	48	10	17	44	1	11	27
	72	12	20	55	6	16	70
	96	11	32	75	11	65	74



Tabela 33. Valores da eficiência de remoção para DQO com e sem reposição de CAP Carbomafra e Norit.

CAP	Tempo (horas)	Sem reposição de CAP			Com reposição de CAP		
		Lodo ativado (%)	PACT® 3,0 g/L (%)	PACT® 5,0 g/L (%)	Lodo ativado (%)	PACT® 3,0 g/L (%)	PACT® 5,0 g/L (%)
Carbomafra	0	0	0	0	0	0	0
	24	3	5	8	11	16	23
	48	2	6	9	7	18	30
	72	3	7	11	16	31	45
	96	7	11	20	-	-	-
Norit	0	0	0	0	0	0	0
	24	5	19	35	5	21	40
	48	8	24	47	14	30	50
	72	15	23	29	17	38	66
	96	3	23	44	18	40	61