

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

**Adsorção de Tolueno de Solução Aquosa
em Leito de Carvão Ativado em Planta
Piloto**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Graziela Bruschi Brinques

**Porto Alegre
2005**

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

Adsorção de Tolueno de Solução Aquosa em Leito de Carvão Ativado em Planta Piloto

Graziela Bruschi Brinques

Dissertação de Mestrado apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Química

Área de concentração: Fenômenos de Transporte e Operações unitárias

Orientador:

Prof^a. Dr^a. Talita Furlanetto Mendes

Co-orientador:

Prof^a. Dr^a. Keiko Wada

Porto Alegre

2005

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Dissertação *Adsorção de Tolueno de Solução Aquosa em Leito de Carvão Ativado* em Planta Piloto, elaborada por **Graziela Brusch Brinques**, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Química.

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Caciano Zapata Noreña

Profª. Drª. Ligia Damasceno Ferreira Marczak

Profª. Drª. Isabel Cristina Tessaro

Agradecimentos

A Deus, pela saúde e iluminação dos meus caminhos.

À minha mãe, Ozita, pelo amor, formação, conselhos e força, sempre me incentivando em todas as etapas da minha vida. Te amo.

Ao meu marido, Fuca, pelo amor, companheirismo, compreensão, amizade e apoio, sempre ao meu lado trilhando cada novo passo da nossa caminhada. Te amo.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul e ao Departamento de Engenharia Química, por todo o suporte e estrutura disponíveis para a realização deste trabalho, bem como pelo apoio financeiro.

Às minhas orientadoras, Talita Furlanetto Mendes e Keiko Wada, pelo incentivo e atenção dispensada e apoio no desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus grandes amigos, de toda a vida, que juntos, ano após ano, crescemos e conquistamos mais uma parte desse imenso mundo, sempre com muitos sucessos e, graças a Deus, pouquíssimos fracassos.

Aos meus novos amigos do mestrado, que mais de perto dividiram as sucessos, fracassos, conquistas, dúvidas e angústia desta etapa de nossas vidas, pela amizade e companheirismo.

Aos bolsistas de Iniciação Científica, Paula e Daniel, pelo auxílio e amizade.

À Sirley Garcia Secchi, pelo apoio dado à realização do trabalho.

Ao professor Celso Camilo Moro, pelo auxílio prestado para o desenvolvimento deste trabalho.

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química pela oportunidade.

Ao CNPq pelo apoio financeiro.

Resumo

A adsorção em leito fixo de carvão ativado granular é uma das mais importantes alternativas para a remoção de compostos orgânicos voláteis em efluentes aquosos, em concentrações baixas. O objetivo deste trabalho é colocar em funcionamento uma unidade piloto de adsorção e desenvolver uma metodologia para avaliar o comportamento de adsorventes nesta planta como a usada no projeto de unidades de adsorção de leito fixo. Esta planta piloto possui uma coluna de 20 mm de diâmetro interno, encamisada. Ela é equipada com espectrofotômetro UV *on-line*, que permite a medida da concentração de componentes orgânicos voláteis na corrente de efluente. Também, possui módulos para a aquisição de dados de temperatura, vazão e pressão diferencial. Nessa planta, foram realizados experimentos, à temperatura ambiente, para aquisição de curvas de ruptura experimentais da adsorção de tolueno de uma corrente aquosa, em um leito fixo de carvão ativado. O leito era composto por um carvão ativado granular (8 x 12 mesh). Diferentes alturas de leito (5 e 10 cm) e vazões (0,8 e 1,6 L.h⁻¹) foram testados, mantendo a concentração de tolueno na alimentação em aproximadamente 50 ppm. Concomitantemente, foram realizados testes para a caracterização do adsorvente, obtendo-se 15,4 % de conteúdo de umidade e 8,7 % de cinzas, massa específica bulk de 0,5 g.mL⁻¹, massa específica real de 1,72 g.mL⁻¹ e 681 m².g⁻¹ de área superficial. A estimativa da difusividade mássica e do coeficiente de transferência de massa referente à fase sólida foram obtidos através de dados de testes cinéticos, obtendo-se, respectivamente, os valores médios de 6,1 cm².h⁻¹ e 0,0162 cm.h⁻¹. As alturas das zonas de transferência de massa obtidas para a vazão de 0,8 L.h⁻¹ aumentaram com o aumento da altura do leito, indicando comportamento de padrões proporcionais. Além disso, analisaram-se dados preliminares de pressão diferencial no leito, que indicam que ela aumentou enquanto havia adsorção. A metodologia desenvolvida poderá ser aplicada para estudar a adsorção com outros pares adsorvente/adsorvato.

Abstract

The adsorption in fixed bed of activated carbon is one the most important alternatives to the removal of volatile organic compounds (VOC's) in aqueous effluents at low concentrations. The aim of this work is the start-up of a pilot unit of adsorption and to develop a methodology to evaluate the adsorbents behavior in this unit. This pilot unit is equipped with a 20 mm inner diameter jacketed column. It also has a UV detector on-line that allows the measure of the concentration of VOC in the effluent stream. The plant has modules for the acquisition of temperature, flow rate and differential pressure data. It were carried out experiments, at ambient temperature, for acquisition of the breakthrough curves in the adsorption of toluene from an aqueous stream, in a fixed bed of granular activated carbon. The fixed bed was formed by a previously water washed commercial activated carbon (8 x 12 mesh). Different lengths of bed (5 e 10 cm) and flow rates (0,8 e 1,6 L.h⁻¹) were tested, keeping the feed concentration around 50 ppm. Concomitantly, it were carried out tests to characterize the solid adsorbent, where were obtained 8,7% of ash and 15,4% of moisture contents, bulk density of 0,5 g.mL⁻¹, real density of 1,72 g.mL⁻¹ and 681 m².g⁻¹ of surface area. The estimation of the mass diffusivity and the mass transfer coefficient in the solid phase were done through kinetic test data where the mean values were 6,1 cm².h⁻¹ e 0,0162 cm.h⁻¹, respectively. The mass transfer zone lengths obtained to a flow rate of 0,8 L.h⁻¹ increased with the increase of the bed length, which indicates a proportional pattern behavior. Besides, preliminary differential pressure data were analyzed and showed an increase while the adsorption was taking place. The developed methodology can be applied in future studies of removal of other contaminants with different adsorbents.

Sumário

Sumário	vii
Introdução	1
Fundamentos Teóricos e Revisão Bibliográfica	3
2.1 Adsorção.....	3
2.2 Carvão ativado granular.....	6
2.3 Análise espectrofotométrica.....	8
2.4 Isotermas de equilíbrio.....	10
2.5 Coeficiente de difusão mássica no sólido e taxas de transferência de massa	20
2.6 Curvas de ruptura	26
Materiais e métodos.....	36
3.1 Caracterização do carvão	36
3.1.1 Determinação da umidade	36
3.1.2 Determinação de cinzas.....	36
3.1.3 Determinação da massa específica.....	37
3.1.4 Determinação da porosidade do leito	37
3.1.5 Determinação do pH	38
3.1.6 Área superficial	38
3.1.7 Análise granulométrica.....	38
3.2 Especificação do adsorvato	38
3.3 Pré-tratamento do carvão	38
3.3.8 Lavagem com ácido	39
3.3.9 Lavagem com água.....	39
3.4 Determinação da concentração de tolueno.....	39
3.5 O Sistema de adsorção – Instrumentos e acessórios.....	40
3.5.1 Calibração e aferição dos equipamentos.....	42
3.5.2 Configuração da interface gráfica.....	44
3.5.3 Modo de operação	44
3.6 Metodologia para a obtenção de isotermas de equilíbrio.....	45
3.7 Metodologia para realização dos testes cinéticos.....	46

3.8 Obtenção de curvas de ruptura experimentais	47
Resultados e Discussão.....	48
4.1 Caracterização do carvão	48
4.2 Pré-tratamento do carvão	49
4.3 Determinação da concentração de tolueno.....	52
4.4 Posta em marcha de planta de testes de adsorção e troca iônica.....	56
4.5 Isotermas de equilíbrio.....	60
4.6 Testes cinéticos	62
4.7 Curvas de ruptura	64
Conclusões e Sugestões.....	77
5.1 Conclusões	77
5.2 Sugestões para Trabalhos Futuros.....	78
Referências	80
Apêndice A - Elaboração da Interface Gráfica.....	83
Apêndice B - Dados Experimentais	98
Lista de figuras.....	ix
Lista de tabelas	xi
Lista de símbolos.....	xiii

Lista de figuras

Figura 2.1:	Espectro UV/VIS de tolueno.	10
Figura 2.2:	Formatos de isothermas de equilíbrio.....	12
Figura 2.3:	Relação entre as concentrações de <i>q</i> e <i>c</i> nas fases <i>bulk</i> , seus valores da interface e os valores em equilíbrio com as concentrações <i>bulk</i>	22
Figura 2.4:	Esquema da seção transversal de um leito fixo de adsorção.	27
Figura 2.5:	Perfis de concentração em um leito fixo: (a) perfis de concentração em várias posições e em diferentes tempos; (b) perfil de concentração do fluido na saída do leito.	30
Figura 3.1:	Foto da PTA/TI.	41
Figura 3.2:	Fluxograma esquemático da planta de testes de adsorção e troca iônica - PTA/TI.	42
Figura 3.3:	Foto da coluna de adsorção.	42
Tabela 4.1:	Dados referentes à caracterização do carvão vegetal granular utilizado no presente estudo.	49
Figura 4.1:	Curva de calibração de concentração de tolueno utilizando-se comprimento de onda de 206 nm e caminho óptico de 10 mm.	53
Figura 4.2:	Curva de calibração de concentração de tolueno utilizando-se comprimento de onda de 254 nm e caminho óptico de 100 mm.....	53
Figura 4.3:	Curva de calibração de concentração de tolueno utilizando-se comprimento de onda de 261 nm e caminho óptico de 100 mm.....	53
Figura 4.4:	Espectros de varredura de uma solução de tolueno de 60 ppm utilizando diferentes caminhos ópticos.....	54
Figura 4.5:	Detalhamento do espectro de varredura de uma solução de tolueno de 60 ppm.....	55
Figura 4.6:	Curva de calibração de concentração de tolueno para soluções filtradas utilizando-se comprimento de onda de 254 nm e caminho óptico de 100 mm.....	56
Figura 4.7:	Reta de calibração entre os espectrofotômetros de bancada e <i>on-line</i> . 59	
Figura 4.8:	Reta de calibração da bomba peristáltica.	59
Figura 4.9:	Isoterma de equilíbrio de Freundlich a 25° C	61
Figura 4.10:	Dados experimentais dos testes cinéticos com 1 g de carvão e curva do modelo.....	63
Figura 4.11:	Dados experimentais dos testes cinéticos com 2 g de carvão e curva do modelo.....	63
Figura 4.12:	Curvas de concentração de tolueno no efluente nos experimentos em leito fixo.....	66

Figura 4.13: Curvas de ruptura experimentais dos experimentos com leito de 10 cm e diferentes vazões.	67
Figura 4.14: Curvas de ruptura experimentais dos experimentos com leito de 5 cm e diferentes vazões.	67
Figura 4.15: Curvas de ruptura experimentais dos experimentos realizados com vazão de 0,8 L.h ⁻¹ e diferentes alturas de leito.	68
Figura 4.16: Curvas de ruptura experimentais dos experimentos realizados com vazão de 1,6 L.h ⁻¹ e diferentes alturas de leito.	68
Figura 4.17: Pressão diferencial no leito nos experimentos com leito de 10 cm e vazão de 1,6 L.h ⁻¹ em função do tempo.	74
Figura 4.18: Pressão diferencial no leito nos experimentos com leito de 5 cm e vazão de 0,8 L.h ⁻¹ em função do tempo.	74
Figura 4.19: Comparação entre a variação da pressão diferencial e da concentração de tolueno no efluente com o tempo.	75
Figura 4.20: Concentração de tolueno e temperatura do efluente da Corrida 4.	76
Figura A.1: Estrutura básica do Organizer com os seus ramos.	83
Figura A.2: Reta que correlaciona a pressão diferencial no leito com o sinal de tensão.	85
Figura A.3: Janela do <i>Organizer</i> tendo em detalhe a guia da configuração geral do <i>tag</i> expressão criado com o auxílio da equação da reta e do <i>tag</i> PLC <i>pressao3</i>	85
Figura A.4: Reta que correlaciona a absorbância com a tensão.	86
Figura A.5: Janela do <i>Organizer</i> tendo em detalhe a guia da configuração geral do <i>tag</i> expressão criado com o auxílio da equação da reta e do <i>tag</i> PLC <i>UV_CANAL_1</i>	86
Figura A.6: Guia de propriedades gerais do botão.	87
Figura A.7: Guia Mensagens do botão.	88
Figura A.8: Guia Moldura.	89
Figura A.9: Guia de Tags.	89
Figura A.10: Guia de Tags com seu ramos estendidos.	90
Figura A.11: Tela da aplicação criada com todos os seus objetos.	91
Figura A.12: Configuração do <i>Driver</i> 1.	92
Figura A.13: Referência cruzada do <i>Driver</i> 1.	92
Figura A.14: Listagem dos bancos de dados existentes na aplicação criada.	93
Figura A.15: Tela do Assistente de Nova Conexão.	94
Figura A.16: Lista com as conexões disponíveis.	95
Figura A.17: Referência cruzada do <i>database</i> <i>temperatura_banco</i> da aplicação.	95
Figura A.18: Tela do Script da aplicação criada.	96

Lista de tabelas

Tabela 2.1: Correlações para a determinação do coeficiente de transferência de massa na fase líquida (k_f).....	24
Tabela 3.1: Componentes da PTA/TI.....	43
Tabela 3.2: Relação de módulos Nudam [®] e respectivos equipamentos ligados a estes.....	43
Tabela 3.3: Equações de isotermas utilizadas para correlacionar os dados experimentais.....	46
Tabela 3.4: Níveis em que os fatores manipuláveis foram analisados.	47
Tabela 4.2: Descrição da variação da absorvância de acordo com o tempo de centrifugação da água de lavagem do carvão com HCl ($\lambda=206$ nm e $L=10$ mm).	50
Tabela 4.3: Valores de pH na água de lavagem do carvão ativado lavado com ácido.....	51
Tabela 4.4: Valores obtidos de pH e absorvância para a solução da lavagem somente com água após cada lavagem.....	52
Tabela 4.5: Comparação do pH do carvão antes e após a lavagem com água.....	52
Tabela 4.6: Leituras de absorvância de pares de amostras coletadas na alimentação e na saída da PTA/TI, para verificação da concentração da solução na linha, sem amostrador especial.....	57
Tabela 4.7: Parâmetros da Equação da Isoterma de Freundlich.....	60
Tabela 4.8: Valores de difusividade mássica efetiva obtidos a partir da estimação de parâmetros.....	62
Tabela 4.9: Dados dos experimentos em leito fixo.....	64
Tabela 4.10: Coeficientes de cada um dos graus do polinômio ajustados aos dados experimentais.....	70
Tabela 4.11: Resultados de tempo total, tempo útil, altura útil e altura da zona de transferência de massa dos experimentos de adsorção em leito fixo.....	70
Tabela 4.12: Valores dos parâmetros utilizados para a estimação de D_{AB}	72
Tabela 4.13: Propriedades físicas da água a 25 °C.....	72
Tabela 4.14: Valores de k_f ($m.s^{-1}$) estimados por correlações empíricas.....	72
Tabela 4.15: Valores de resistência à transferência de massa nas fases fluido e sólida.	73
Tabela B.1: Resultados referentes à determinação da área superficial do carvão.	98
Tabela B.2: Dados da determinação de cinzas do carvão.	98
Tabela B.3: Dados da determinação da massa específica bulk.	98
Tabela B.4: Dados de leitura de absorvância de amostras de solução aquosa de tolueno no comprimento de onda de 206 nm e caminho óptico de 10 mm.	99

Tabela B.5: Dados de leitura de absorvância de amostras de solução aquosa de tolueno no comprimento de onda de 254 nm e caminho óptico de 100 mm.	99
Tabela B.6: Dados de leitura de absorvância de amostras de solução aquosa de tolueno no comprimento de onda de 261 nm e caminho óptico de 100 mm.	99
Tabela B.7: Dados de leitura de absorvância de amostras filtradas de solução aquosa de tolueno no comprimento de onda de 254 nm e caminho óptico de 100 mm.....	100
Tabela B.8: Dados de absorvância lidos pelos espectrofotômetros de banca e on-line de amostras de efluentes à PTA/TI utilizados para a elaboração da curva de calibração entre os espectrofotômetros.	100
Tabela B.9: Dados dos experimentos de equilíbrio de adsorção.....	101
Tabela B.10: Dados dos testes cinéticos com 1g de carvão.	101
Tabela B.11: Dados dos testes cinéticos com 2g de carvão.	102
Tabela B.12: Dados do experimento em leito fixo de carvão ativo - corrida 1.	103
Tabela B.13: Dados do experimento em leito fixo de carvão ativo - corrida 2.	108
Tabela B.14: Dados do experimento em leito fixo de carvão ativo - corrida 3.	113
Tabela B.15: Dados do experimento em leito fixo de carvão ativo - corrida 4.	117
Tabela B.16: Dados do experimento em leito fixo de carvão ativo - corrida 5.	122
Tabela B.17: Dados do experimento em leito fixo de carvão ativo - corrida 6.	126
Tabela B.18: Dados do experimento em leito fixo de carvão ativo - corrida 7.	130
Tabela B.19: Dados do experimento em leito fixo de carvão ativo - corrida 8.	132

Lista de símbolos

- k_s : coeficiente de transferência de massa na fase sólida ($m.h^{-1}$)
- k_f : coeficiente de transferência de massa no filme líquido ($m.h^{-1}$)
- D_s : coeficiente de difusão ($m^2.h^{-1}$)
- E: energia (J)
- h: constante de Planck ($6,63.10^{-34}$ J.s)
- ζ : velocidade da luz ($2,998.10^8$ m.s⁻¹)
- η : frequência (Hz)
- λ : comprimento de onda (nm)
- τ : transmitância
- I: intensidade da radiação que deixa a solução
- I_0 : intensidade da radiação que chega na solução
- c: concentração da solução ($mol.L^{-1}$ ou $mg.L^{-1}$ ou $kg.m^{-3}$)
- A: absorvância (%)
- b: caminho óptico (mm ou cm)
- γ : absorvidade molar ($M^{-1}.cm^{-1}$), onde M é expresso em $g.L^{-1}$
- q: concentração de soluto no adsorvente ($kg.kg^{-1}$ ou $mg.g^{-1}$)
- W: massa de adsorvente (g)
- V: volume (L)
- c_0 : concentração inicial da solução ($mol.L^{-1}$ ou $mg.L^{-1}$ ou $kg.m^{-3}$)
- c_e : concentração de soluto na solução no equilíbrio ($mol.L^{-1}$ ou $mg.L^{-1}$ ou $kg.m^{-3}$)
- q_e : concentração de soluto no adsorvente no equilíbrio ($kg.kg^{-1}$ ou $mg.g^{-1}$)
- K_1 : constante de equilíbrio da equação da isoterma linear ($L.g^{-1}$)
- K_2 : constante de equilíbrio da equação da isoterma de Langmuir ($L.mg^{-1}$)
- N_1 : constante da equação da isoterma de Langmuir ($mg.g^{-1}$)
- k_1 : constante de equilíbrio da equação da isoterma de Freundlich ($mg^{1-1/n_1}.L^{1/n_1}.g^{-1}$)
- n_1 : constante da equação da isoterma de Freundlich (adimensional)
- q_m : constante da equação da isoterma BET ($cm^3.g^{-1}$)
- b_1 : constante da equação da isoterma BET (adimensional)
- P: pressão (atm)
- P_s : pressão de vapor de saturação (atm)

ΔS : variação de entropia ($\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
 R : constante de gases ($\text{atm}\cdot\text{m}^3\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
 ΔH : variação de entalpia ($\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$)
 T : temperatura (K ou $^{\circ}\text{C}$)
 T_0 : temperatura de referência (K ou $^{\circ}\text{C}$)
 m_{01} : constante (adimensional)
 α : constante (adimensional)
 ΔG : variação da energia livre de Gibbs ($\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$)
 n_2 : constante da equação da isoterma de Sips ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)
 K_4 : constante da equação da isoterma de Sips ($\text{L}\cdot\text{mg}^{-1}$)
 m_2 : constante da equação da isoterma de Sips (adimensional)
 m_{02} : constante da equação da isoterma de Sips (adimensional)
 β_1 : constante da equação da isoterma de Sips (adimensional)
 a : constante da equação da isoterma de Radke e Prausnitz ($\text{L}\cdot\text{g}^{-1}$)
 b_2 : constante da equação da isoterma de Radke e Prausnitz ($\text{L}^{\beta_2}\cdot\text{mg}^{1-\beta_2}\cdot\text{g}^{-1}$)
 β_2 : constante da equação da isoterma de Radke e Prausnitz (adimensional)
 K_5 : constante da equação da isoterma de Fritz – Schluender ($\text{mg}^{\text{m}_3}\cdot\text{L}^{1-\text{m}_3}\cdot\text{g}^{-1}$)
 N_3 : constante da equação da isoterma de Fritz – Schluender ($\text{L}^{\text{m}_3}\cdot\text{mg}^{-\text{m}_3}$)
 m_3 : constante da equação da isoterma de Fritz – Schluender (adimensional)
 N_4 : constante da equação da isoterma UNILAN (adimensional)
 s : constante da equação da isoterma UNILAN (adimensional)
 K_6 : constante da equação da isoterma UNILAN ($\text{L}^s\cdot\text{mg}^s$)
 K_7 : constante da equação da isoterma UNILAN ($\text{L}^{-s}\cdot\text{mg}^{-s}$)
Raio: o raio da partícula (m)
 t : tempo (h)
 n : é o número de termos do somatório
 \bar{q} : concentração média de soluto no sólido em um dado tempo ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)
 q_{∞} : concentração de soluto no sólido a um tempo infinito ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$).
 c_i : concentração de soluto no líquido na interface líquido/partícula ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$)
 S_o : área superficial da partícula de adsorvente por unidade de volume da partícula de adsorvente ($\text{m}^2\cdot\text{m}^{-3}$)
 a : área superficial por unidade de volume do leito empacotado ($\text{m}^2\cdot\text{m}^{-3}$)
 ε : porosidade ou fração de vazios do leito (adimensional)
 q_i : concentração de soluto no sólido na interface partícula/líquido ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)

q^* : valor de q em equilíbrio com a concentração c no seio do fluido (mg.g^{-1})
 K_s : coeficiente de transferência de massa global referido à fase sólida (m.h^{-1})
 K_f : coeficiente de transferência de massa global referido à fase líquida (m.h^{-1})
 Sc : número de Schmidt (adimensional)
 Sh : número de Sherwood (adimensional)
 Re : número de Reynolds (adimensional)
 μ : viscosidade da solução (Pa.s)
 ρ : massa específica (kg.m^{-3})
 ψ : fator de forma (adimensional)
 D_{AB} : coeficiente de difusão do tolueno na água ($\text{cm}^2.\text{s}^{-1}$)
 G_0 : velocidade mássica superficial ($\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$)
 v : velocidade intersticial média (m.s^{-1})
 Δz : elemento de altura da coluna de adsorção (m)
 Q : taxa volumétrica de escoamento do fluido ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$)
 D_L : coeficiente de dispersão axial ($\text{m}^2.\text{s}^{-1}$)
 c_b : concentração de ruptura (mg.L^{-1})
 c_d : concentração final de ruptura (mg.L^{-1})
 t_t : tempo correspondente à capacidade estequiométrica total do leito (h)
 t_u : tempo correspondente à capacidade útil do leito (h)
 H_t : altura total do leito (cm)
 H_b : altura de leito usada até o ponto de ruptura (cm)
 H_{UNB} : altura de leito não utilizada (cm)

Capítulo 1

Introdução

Os primeiros usos da adsorção são bastante antigos, remetendo a observações de que a água quando tratada com carvão vegetal apresentava melhor sabor. A habilidade de certos materiais de remover coloração de soluções foi conhecida no século XV e carvão de osso foi usado comercialmente para a descoloração de soluções de açúcar no século XVIII. No meio do século XIX, o carvão vegetal foi usado em respiradores em hospitais para a purificação do ar e a primeira operação em larga escala aconteceu em 1920.

A operação de adsorção é largamente utilizada na indústria, principalmente, para a purificação de água potável, tratamento de correntes de efluentes contaminadas com baixas concentrações de contaminantes orgânicos, recuperação de solventes, entre outras aplicações. Atualmente, esta operação vem sendo cada vez mais usada como uma técnica de separação, principalmente para a separação de misturas como N_2/O_2 e O_2/N_2 por meio de zeólitas e peneiras molecular de carvão, e de misturas de hidrocarbonetos por meio de zeólitas.

Um tipo comum e barato de adsorvente que tem grande afinidade com compostos orgânicos é o carvão ativado granular. Este é indicado como adsorvente para a eliminação de compostos orgânicos voláteis, como o tolueno, através da adsorção em leito fixo e este foi usado como adsorvente neste trabalho.

Duas abordagens são possíveis quando há o interesse de realizar o projeto de adsorvedores de leito fixo. A primeira abordagem consiste na escolha de um modelo apropriado que descreva o processo. Para tanto, neste caso, há a necessidade de conhecer um ou mais coeficientes da transferência de massa (k_s , k_f , K_f , K_s) e a difusividade do soluto no sólido (D_s). Para a determinação de D_s há a necessidade da realização de testes cinéticos em banho agitado. A estimação dos coeficientes como k_f pode ser feita usando correlações da literatura. No segundo tipo de abordagem, é realizada uma análise completamente empírica, na qual são realizados diversos experimentos em coluna de adsorção para a obtenção de curvas de ruptura, nos quais podem-se variar diversos parâmetros como altura de leito e vazão, para determinar a altura da zona onde ocorre a transferência de massa.

A realização de experimentos para a obtenção de dados de curvas de ruptura e, posterior análise matemática desses dados, obtendo modelos que possam prever o

comportamento destas curvas, se apresenta como uma análise completa da operação de adsorção como um todo. Espera-se que a posta em marcha da unidade de adsorção em leito fixo do Departamento de Engenharia Química da UFRGS, as investigações teóricas e o trabalho experimental realizados se constituam em uma base sólida para esses estudos.

Em vista do exposto e observando que na literatura há deficiência de dados quanto ao processo de adsorção de tolueno em solução aquosa em leito fixo de carvão ativado, este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de uma metodologia experimental em uma planta piloto de adsorção para o estudo deste sistema e posterior análise dos dados por meio da abordagem matemática.

A estrutura da dissertação é apresentada a seguir, e ela é estruturada dessa forma para a melhor compreensão do leitor.

No capítulo 2 apresentam-se os fundamentos teóricos da operação de adsorção, principalmente voltada para a adsorção em meio líquido. São apresentados, também, alguns dos trabalhos mais relevantes relacionados com o presente trabalho, enfocando os principais resultados obtidos para posterior comparação.

No capítulo 3 é apresentada a metodologia utilizada neste estudo da operação de adsorção de tolueno em solução aquosa envolvendo os métodos para caracterização do carvão, realização de estudos de equilíbrio, cinéticos e de adsorção em leito fixo.

No capítulo 4 são apresentados os resultados do trabalho experimental e estes são comparados com os trabalhos da literatura.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões e algumas sugestões para trabalhos futuros.

No apêndice A é apresentada a configuração da interface gráfica utilizada para o monitoramento da planta e para a aquisição de dados dos testes de adsorção na planta piloto.

No apêndice B são apresentados os demais resultados obtidos no presente trabalho.

Capítulo 2

Fundamentos Teóricos e Revisão Bibliográfica

A adsorção em carvão ativado tem sido reconhecida como uma das operações mais versáteis a ser usada no tratamento de água potável e águas residuárias com baixas concentrações de compostos orgânicos. Para o projeto de unidades de adsorção com carvão ativado e para o desenvolvimento de modelos matemáticos que possam descrever sua operação, as informações relativas ao comportamento do par adsorvente/adsorvato e o conhecimento de parâmetros como coeficientes de transferência de massa na fase líquida (k_f) e na fase sólida (k_s) e de difusividade mássica na fase sólida (D_s) necessitam ser estudados. Com este objetivo, neste capítulo são apresentados os fundamentos teóricos dos assuntos abordados neste estudo, sempre seguidos de revisão bibliográfica que inclui os principais trabalhos publicados. A estrutura deste capítulo compreende, primeiramente, uma breve revisão sobre o processo de adsorção, enfocando principalmente as características da adsorção em meio líquido, principais adsorventes comerciais, os mecanismos através do qual ocorre o processo de adsorção e suas aplicações. Posteriormente, os assuntos abordados serão mais dirigidos ao estudo em questão, enfocando a utilização de carvão ativado, especialmente granular, nos processos de adsorção, a importância da análise do comportamento estabelecido entre adsorvente/adsorvato, sua cinética e, finalmente, o estudo do processo de adsorção em leito fixo.

2.1 Adsorção

A adsorção é uma operação de separação na qual se utiliza a habilidade de alguns sólidos de acumularem, em suas superfícies, substâncias presentes em uma fase fluida (líquida ou gasosa). Os principais termos geralmente utilizados nos processos de adsorção e que serão também utilizados neste trabalho são: (1) adsorvente é o material sólido empregado para a separação de uma ou mais substâncias da fase fluida e, (2) adsorvato que são as substâncias a serem adsorvidas (DABROWSKI, 2001; EVERETT, 2001; LEVAN, CARTA e YON, 1997).

Nas operações de adsorção é necessário distinguir a adsorção química e a adsorção física. O primeiro tipo é aquele em que as forças envolvidas são forças de valência que estão presentes na formação de compostos químicos e é um processo freqüentemente

irreversível. Já a adsorção física é aquela em que as forças envolvidas são forças intermoleculares (forças de Van der Waals) e que não envolve significativa mudança no orbital eletrônico das espécies envolvidas. Como este tipo de adsorção é o envolvido neste trabalho, algumas características mais relevantes dessa são apresentadas a seguir:

- o fenômeno é geral e pode ocorrer em qualquer sistema sólido-fluido, devido à ocorrência de certas interações moleculares, surgindo de propriedades geométricas ou eletrônicas particulares do adsorvente e/ou adsorvato;
- a perturbação no estado eletrônico do adsorvente e do adsorvato é mínima;
- as espécies adsorvidas são quimicamente idênticas àquelas que estão na fase fluida; dessa forma, a natureza química do fluido não é alterada pela adsorção e, subseqüentemente, pela dessorção (LEVAN, CARTA e YON, 1997).

Existe um grande número de adsorventes comerciais, entre os quais se incluem adsorventes tradicionais como sílica gel, alumina ativada e carvão ativado e, também, como recentes desenvolvimentos, citam-se aluminossilicatos cristalinos ou zeólitas. No entanto, há diferenças fundamentais entre estes materiais, levando a significativas diferenças nas propriedades de adsorção e que são de fundamental importância na escolha do adsorvente. Entre as propriedades que afetam as características de adsorção podem-se citar: tamanho e distribuição de tamanho dos poros e afinidade química.

Nos adsorventes tradicionais existe uma distribuição no tamanho dos poros, o diâmetro médio e a variabilidade em torno desta média é dependente do processo de manufatura e, dessa forma, estes tipos de adsorventes são comumente chamados de heterogêneos. Em contraste, o tamanho do poro de zeólitas adsorventes é controlado pela estrutura cristalina e existe um único tamanho de poro e por estes motivos são chamados de homogêneos (RUTHVEN, 1984).

Não só a distribuição, mas, também, o tamanho dos poros dos adsorventes é de essencial importância na operação de adsorção e a acessibilidade a estes depende do tamanho das moléculas do fluido que se deseja separar. A classificação quanto ao tamanho dos poros define como microporos aqueles que não excedem 2,0 nm (20 Å); mesoporos os poros que estão na faixa de 2 nm a 50 nm e macroporos os poros que são maiores do que 50 nm (DABROWSKI, 2001; EVERETT, 2001; GEANKOPLIS, 1995).

Também é de fundamental importância a existência de afinidade entre o adsorvato e o adsorvente. Geralmente, a superfície do adsorvente é tanto química como fisicamente

heterogênea e, devido a este fato, as energias de ligação podem variar amplamente de um sítio para outro acarretando uma adsorção não uniforme (EVERETT, 2001; LEVAN, CARTA e YON, 1997).

Geralmente, os sistemas de adsorção mostram que, com o aumento de temperatura, a quantidade de material adsorvido pelo adsorvente diminui de maneira considerável. Isto é útil uma vez que a adsorção pode-se efetuar em temperatura ambiente e a dessorção pode realizar-se pelo aumento de temperatura (COONEY, 1999).

Há duas formas principais de operação de processos de adsorção; a primeira é realizada colocando-se carvão na forma de pó (faixa granulométrica de 100 – 325 mesh) em tanques agitados contendo o fluido a ser tratado, e deixando-se em contato tempo suficiente para a remoção dos contaminantes, levando o carvão à saturação. Nesta forma de operação o carvão após uso não é regenerado. A segunda forma é a adsorção em leito fixo de carvão granulado (faixa granulométrica de 8 – 50 mesh). Nesta operação, o fluido é alimentado continuamente ao leito passando através deste e as partículas sólidas adsorvem componentes do fluido. Quando o leito está próximo a saturar-se, o fluxo através deste é interrompido e o leito é regenerado por algum método conveniente, de forma que a adsorção possa ser realizada novamente, de acordo com os parâmetros de processo (COONEY, 1999).

A adição direta de carvão em vasos agitados ou em leito fluidizado é eficiente para a remoção de compostos orgânicos da corrente a ser tratada, mas quando comparada à adsorção com carvão granular em leito fixo, verifica-se que esta última é mais vantajosa no que se refere à menor perda de adsorvente durante o processo com a formação de “lama” e à facilidade de operação (CHERN e CHIEN; 2001, 2002).

As aplicações práticas fundamentais da adsorção e as áreas relacionadas são as seguintes: (1) separação e purificação de misturas líquidas e gasosas, substâncias químicas, isômeros e ar; (2) gases de secagem e líquidos antes de alimentá-los em sistemas industriais; (3) remoção de impurezas de meios líquidos e gasosos; (4) recuperação de produtos químicos e gases de ventilação e (5) purificação de água. O processo de adsorção usando carvão ativado granular em fase líquida tem se mostrado como de alta eficiência para a remoção de corantes, odores e demais poluentes orgânicos em vários processos de manufatura de produtos, bem como no tratamento de efluentes. (DABROWSKI, 2001).

Dentre estas aplicações, a recuperação de solventes por adsorção de correntes de efluentes é de grande importância, pois o seu descarte no ambiente configura-se como um grande desperdício econômico, já que recuperados estes podem ser reutilizados no processo industrial. Além disso, os solventes possuem alta volatilidade e podem criar problemas inaceitáveis se estes forem emitidos para o meio ambiente, constituindo riscos para a saúde, uma vez que muitos deles são cancerígenos e/ou tóxicos, além de poderem causar incêndios e explosões. Atualmente há o aumento notável no nível de substâncias orgânicas sintéticas em amostras de águas públicas (CHATZOPOULOS, VARMA e IRVINE; 1993; DABROWSKI, 2001; LI, QUINLIVAN e KNAPPE; 2002).

A remoção de compostos orgânicos voláteis (*volatile organic compounds* – VOC) é de grande interesse para a manutenção da qualidade do ar e das águas. Existem diversos processos que são utilizados para evitar a poluição por VOC, tais como a oxidação fotocatalítica e a adsorção, sendo que esta última é uma das mais utilizadas. O tolueno é um composto orgânico volátil normalmente encontrado em águas residuárias provenientes de plantas industriais ou da limpeza de tanques de armazenamento de gasolina. Efluentes contendo este composto podem ser tratados utilizando a adsorção com carvão ativado e este processo vem sendo estudado tanto em fase gasosa (BENKHEDDA et al., 2000; YUN e CHOI, 1997) como em fase líquida (CHATZOPOULOS, VARMA e IRVINE; 1993; HINDARSO et al., 2001).

Sendo o foco deste trabalho a adsorção física, o termo adsorção será, por simplicidade, utilizado em lugar de adsorção física. Neste trabalho será estudada a adsorção de tolueno em fase líquida em um leito fixo de carvão ativado granular.

2.2 Carvão ativado granular

O carvão ativado é amplamente usado para a remoção de compostos orgânicos em água potável e efluentes industriais. Tanto o carvão ativado pulverizado quanto o granular são empregados e a qualidade destes é tipicamente avaliada pelo número de iodo ou pela área superficial fornecida pela isoterma BET (que será abordada no item 2.4 sobre isotermas de equilíbrio) obtida pela adsorção de nitrogênio a 77 K (LI, QUINLIVAN e KNAPPE, 2002). Este adsorvente é um material microcristalino produzido pela decomposição térmica de madeira e de outros materiais vegetais, como de cascas, de carvão, etc, seguida pela ativação com vapor ou dióxido de carbono a elevada temperatura. Eles são elaborados de tal forma que tenham uma imensa rede de poros interna e grande área superficial interna total. A estrutura do carvão ativado consiste de grafites

microcristalinos elementares, mas a sua disposição é randômica e os espaços entre os cristais dão origem aos poros. Os carvões geralmente têm área superficial entre 300 a 1200 m².g⁻¹, com diâmetros médios de poros compreendidos entre 10 a 60 Å. A superfície do carvão é essencialmente apolar, embora uma polaridade muito pequena surja da oxidação da superfície. Como resultado, os carvões tendem a ser hidrofóbicos e organofílicos. Eles têm ampla utilização na adsorção de orgânicos, na descoloração de açúcar, na purificação de água e na recuperação de solventes. Para diminuir a resistência à transferência de massa, o carvão ativado usado para adsorção em fase líquida, geralmente, possui poros de diâmetros maiores do que os usados para adsorção em fase gás (GEANKOPLIS, 1995; RUTHVEN, 1984).

Um tipo de estudo que vem sendo bastante realizado é a procura por novas alternativas de subprodutos, que existam em abundância e que possam dar origem a carvões ativados com boa capacidade de adsorção. Com este objetivo, Bansode *et al.* (2003) investigaram a efetividade no processo de adsorção de VOC, em batelada agitada, utilizando carvões ativados granulares, 10 x 20 mesh, produzidos a partir de cascas de noz pecan (ativados usando vapor, dióxido de carbono ou ácido fosfórico) e, de amêndoa (ativado por ácido fosfórico) comparando-os com outros carvões ativados comerciais. Os estudos indicaram que a ativação do carvão de casca de noz pecan por vapor ou dióxido de carbono levou a capacidades superiores na adsorção total de VOC, quando comparada com a ativação por ácido fosfórico para os dois carvões produzidos por este método. O carvão de casca de noz pecan ativado por vapor obteve a maior capacidade de adsorção total de VOC, quando comparado com os demais carvões usuais e uma capacidade de adsorção similar a dois carvões comerciais, obtidos a partir de casca de côco e, maior capacidade de adsorção em relação a um carvão comercial, produzido a partir de carvão mineral. Uma análise multivariável, que se baseou nas propriedades físicas, químicas e de adsorção, mostrou que os carvões produzidos a partir de casca de noz pecan e ativados por vapor ou dióxido de carbono agruparam-se com os três carvões comerciais, indicando que os carvões produzidos podem ser usados como uma alternativa potencial na adsorção de VOC em meios aquosos.

Como a adsorção em carvão ativado de um composto químico é o resultado de uma complexa inter-relação que depende tanto das propriedades do adsorvato e do adsorvente, como dos fatores externos, diversos autores estudaram a influência destas características no processo de adsorção. A influência do pH na adsorção de ácidos aromáticos em carvão ativado foi estudada por Ward e Getzen (1970). Estes verificaram a diminuição na quantidade de ácido removido da solução quando o pH passava de 3 para 7 e de 7 para 11,

indicando que há um aumento na adsorção à medida que a concentração das espécies moleculares aumentam e que as das espécies iônicas diminuem. Este acréscimo na adsorção na região ácida é explicado em termos do aumento da adsorção específica do íon resultante do aumento da concentração de prótons quando o pH é baixado e uma subsequente alteração nas propriedades da superfície do carvão. Também verificaram que o máximo da adsorção é alcançado próximo ao ponto em que o pH é igual ao pKa dos compostos estudados. Chern e Chien (2001; 2002), em trabalhos com ácido benzóico e p-nitrofenol, respectivamente, verificaram que para ambas as substâncias havia a diminuição da capacidade máxima de adsorção à medida que o pH aumentava.

2.3 Análise espectrofotométrica

Para a análise da concentração das soluções nos ensaios de adsorção, as técnicas de análise mais usuais são cromatografia gasosa, cromatografia líquida ou espectroscopia. No presente trabalho será utilizada a análise espectrofotométrica para a quantificação da concentração do tolueno nas soluções aquosas. Esta análise se fundamenta no fato de que a maioria dos compostos orgânicos e vários íons inorgânicos e complexos absorvem radiação na região de ultravioleta a visível (UV-VIS). Um gráfico desta absorção pelo composto contra o comprimento de onda é chamado de espectro de absorção e, este possui uma forma que é característica de um composto particular ou classe de compostos. A espectrometria por absorção é uma técnica não destrutiva e é extremamente sensível, sendo, então, ideal para a caracterização de pequenas concentrações de compostos. A mais importante aplicação dessa técnica é na medida de traços de compostos que estão na presença de altas concentrações de outros compostos, se existir diferença suficiente nos seus espectros de absorção. Esta técnica é bastante adequada para soluções diluídas e, assim, a solubilidade em um solvente é um pré-requisito para a medida precisa da absorção da amostra (KNOWLES e BURGESS, 1984).

Quando a radiação empregada nestes aparelhos encontra um átomo ou molécula, ocorre uma interação entre a radiação e os elétrons desses compostos. Este processo é bastante específico e resulta em uma atenuação da radiação e em um aumento na energia dos elétrons do átomo ou molécula. Isto pode ser considerado como a promoção de um elétron de um estado de energia normal para um estado de energia mais alto (estado excitado). Estes níveis são separados por um incremento de energia, E em J, que é determinado pela natureza do átomo ou molécula, e somente parcelas de radiação de energia E podem ser absorvidas e estas são denominadas pelo termo *quantum* e estão

relacionadas com a frequência, η (Hz), e com o comprimento de onda, λ (nm), da radiação através da Equação 2.1 (KNOWLES e BURGESS, 1984),

$$E = h\eta = \frac{h\zeta}{\lambda} \times 10^{-9} \quad (2.1)$$

onde h é a constante de Planck ($6,63 \cdot 10^{-34}$ J.s) e ζ é a velocidade da luz ($2,998 \cdot 10^8$ m.s⁻¹).

Os espectros UV-VIS possuem diversos picos e estes têm alturas características que podem servir como uma ajuda adicional para a identificação e formar a base para os ensaios quantitativos. Quando a radiação passa através da solução de um composto, esta é reduzida em intensidade por cada molécula que é encontrada de acordo com uma lei exponencial. A quantidade de radiação absorvida por uma solução é, então, uma função exponencial da concentração da solução e da espessura da camada de solução que a radiação passa; na prática é a quantidade da radiação transmitida pela solução que é medida, que é expressa em transmitância (Equação 2.2) (KNOWLES e BURGESS, 1984) por

$$-\log_{10} \tau = \log_{10} \frac{I}{I_0} \propto bc \quad (2.2)$$

onde τ é a transmitância da solução, I_0 é a intensidade da radiação incidente e I a intensidade com que deixa a solução cujo caminho óptico é b (cm) e concentração c (mol.L⁻¹). A absorvância (A) ou densidade óptica da solução é definida pelo termo $\log_{10} I_0/I$ e, esta relação é chamada de Lei Beer-Lambert-Bouguer ou simplesmente Lei de Beer (Equação 2.3), dada por

$$A = -\log_{10} \tau = \gamma bc \quad (2.3)$$

onde A é a absorvância de um comprimento de onda particular e é adimensional; a constante de proporcionalidade (γ) é denominada absorvidade molar a um específico comprimento de onda e tem unidade de M⁻¹.cm⁻¹ (M é a molaridade ou massa molar expressa em g.L⁻¹). Portanto, a Lei de Beer relaciona a absorvância da solução ao um caminho óptico e à concentração de soluto (KNOWLES e BURGESS, 1984).

A **Figura 2.1** apresenta o espectro de UV do tolueno. No eixo das abscissas tem-se o comprimento de onda (λ , nm) e no eixo das ordenadas, o logaritmo de γ , que é a absorvidade molar. Neste espectro pode-se notar que o pico mais intenso é no comprimento de onda de 261 nm; portanto, é preferível para a quantificação da concentração deste composto a utilização deste comprimento para as medidas de

absorbância. Já o comprimento de onda de 206 nm, que é citado por diversos autores (CHATZOPOULOS, VARMA e IRVINE, 1993; HINDARSO et al., 2001) para a análise de tolueno, não aparece neste espectro. Pode-se utilizar o comprimento de onda de 254 nm para a análise de tolueno como uma alternativa, já que este é o comprimento indicado para a análise de benzeno e compostos que contenham o anel aromático. A planta piloto de adsorção que será utilizada no presente estudo dispõe de um espectrofotômetro *on-line* que analisa soluções que absorvam neste comprimento de onda, 254 nm. Para o caso de estudos de adsorção, que são processos, geralmente, longos, é possível o acompanhamento da concentração da solução de efluente em todo o período de operação, com medidas rápidas e confiáveis. A desvantagem deste equipamento seria no caso de estudar-se uma solução multicomponentes em que mais de um soluto absorvesse radiação no comprimento de onda de 254 nm. Para este possível caso, uma metodologia alternativa deveria ser investigada.

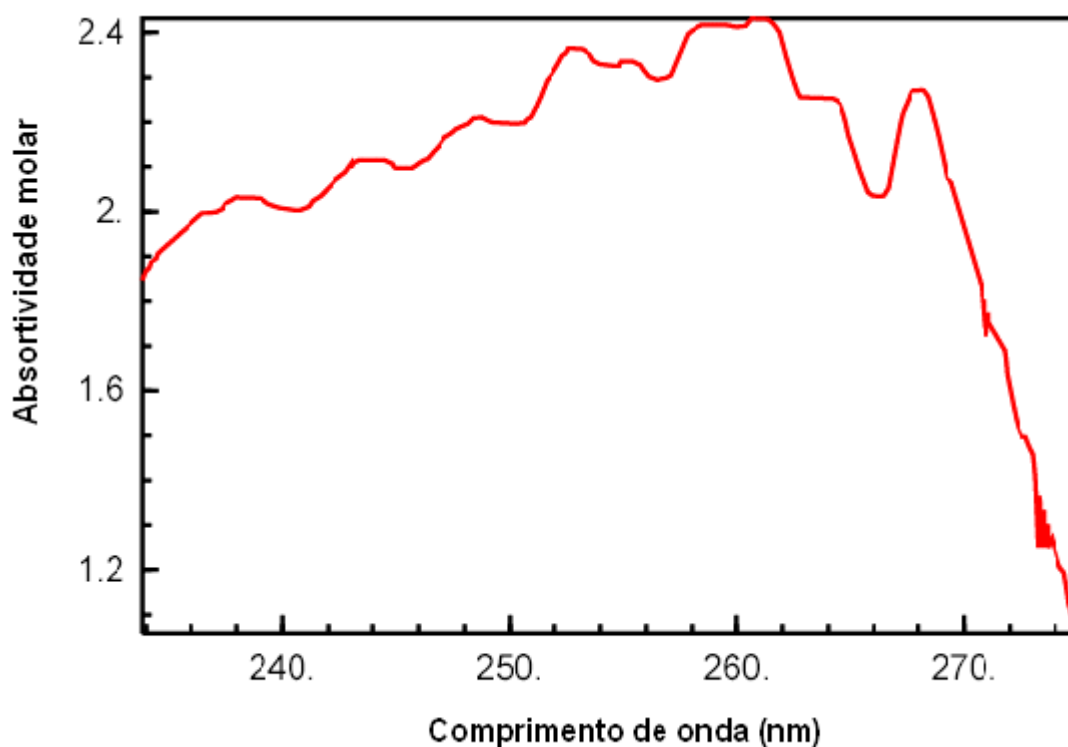


Figura 2.1: Espectro UV/VIS de tolueno.
Fonte: NIST Chemistry WebBook (<http://webbook.nist.gov/chemistry>).

2.4 Isotermas de equilíbrio

O equilíbrio entre a concentração de um soluto em uma fase fluida e sua concentração no sólido acontece quando a taxa em que as suas moléculas são adsorvidas na superfície é igual a taxa em que elas deixam a superfície (GEANKOPLIS, 1995).

Os ensaios de equilíbrio são realizados para se conhecer o comportamento do par adsorvente/adsorvato em estudo, definir a capacidade de adsorção e a forma da isoterma de equilíbrio. Nestes testes de adsorção em batelada, uma quantidade de adsorvente de massa conhecida (W) é misturada em um volume (V) de uma solução de concentração inicial de soluto c_0 . A mistura de adsorvente e solução é mantida sob agitação e depois de alcançado o equilíbrio de adsorção, a concentração final do soluto na solução é c_e (é denominada de concentração de equilíbrio) e a concentração de soluto no carvão é q_e . O balanço de massa para este sistema é dado pela Equação 2.4 (COONEY, 1999),

$$q_e W = V(c_0 - c_e) \quad (2.4)$$

onde q_e é a concentração de soluto no sólido no equilíbrio e c_e é a concentração de soluto no líquido no equilíbrio; V e W são expressos em mg.g^{-1} , mg.L^{-1} , L e g , respectivamente.

Podem-se gerar vários valores de c_e em diferentes testes pelo uso de diferentes massas de adsorvente em cada recipiente, mantendo-se constante a concentração inicial da solução e a temperatura. Geralmente, separa-se o adsorvente da solução depois do equilíbrio ser alcançado, utilizando uma membrana filtrante ou por centrifugação, e analisa-se o sobrenadante para a determinação da concentração de equilíbrio. Conhecidos c_e , c_0 , V e W de cada amostra pode-se calcular o valor de q_e pelo balanço de massa. Plotando-se os pares de valores de q_e e c_e (q_e na ordenada e c_e na abscissa) obtém-se o gráfico de isoterma de adsorção. Diversos modelos têm sido propostos para descrever resultados de equilíbrio de adsorção e o mais importante para a seleção do modelo do ponto de vista de engenharia é ter boa descrição matemática na faixa integral das condições de processo. Entre estes citam-se as equações de isotermas lineares, isoterma de Langmuir, isoterma de Freundlich entre outras (COONEY, 1999; LEVAN, CARTA e YON, 1997).

De acordo com a forma da isoterma de equilíbrio, três possíveis classificações existem (**Figura 2.2**), se ela possuir a forma côncava, esta, normalmente, é denominada desfavorável, se ela possuir a forma convexa ela, normalmente, é denominada favorável e por fim, na forma linear.

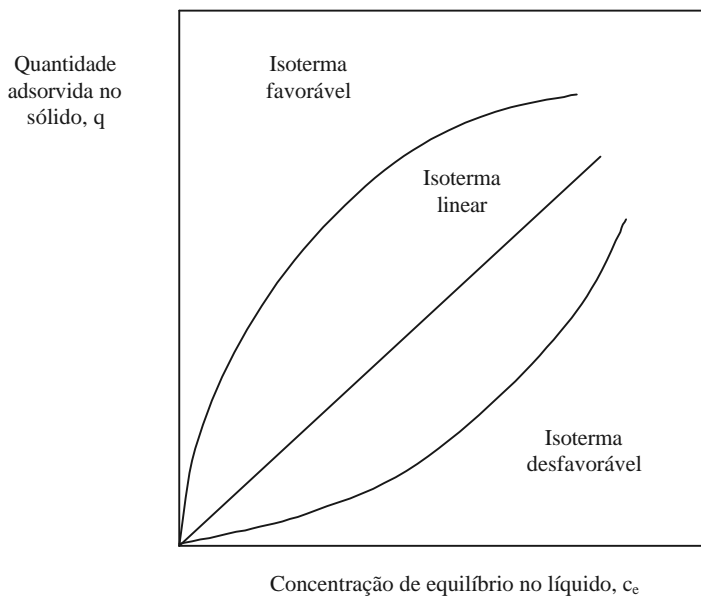


Figura 2.2: Formatos de isotermas de equilíbrio.
Fonte: Adaptado de Cooney (1999).

Os dados, que obedecem uma função linear, podem ser expressos pela Equação 2.5, também chamada de Lei de Henry para adsorção,

$$q = K_1 c_e \quad (2.5)$$

onde q é a concentração de soluto adsorvido no carvão no equilíbrio (mg.g^{-1}), c_e é a concentração de soluto na solução no equilíbrio (mg.L^{-1}) e K_1 (L.g^{-1}) é uma constante determinada experimentalmente. Esta isoterma linear não é comum, mas em uma região muito diluída pode-se usá-la com o propósito de aproximar os dados de muitos sistemas (GEANKOPLIS, 1995; LEVAN, CARTA e YON, 1997).

A Equação 2.6 apresenta a equação de Langmuir.

$$q = \frac{K_2 N_1 c_e}{1 + K_2 c_e} \quad (2.6)$$

onde N_1 é o máximo valor de q e, fisicamente, representa a concentração da espécie adsorvida na superfície, quando uma monocamada completa é alcançada (mg.g^{-1}) e K_2 é outra constante a ser determinada experimentalmente (L.mg^{-1}).

A equação de Langmuir é baseada em quatro importantes considerações. Primeiro, assume-se que a adsorção ocorre em um número fixo de sítios com localização bem definida na superfície. Segundo, que a cada sítio pode-se ligar apenas uma molécula da

espécie adsorvida. Terceiro, assume-se que a energia de adsorção (isto é, a força de ligação criada entre a superfície e a espécie adsorvida) é a mesma em todos os sítios e, quarto, assume-se que não há forças de interação entre moléculas adsorvidas adjacentes. Devido à existência de um número fixo de sítios por unidade de massa de adsorvente, a adsorção pode ocorrer somente até que todos estes estejam ocupados. Isto corresponde à condição de uma monocamada molecular completa de cobertura de adsorvato na superfície do adsorvente; portanto, assume-se que multicamadas não ocorrem (COONEY, 1999; RUTHVEN, 1984).

Outra equação bastante utilizada é a equação da isoterma de Freundlich (Equação 2.7), que é empírica, aproxima os dados para muitos sistemas de adsorção e é particularmente útil para líquidos,

$$q = k_1 c_e^{1/n_1} \quad (2.7)$$

onde n_1 é uma constante (adimensional) usualmente maior do que 1 e k_1 é expresso em $\text{mg}^{1-1/n_1} \cdot \text{L}^{1/n_1} \cdot \text{g}^{-1}$. Duas observações sobre a equação da isoterma de Freundlich devem ser mencionadas. Primeiro, neste modelo não há requerimento quanto à cobertura aproximar-se de um valor constante correspondente a uma monocamada completa. Adicionalmente, a forma da equação mostra que q pode continuar a aumentar sem limite com o aumento de c_e , o que implica que a equação de Freundlich pode falhar para altos valores de c_e . Esta equação normalmente correlaciona bem os dados experimentais para adsorventes heterogêneos em uma ampla faixa de concentração (COONEY, 1999; LEVAN, CARTA e YON, 1997; RUTHVEN, 1984).

A equação da isoterma BET é, geralmente, utilizada para a determinação da área superficial interna dos materiais porosos e ela foi resolvida pela primeira vez por Brunauer, Emmett e Teller (1938). Esta equação considera a formação de multicamadas de gás condensado, que pode ocorrer quando um gás adsorvível, como o nitrogênio, é colocado em contato com um sólido poroso. Em tal teste, normalmente, é utilizado o nitrogênio na temperatura que corresponde à temperatura de ebulição (-196°C). Dessa forma, a temperatura empregada é aquela na qual o nitrogênio mudaria de fase de líquido para gás, se a pressão (P) fosse igual a, exatamente, uma atmosfera (1 atm). No entanto, a pressão real que é utilizada no teste varia de praticamente zero (condições de alto vácuo) até em torno de 0,3 atm. À medida que a pressão sobe, mais e mais nitrogênio é adsorvido (COONEY, 1999).

A equação BET (Equação 2.8) foi derivada assumindo que, na primeira camada, a taxa de condensação de moléculas nos sítios vazios é igual à taxa de evaporação de moléculas daqueles cobertos por uma única molécula e que o calor de adsorção, além da primeira camada, é constante e igual ao calor de liquefação, obtendo-se:

$$\frac{q}{q_m} = \frac{b_1(P/P_s)}{(1 - P/P_s)(1 - P/P_s + b_1 P/P_s)} \quad (2.8)$$

onde P_s (atm) é a pressão de vapor de saturação na temperatura usada no teste, q ($\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$) é a quantidade de substância adsorvida na pressão P (atm), q_m ($\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$) é a quantidade de substância adsorvida quando uma camada monomolecular completa é obtida e b_1 é uma constante adimensional a ser determinada experimentalmente. Devido à natureza aproximada das considerações no modelo BET, a área computada pode não ser tão correta, mas, contanto que todos os pesquisadores concordem em usar o método BET como padrão, pelo menos, valores relativos de áreas de diferentes sólidos porosos serão relativamente corretas (COONEY, 1999).

Outra equação bastante utilizada para correlacionar os dados experimentais é a equação da isoterma de Toth (Equação 2.9), que possui três parâmetros a serem determinados. Normalmente, esta equação correlaciona melhor os dados de adsorção de gases do que de líquidos

$$q = \frac{N_2 c_e}{\left(1/K_3 + c_e^{m_1}\right)^{1/m_1}} \quad (2.9)$$

onde N_2 ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$) é a capacidade máxima de adsorção, K_3 ($\text{L}^m \cdot \text{mg}^{-m}$) é a constante de equilíbrio de adsorção e, m_1 é a constante do modelo (adimensional). A dependência da temperatura da equação de Toth é dada pelos parâmetros K_3 (Equação 2.10) e m_1 (Equação 2.11) (CHERN e CHIEN; 2001 e 2002; COONEY, 1999; HINDARSO *et al.*, 2001;).

$$K_3 = \exp\left(\frac{\Delta S}{R} - \frac{\Delta H}{RT}\right) \quad (2.10)$$

$$m_1 = m_0 + \alpha \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \quad (2.11)$$

onde R é a constante de gases ($\text{atm} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), T (K) é a temperatura absoluta da solução, ΔS ($\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) e ΔH ($\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$) são a variação de entropia e entalpia de adsorção, respectivamente; m_{01} e α são parâmetros a serem determinados e T_0 (K) é a temperatura de referência. A Equação 2.10 pode ser facilmente obtida, sabendo-se que a variação da

energia livre de Gibbs (ΔG , kJ.mol^{-1}) no processo de adsorção está relacionada com a constante de equilíbrio através da relação expressa na Equação 2.12, e que, de acordo com a termodinâmica, a mesma variação está relacionada com a variação de entropia e de entalpia de adsorção pela relação que é apresentada na Equação 2.13 (CHERN e WU, 2001)

$$\Delta G = -RT \ln K \quad (2.12)$$

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (2.13)$$

A equação de Sips (Equação 2.14), também conhecida como equação de Langmuir-Freundlich, normalmente, também é utilizada quando se têm sólidos heterogêneos, como é o caso do carvão ativado. Para descrever o processo de adsorção para uma ampla faixa de temperatura, tem-se que ter uma forma de descrever seu efeito na equação da isoterma. A introdução desta dependência é dada pelos parâmetros K_4 (L.mg^{-1}) (Equação 2.10) e m_2 (Equação 2.15).

$$q = \frac{n_2 (K_4 c_e)^{1/m_2}}{1 + (K_4 c_e)^{1/m_2}} \quad (2.14)$$

$$\frac{1}{m_2} = \frac{1}{m_{02}} + \frac{\beta_1}{T} (T - T_0) \quad (2.15)$$

onde n_2 (expresso em mg.g^{-1}), m_{02} e β_1 são constantes a serem determinadas experimentalmente (HINDARSO *et al.*, 2001).

Na Equação 2.16 é apresentado o modelo proposto por Radke e Prausnitz (1972).

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{a c_e} + \frac{1}{b_2 c_e^{\beta_2}} \quad (2.16)$$

onde a (L.g^{-1}), b_2 ($\text{L}^\beta \cdot \text{mg}^{1-\beta} \cdot \text{g}^{-1}$) e β_2 (adimensional) são constantes a serem determinadas experimentalmente. β_2 é um parâmetro que possui como restrição, ser menor que o valor unitário. Este modelo se reduz à Lei de Henry para adsorção a baixas concentrações e a altas concentrações ela se torna a equação de Freundlich. Além disso, para o caso especial em que o parâmetro β_2 é zero, o modelo se reduz à equação de Langmuir. Eles observaram que este modelo é adequado para a descrição do equilíbrio de adsorção para solutos orgânicos em soluções aquosas diluídas, não importando se estes solutos são completamente miscíveis ou não e se estão abaixo ou acima de ponto de ebulição. Neste trabalho, eles verificaram que o modelo apresentou muito boa correlação no estudo de

equilíbrio para propionitrila e 2-propanol (a 0, 25 e 70 °C) e para acetona, p-cresol e p-clorofenol (a 25 °C).

Outros modelos que são utilizados para correlacionar dados de equilíbrio são as equações de Fritz-Schluender (Equação 2.17),

$$q = \frac{K_5 N_3 c_e}{1 + N_3 c_e^{m_3}} \quad (2.17)$$

onde as constantes K_5 , N_3 e m_3 , a serem determinadas experimentalmente, têm como unidades $\text{mg}^{m_3} \cdot \text{L}^{1-m_3} \cdot \text{g}^{-1}$, $\text{L}^{m_3} \cdot \text{mg}^{-m_3}$ e adimensional, respectivamente, e a equação UNILAN (Equação 2.18),

$$q = \frac{N_4}{2s} \ln \left(\frac{1 + K_6 c_e^s}{1 + K_7 c_e^{-s}} \right) \quad (2.18)$$

onde N_4 , s , K_6 e K_7 são constantes a serem determinadas experimentalmente e têm como unidades adimensional, adimensional, $\text{L}^s \cdot \text{mg}^s$ e $\text{L}^{-s} \cdot \text{mg}^{-s}$, respectivamente.

Os modelos de Fritz-Schluender, de Toth e de Sips se reduzem ao modelo de Langmuir, quando m é igual ao valor unitário, assim como o modelo UNILAN, quando s é igual a zero. O modelo de Fritz-Schluender também se reduz ao modelo de Freundlich a altas concentrações (CHERN e WU, 2001).

Os modelos anteriormente citados são os mais amplamente utilizados nos estudos para correlacionar os dados de isotermas de equilíbrio. Dada a sua importância na análise e no projeto dos processos de separação por adsorção, os dados de isotermas de equilíbrio de compostos orgânicos em diversos sistemas vêm sendo obtidos por diversos pesquisadores (BENKHEDDA *et al.*, 2000; CHATZOPOULOS, VARMA e IRVINE; 1993; CHERN e CHIEN; 2001; HINDARSO *et al.*, 2001; PIRES *et al.*, 2003; YUN e CHOI, 1997).

No estudo do processo de adsorção de tolueno e benzeno do ar em carvão ativado, Yun e Choi (1997) obtiveram boa correlação dos dados experimentais utilizando a equação de UNILAN, que é uma equação geralmente utilizada quando se trabalha com adsorventes heterogêneos, nas temperaturas de 30, 40, 50, 60 e 70 °C e pressão acima de 7 kPa para benzeno e 2 kPa para tolueno. Ambos os compostos apresentaram curvas de isoterma convexa e observou-se que a capacidade máxima de adsorção do benzeno é maior do que para o tolueno. Os erros médios relativos do modelo UNILAN, ajustados a partir dos dados

experimentais da adsorção para benzeno, apresentaram valores na faixa de 0,991 a 2,106% e, para tolueno, na faixa de 0,347 a 1,583 %.

Benkhedda *et al.* (2000) obtiveram dados de isoterma de equilíbrio de adsorção de tolueno em fase gasosa, utilizando nitrogênio como gás de arraste, a partir das curvas de ruptura a 25 e 35 °C. O equipamento consistia de uma coluna com altura de 290 mm e diâmetro interno de 19 mm. Cada experimento foi conduzido utilizando 3 g de carvão que foi colocado no meio da coluna. No topo e no fundo da coluna foram colocadas esferas de vidro. A temperatura da coluna foi mantida constante, ± 1 K, pela utilização de um banho termostático. Antes do início do experimento, o gás que entra na coluna era analisado por cromatografia gasosa. Quando a composição do gás se tornava constante, o experimento de adsorção tinha início. O gráfico da concentração de tolueno na corrente efluente pelo tempo foi utilizado, então, para obter a capacidade de adsorção a partir da integração numérica da área da curva de ruptura. No mesmo trabalho, dados de isotermas também foram obtidos a 45 e 55 °C, usando uma microbalança. O equipamento consistia de uma microbalança de suspensão eletromagnética instalada para uma medida precisa das taxas de difusão dos vapores de tolueno em carvão ativado. O sistema era evacuado por uma bomba de vácuo e, então, a fonte de vapor de tolueno era conectada à câmara de adsorção. A massa era monitorada como uma função do tempo com um computador. Os valores de massa a cada segundo foram obtidos pela média de cinco valores de massa adquiridos a cada intervalo de 0,2 s. O carvão ativado utilizado (AC 40, CECA S.A.), em ambos os experimentos, tinha a forma de pellets (2 mm de diâmetro, 2 a 3 mm de altura), com área superficial interna de $1,3 \cdot 10^6$ m².kg⁻¹ e as isotermas obtidas apresentaram formato convexo (favorável). As equações de isoterma testadas foram Langmuir, Toth, Freundlich e Dubinin, sendo que as três últimas citadas levam a boas correlações dos dados obtidos, com desvios relativos médios menores, quando comparadas com a equação de Langmuir.

Chatzopoulos, Varma e Irvine (1993) investigaram a adsorção e a dessorção de tolueno em solução aquosa por carvão ativado (F-300, Calgon Co.). Os experimentos de isotermas de adsorção foram realizados na temperatura de 25 ± 1 °C e, preliminarmente, para acelerar o estabelecimento do equilíbrio, o carvão ativado foi pulverizado (200 X 325 mesh, ou 0,074 X 0,043 mm) e previamente enxaguado com água ultrapura (Milli-Q). Neste teste, foi verificado que o equilíbrio era alcançado em poucas horas (não mencionado quanto) sem apreciável decréscimo da concentração bulk de tolueno até 7 dias de experimento. Com este teste preliminar, foram capazes de selecionar a faixa de 24-36 h como a de duração dos experimentos de isotermas de adsorção com carvão granular (20 X 25 mesh), trabalhando com concentrações de 0,7 a 50 mg.L⁻¹. Também realizaram

estudos da taxa de adsorção e dessorção em recipientes herméticos e estudos de isotermas de dessorção. No estudo das isotermas de adsorção, estas apresentaram formato convexo, ou seja, favorável. Os autores obtiveram para a equação de Langmuir uma regressão insatisfatória, com considerável desvio a altas concentrações e desvio ligeiramente menor a baixas concentrações. Já para a isoterma de Freundlich, obtiveram excelente regressão, mas necessitaram-se de diferentes representações de isotermas a cada uma de três faixas de concentrações trabalhadas ($c_e < 1,35 \text{ mg.L}^{-1}$, $1,35 < c_e < 25 \text{ mg.L}^{-1}$ e $c_e > 25 \text{ mg.L}^{-1}$), sendo que o uso de uma única correlação para descrever toda a faixa de concentrações ($0,7 < c_e < 50 \text{ mg.L}^{-1}$) proporcionou pior correlação. Os dois modelos de três parâmetros estudados correlacionaram melhor os dados experimentais, com uma única representação de equação de isoterma para toda a faixa de concentrações, sendo que a equação de Toth apresentou regressão um pouco melhor do que a equação de Radke-Prausnitz. Apesar desta boa correlação, nenhuma destas conseguiu representar satisfatoriamente a porção que apresentava o patamar da curva (parte constante). Finalmente, testaram a equação de Fritz-Schlünder, de quatro parâmetros, que proporcionou a melhor correlação dos dados.

HINDARSO *et al.* (2001) estudaram a adsorção em fase aquosa de benzeno e tolueno em carvão ativado granular nas temperaturas de 30, 40 e 50 °C. Utilizaram carvão betuminoso na faixa granulométrica de 20x50 mesh (Calgon Carbon). As faixas de concentração das soluções em estudo foram 100-550 mg.L^{-1} e 50-450 mg.L^{-1} para benzeno e tolueno em água, respectivamente, com incerteza na concentração inicial da solução de $\pm 0,1 \text{ mg.L}^{-1}$. Para a correlação dos dados de isotermas de equilíbrio da adsorção em fase líquida, os autores utilizaram as equações de Langmuir, Freundlich, Sips (também conhecida como equação de Langmuir-Freundlich) e Toth. A forma da isoterma de equilíbrio para ambos os casos foi convexa. As duas primeiras equações citadas apresentaram resultados insatisfatórios para os dados experimentais obtidos. A equação de Freundlich falhou na representação dos dados de equilíbrio a baixas concentrações, e os autores atribuíram isto ao fato de que a equação de Freundlich não incorpora a Lei de Henry. Já a equação de Langmuir mostrou uma regressão bastante pobre, com um RMS (*root mean square percent error*) de 13,74 % e 14,13 %, para benzeno e tolueno, respectivamente, com divergência positiva a altas concentrações. As equações de isotermas de equilíbrio que melhor correlacionaram os dados experimentais foram as equações de Toth e Sips, que são geralmente utilizadas quando se trabalha com adsorventes heterogêneos, como o carvão ativado; possuem parâmetros que são dependentes da temperatura e são de grande importância para a descrição de dados de equilíbrio de adsorção em uma faixa de temperaturas. O RMS para estas duas equações apresentou ordem de grandeza de 10^{-1} % para ambos os compostos.

Chern e Chien (2001) estudaram, como parte de seu trabalho de adsorção em leito fixo, as isotermas de adsorção para ácido benzóico em solução aquosa em carvão ativado, na faixa de temperatura de 25-55 °C e na faixa de pH de 2-8. A curva de dados experimentais apresentaram formato de isoterma de equilíbrio favorável. Utilizaram como modelos para correlacionar os dados experimentais as equações de Langmuir, Freundlich, Redlich-Peterson e Toth; todas, com exceção da equação isoterma de Langmuir, apresentaram bons coeficientes de correlação nos testes com pH natural das soluções. O efeito do pH nas isotermas de adsorção foi avaliado na temperatura de 25°C. O modelo de Toth (Equação 2.9) apresentou uma boa regressão para todos os dados e dois dos parâmetros deste modelo (constante de equilíbrio de adsorção e constante de dissociação) apresentam a tendência clara de independência do pH da solução, contudo o máximo da capacidade de adsorção diminui com o aumento do pH da solução através de uma relação quadrática em função do pH. Apesar do modelo de Toth ter mostrado melhor adequação aos dados experimentais, os autores utilizaram para o estudo das curvas de ruptura, no mesmo trabalho, o modelo de Freundlich que teve um bom coeficiente de correlação, uma vez que o modelo de Toth não pode ser expresso como uma função explícita da concentração da fase estacionária.

Chern e Chien (2002) realizaram outro estudo sobre a adsorção em solução aquosa de p-nitrofenol em carvão ativado granular na temperatura de 25°C. Neste caso, os dados experimentais também apresentaram formato de curva de isoterma favorável. Utilizaram para correlacionar os dados de equilíbrio as equações de isotermas de Langmuir, Freundlich e Redlich-Peterson, sendo que estas duas últimas foram as que melhor descreveram estes dados. Adicionalmente, realizaram estudo de isotermas variando a temperatura (25, 35, 45 e 55 °C) e o pH (4, 6 e 8). Observaram a diminuição na quantidade adsorvida à medida que se aumentou a temperatura. Quando realizaram o ajuste dos dados de adsorção com vários modelos de isotermas, verificaram que os parâmetros destes modelos variavam conforme modificava-se a temperatura da solução, sem uma tendência específica. O modelo que melhor representou os dados com a variação de temperatura das soluções foi o de Toth, uma vez que a constante de equilíbrio deste modelo é a única que varia com a temperatura. Nos testes em que se variou o pH, propuseram um modelo que considerava somente que a capacidade de adsorção máxima varia com o pH, aumentando com a diminuição do mesmo, e dessa forma ajustaram um modelo de cinco parâmetros com a equação de Toth.

2.5 Coeficiente de difusão mássica no sólido e taxas de transferência de massa

Para a adsorção de um soluto na superfície porosa de um adsorvente, os seguintes passos são requeridos: (1) transferência de massa do soluto do seio do fluido por convecção e por difusão, através de um filme fino ou camada limite, até a superfície externa do adsorvente; (2) transferência de massa do soluto por difusão no poro, da superfície externa do adsorvente para a superfície no interior da estrutura dos poros; (3) difusão na superfície ao longo da superfície porosa; (4) adsorção do soluto sobre a superfície porosa. Na adsorção física, o quarto passo é quase instantâneo pois depende somente da frequência de colisão e da orientação das moléculas com a superfície porosa. Dessa forma, somente os três primeiros passos precisam ser considerados nesse caso (SEADER e HENLEY, 1998).

De forma simplificada, considera-se que há somente duas regiões distintas na fase líquida: uma região com um filme estagnado de espessura δ , em que reside toda a resistência à transferência de massa externa e, uma região bem misturada fora do filme estagnado, em que não existe resistência à transferência de massa.

Em um leito fixo de partículas adsorventes, a concentração de soluto nas duas fases muda continuamente com o tempo e a posição. O gradiente de concentração no fluido dentro da partícula é usualmente grande e, desse modo, a maior resistência à transferência de massa usualmente está na fase sólida. Quando uma molécula de soluto alcança um poro aberto na superfície da partícula, ela deve difundir através do líquido que inunda a rede tortuosa de poros, onde pode ligar-se na superfície sólida. Com o decorrer da adsorção, as moléculas de soluto têm que percorrer um caminho maior para encontrar um sítio vazio. Dessa forma, o processo se torna bastante demorado podendo levar algumas semanas para alcançar o equilíbrio, dependendo do tamanho da partícula (SEADER e HENLEY, 1998, COONEY, 1999).

Entretanto, para levar em conta a resistência à transferência de massa no sólido, pode-se considerar que a partícula de adsorvente é uma esfera homogênea e amorfa e que esta partícula está inicialmente livre de soluto. No tempo t_0 , é imersa em um grande volume de solução, com concentração conhecida c_0 .

A Equação 2.19 é utilizada para a estimação da difusividade mássica, sendo que para chegar a esta equação considerou-se o modelo mais simples para descrever a transferência de massa na fase sólida, o da difusão homogênea no sólido (HSDM). Assume-

se, neste modelo, que a difusividade é constante (D_s) em todos os pontos da partícula e a resistência externa na fase fluido como desprezável, obtendo-se

$$\frac{\bar{q}}{q_\infty} = 1 - \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(\frac{-D_s n^2 \pi^2 t}{\text{Raio}^2}\right) \quad (2.19)$$

onde D_s é o coeficiente de difusão ($\text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1}$), Raio é o raio da partícula (m), t é o tempo (h), n é o número de termos do somatório, \bar{q} é a concentração média de soluto no sólido em um dado tempo ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$) e q_∞ é a concentração de soluto no sólido a um tempo infinito ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$). Os valores de \bar{q} são obtidos através de um balanço de massa similar ao da Equação 2.4, a partir de dados experimentais de concentração na fase fluida (c) com o tempo, obtidos em teste cinético. Então a Equação 2.19, juntamente com os valores de \bar{q} , calculados a partir dos dados experimentais, é usada para a estimação da difusividade, D_s .

A taxa de transferência de massa no filme líquido estagnado é dada pela seguinte lei da força motriz linear (*linear driving force – LDF*), que é apresentada na Equação 2.20.

$$\frac{\partial \bar{q}}{\partial t} = k_f S_o (c - c_i) \quad (2.20)$$

onde \bar{q} é a concentração média de soluto no sólido ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); c é a concentração de soluto no seio do fluido (concentração *bulk*) longe da superfície ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); c_i é a concentração de soluto na interface líquido/partícula ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$); S_o é a área superficial das partículas de adsorvente por unidade de volume das partículas de adsorvente ($\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$), ou seja, A_s/V_p ; k_f é o coeficiente de transferência de massa no filme líquido ($\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$). A quantidade S_o é muitas vezes representada como $S_o = a/(1 - \varepsilon)$, onde a é área superficial ou interfacial por unidade de volume do leito empacotado e ε é a porosidade ou fração de vazios do leito (COONEY, 1999).

A lei da taxa para força motriz linear para a fase sólida é dada pela Equação 2.21.

$$\frac{\partial \bar{q}}{\partial t} = k_s S_o (q_i - \bar{q}) \quad (2.21)$$

onde k_s é o coeficiente de transferência de massa na fase sólida ($\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$), q_i é a concentração de soluto na interface partícula/líquido ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$), \bar{q} é a concentração média de soluto no

sólido (mg.L^{-1}) e S_0 é a área superficial da partícula de adsorvente por unidade de volume da partícula ($\text{m}^2.\text{m}^{-3}$).

Uma vez que a interface não tem a capacidade de acumular soluto, a taxa de transferência de soluto proveniente do líquido para a interface deve ser igual à taxa de transporte do soluto da interface para o interior do sólido. Desse modo, podem-se igualar as duas leis das taxas e obter a Equação 2.22,

$$k_s(q_i - \bar{q}) = k_f(c - c_i) \quad (2.22)$$

Na interface, q_i e c_i devem estar em equilíbrio e eles são relacionados pela equação da isoterma de equilíbrio para o sistema. Assumindo-se que a isoterma é linear, na forma de $q^* = mc$, pode-se escrever

$$(q^* - \bar{q}) = (q^* - q_i) + (q_i - \bar{q}) \quad (2.23)$$

onde q^* é o valor de q em equilíbrio com a concentração c no seio do fluido (concentração *bulk*). A **Figura 2.3** mostra como os valores de q e c são relacionados.

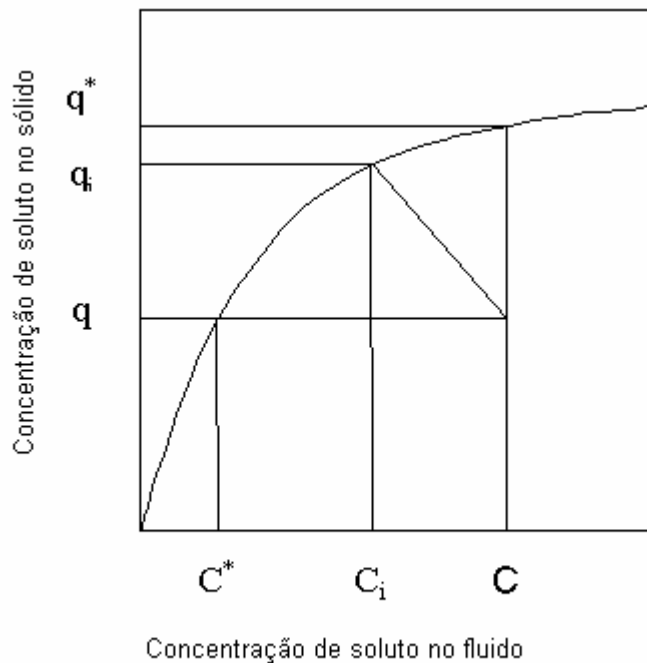


Figura 2.3: Relação entre as concentrações de q e c nas fases *bulk*, seus valores da interface e os valores em equilíbrio com as concentrações *bulk*.

Fonte: Adaptado de Cooney (1999).

Pode-se observar, na **Figura 2.3**, que $c > c_i$ e $q_i > q$, como deve ser para que ocorra a transferência de massa da fase fluido para a fase sólida. Usando a expressão da isoterma de adsorção, pode-se escrever a Equação 2.24,

$$(q^* - q_i) = m(c - c_i) \quad (2.24)$$

onde m é a inclinação média entre os pontos (c^*, q) e (c, q^*) .

Usando as leis das taxas anteriormente definidas, pode-se chegar à Equação 2.25,

$$\frac{\partial \bar{q}}{\partial t} = \left(\frac{m}{k_f} + \frac{1}{k_s} \right)^{-1} S_o (q^* - \bar{q}) \quad (2.25)$$

onde $(q^* - \bar{q})$ pode ser vista como a força motriz global referida à fase sólida, pois relaciona o valor de q em equilíbrio (q^*) com a concentração no seio do fluido ao valor de \bar{q} no seio do sólido. Escreve-se, então, a Equação 2.26 usando um coeficiente global de transferência de massa referido à fase sólida, definido através da Equação 2.27.

$$\frac{\partial \bar{q}}{\partial t} = K_s S_o (q^* - \bar{q}) \quad (2.26)$$

$$\frac{1}{K_s} = \frac{m}{k_f} + \frac{1}{k_s} \quad (2.27)$$

onde K_s é o coeficiente de transferência de massa global referido à fase sólida ($m \cdot h^{-1}$).

Similarmente, define-se K_f (Equação 2.29) através do uso da força motriz global referida à fase fluido, de acordo com a definição dada pela Equação 2.28. Os dois coeficientes globais estão relacionados pela Equação 2.30.

$$\frac{\partial \bar{q}}{\partial t} = K_f S_o (c - c^*) \quad (2.28)$$

onde K_f é o coeficiente de transferência de massa global referido à fase líquida ($m \cdot h^{-1}$).

$$\frac{1}{K_f} = \frac{1}{k_f} + \frac{1}{mk_s} \quad (2.29)$$

$$K_f = mK_s \quad (2.30)$$

Tem-se, então, quatro equações de taxa envolvendo quatro diferentes coeficientes de transferência de massa. É preferível utilizar as formas globais, pois nestes casos não

aparecem as quantidades q_i e c_i , que não são conhecidas. Para fazer uso das leis das taxas globais é necessário conhecer k_f e k_s e mais a inclinação da isoterma, m . Os valores de k_f podem ser obtidos por correlações (**Tabela 2.1**) ou através de estimação a partir de dados de ensaios de curvas de ruptura e k_s pode ser aproximado pela Equação 2.31 proposta por Glueckauf (1955),

$$k_s = \frac{5D_s}{\text{Raio}} \quad (2.31)$$

onde D_s é a difusividade ($\text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1}$) e Raio é o raio da partícula (m).

Tabela 2.1: Correlações para a determinação do coeficiente de transferência de massa na fase líquida (k_f).

Autor	Correlação	Validade	Observações
Colburn (1934)	$j_D = \left(\frac{k_f}{\varepsilon v} \right) (\text{Sc})^{2/3} = \frac{\text{Sh}}{\text{Re Sc}^{1/3}}$		j_D é o fator de Colburn definido como $(k_f/\varepsilon v)(\text{Sc})^{2/3}$, Sc é o número de Schmidt; Sh é o número de Sherwood ($k_f D/D_{AB}$) e Re é o número de Reynolds
Wilson e Geankoplis (1996)	$j_D = \frac{1,09}{\varepsilon} \text{Re}^{-2/3}$	Líquidos, entre $0,0016 < \text{Re} < 55$	
Wilson e Geankoplis (1996)	$j_D = \frac{0,250}{\varepsilon} \text{Re}^{-0,31}$	Líquidos, entre $55 < \text{Re} < 1500$	
Yoshida	$j_D = 0,91\psi \text{Re}^{-0,51}$	Para $\text{Re} < 50$	Re = $G_o/a\psi\mu$, e ψ é o fator de forma, que é 1 para esfera perfeita e apresenta valores menores para formas não esféricas.
Yoshida	$j_D = 0,61\psi \text{Re}^{-0,41}$	Para $\text{Re} > 50$	
Wakao e Funazkri (1978)	$\text{Sh} = 2,0 + 1,1\text{Re}^{0,6} \text{Sc}^{1/3}$	Para $3 < \text{Re} < 10^4$	Para líquidos e gases, com efeitos de dispersão axial.
Gnielinski (1978)	$\text{Sh} = \left(2 + 0,644\text{Re}^{1/2} \text{Sc}^{1/3} \right) \times [1 + 1,5(1 - \varepsilon)]$	$\text{Re} < 100$	Soluções aquosas

Fonte: Dados compilados de Cooney (1999) e Roberts, Cornal e Summers (1985).

Uma vez que $S_o = 3/\text{Raio}$ para uma partícula esférica, então, se o adsorvente é aproximadamente esférico, o produto $k_s S_o$ pode ser expresso pela Equação 2.32.

$$k_s S_o = \frac{15D_s}{\text{Raio}^2} \quad (2.32)$$

Chatzopoulos, Varma e Irvine (1993) realizaram experimentos de adsorção de tolueno de solução aquosa em carvão ativado. Para estudar os efeitos da concentração inicial, do tamanho das partículas e das condições hidrodinâmicas na fase líquida sobre a taxa de adsorção de tolueno, foram conduzidos experimentos em uma série de banhos finitos. Estes foram realizados em 3 concentrações iniciais de tolueno ($c_0 \approx 10$ ppm; $c_0 \approx 40$ ppm e $c_0 \approx 60$ ppm), 2 tamanhos de partículas (diâmetros de 0,998 e 1,643 mm) e várias velocidades de agitação. Para a determinação dos valores de D_s , primeiramente, utilizaram modelo que considera o coeficiente de difusão independente da concentração. Contudo, observaram que os valores de D_s , assim obtidos, aumentam com o aumento da concentração inicial da solução e, portanto, sugeriram que D_s depende da concentração. Os valores obtidos também mostraram ser, aparentemente, dependentes do tamanho das partículas, pois, em geral, nos ensaios com as partículas menores eles foram maiores do que os com as partículas maiores. Baseados nestes fatos, os autores propuseram um modelo de coeficiente de difusão, D_s , dependente da concentração na superfície do sólido, que apresentou boa correlação com os dados. Finalmente, para verificar a eficácia do modelo proposto, realizaram um experimento adicional sob condições operacionais diferentes (concentração inicial $48,7 \text{ mg.L}^{-1}$, diâmetro de partícula igual a $1,295 \text{ mm}$, $1,093 \text{ g}$ de massa de carvão e 600 rpm de velocidade de agitação) e, também neste caso houve ótima concordância com o modelo.

Cooney, Adenasya e Hines (1983) realizaram um estudo para verificar a influência da distribuição do tamanho de partículas (DTP) de adsorvente na cinética de adsorção de p-nitrofenol em solução aquosa, em sistemas em batelada agitados, usando dados reais selecionados de um estudo realizado por outros autores. O modelo utilizado era bastante semelhante ao originalmente proposto pelos pesquisadores dos quais os dados foram selecionados, exceto pelo fato de terem sido incorporadas seis diferentes distribuições de tamanho de partículas no modelo. Estudaram tanto o caso de sistemas de banho infinito (concentração de soluto no meio constante), como no estudo base, como a simulação de sistema de banho finito (variação da concentração de soluto no meio). A relação de equilíbrio utilizada foi a equação de Langmuir. Foram utilizados quatro modelos de distribuição Gaussiana e dois modelos de distribuição log-normal. Os resultados mostraram que, para o caso de sistemas de banho infinito, a inclusão da DTP no modelo não mostrou resultado muito diferente em relação ao caso de distribuição uniforme do tamanho de partículas. Já para o caso de sistema de banho finito, a DTP mostrou possuir bastante influência.

2.6 Curvas de ruptura

A adsorção em leito fixo é um processo em estado não estacionário. A representação gráfica desse modo de operação é a curva de ruptura, na qual se indica a concentração de adsorvato no efluente da coluna em função do tempo de processo.

Na modelagem matemática da adsorção em leito fixo, assume-se que: o sistema é isotérmico; há somente um adsorvato solúvel no líquido; a concentração do soluto na alimentação é suficientemente pequena de forma que, quando muito ou a maioria do soluto tenha sido adsorvido do líquido, a velocidade de escoamento do fluido não muda; não há variação da velocidade axial do líquido na direção radial. A partir dessa última consideração, considera-se, também, que não há variação na concentração de soluto em ambas as fases na direção radial (COONEY, 1999).

A equação de balanço diferencial de massa de um soluto em um leito fixo de adsorvente é obtida tomando-se um elemento de altura Δz da coluna com área de seção transversal S , como esquematizado na **Figura 2.4**. O espaço em que o fluido escoar tem volume $\varepsilon S\Delta z$ e o volume que o sólido ocupa é $(1-\varepsilon)S\Delta z$, sendo ε a porosidade, que representa a fração de vazios do leito; v é a velocidade intersticial que representa a velocidade axial média de fluxo de fluido nos espaços intersticiais, Q é a taxa volumétrica em que o fluido entra e sai desta seção e $(c)_z$ é a concentração de soluto no fluido no plano z . A taxa de entrada do soluto nessa seção da coluna no plano z é $Q(c)_z = \varepsilon v S (c)_z$ e a taxa em que o soluto sai dessa seção da coluna no plano $z + \Delta z$ é $Q(c)_{z+\Delta z} = \varepsilon v S (c)_{z+\Delta z}$. A taxa de acúmulo de soluto na fase fluida é igual ao volume de fluido multiplicado pela taxa de variação da concentração da fase fluida com o tempo (t), ou seja $\varepsilon S\Delta z (\partial c / \partial t)_z$, onde z corresponde ao valor médio de z naquela seção. Esta taxa será normalmente negativa, pois o comum é o soluto sair da fase fluida. Similarmente, a taxa de acúmulo de soluto na fase sólida é dada por $(1-\varepsilon)S\Delta z (\partial \bar{q} / \partial t)_z$, onde \bar{q} é dada em massa de adsorvato por volume de adsorvente. Para considerar a ocorrência de dispersão axial, deve-se fazer uso da Lei de Fick, que estabelece que o fluxo dispersivo é igual a $-D_L (\partial c / \partial z)_z$, onde D_L é um coeficiente de dispersão axial. Este fluxo, que é dado em unidade de massa por unidade de área e de tempo, deve ser multiplicado pela área da seção transversal em que acontece a dispersão, εS . Equacionando todos os termos, dividindo por $\varepsilon S\Delta z$, rearranjando e tomando o limite quando $\Delta z \rightarrow 0$, chega-se à equação diferencial governante para o sistema (Equação 2.33).

$$v \left(\frac{\partial c}{\partial z} \right)_t + \left(\frac{\partial c}{\partial t} \right)_z + \left(\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} \right) \left(\frac{\partial \bar{q}}{\partial t} \right)_z = D_L \left(\frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right)_t \quad (2.33)$$

Em palavras, o balanço de massa do sistema é então:

Taxa de entrada de soluto pelo escoamento + Taxa de entrada de soluto por dispersão – Taxa de saída de soluto pelo escoamento + -Taxa de saída de soluto por dispersão = Taxa acúmulo de soluto

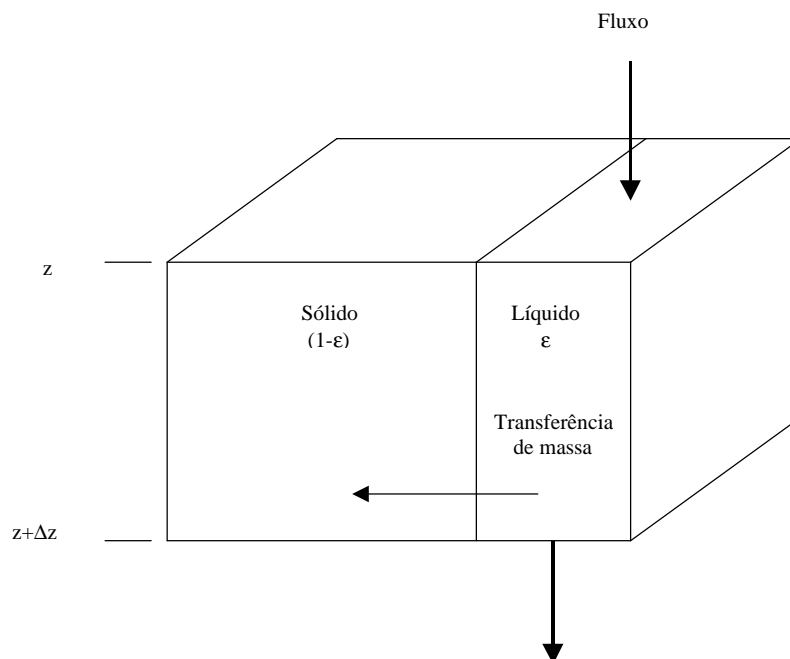


Figura 2.4: Esquema da seção transversal de um leito fixo de adsorção.
Fonte: Adaptado de Cooney (1999).

No entanto, quando a fase fluida é um líquido, pode-se desprezar a contribuição da dispersão axial no processo de adsorção, eliminando-se o termo do lado direito, exceto no caso de velocidades extremamente baixas. Para a resolução da equação diferencial proposta, estabelecem-se, normalmente, como condições iniciais $\bar{q}=0$ e $c=0$ para todos os valores de z em $t=0$, ou seja o leito é inicialmente livre de soluto. Como condição de contorno, considera-se a concentração da alimentação conhecida e constante, $c=c_0$ em $z=0$, para todo $t>0$. Adicionalmente, para resolver a equação do balanço diferencial de massa para obter $c(z,t)$, necessita-se relacionar o termo

representando a taxa de soluto que entra na fase sólida, $(\partial \bar{q}/\partial t)_z$, com c e \bar{q} , que são as concentrações *bulk*, através do uso de uma lei da taxa. Uma vez que estas expressões incorporam q_e e c_e , deve-se também fazer o uso de expressões de isotermas de equilíbrio (COONEY, 1999).

Se existe equilíbrio local, pode-se escrever $(\partial \bar{q}/\partial t)_z = (\partial c/\partial t)_z (dq_e/dc)$, onde (dq_e/dc) é a derivada da expressão da isoterma de equilíbrio ($f'(c)$). Além disso, matematicamente a relação $(dz/dt)_c = -(\partial c/\partial t)_z / (\partial c/\partial z)_t$ é verdadeira. Dessa forma, o balanço de massa expresso na Equação 2.33 pode ser rearranjado para obter a Equação 2.34.

$$\left(\frac{dz}{dt}\right)_c = \frac{\varepsilon v}{\varepsilon + (1-\varepsilon)f'(c)} \quad (2.34)$$

Integrando a Equação 2.34 com a condição que em $z = 0$, $t = 0$, para todos os valores possíveis de c (que devem estar na faixa de $0 < c < c_0$), obtém-se a Equação 2.35,

$$z = \frac{\varepsilon vt}{\varepsilon + (1-\varepsilon)f'(c)} \quad (2.35)$$

que é válida para c constante (COONEY, 1999). Assim, fixada a concentração no fluido, determina-se a posição correspondente a esta concentração no tempo t de operação.

Se a isoterma é linear, $f'(c)$ terá o mesmo valor para todos os valores de c na faixa de 0 a c_0 . Os perfis de \bar{q} vs. z terão a mesma forma da função degrau, mas a faixa de valores de \bar{q} será de 0 a q_0 , onde q_0 é o valor de \bar{q} em equilíbrio com c_0 (COONEY, 1999).

Se a isoterma é côncava, $f'(c)$ aumentará com c e dessa forma, a razão $\varepsilon v / [\varepsilon + (1-\varepsilon)f'(c)]$ diminuirá com c . Os perfis formados são chamados de padrões proporcionais, pois o seu espalhamento é proporcional ao tempo e à distância percorrida. Quando as frentes espalham-se continuamente, a consideração de equilíbrio e ausência de dispersão é razoavelmente boa. Baixos gradientes, $\partial c/\partial z$, fazem com que a dispersão axial seja negligenciável, e a ampliação da frente representa que a taxa de mudança de c em uma localização z é gradual, dando chance aos valores de \bar{q} na fase sólida de se aproximarem ao equilíbrio com c (COONEY, 1999).

Se a isoterma é convexa, a razão $\varepsilon v / [\varepsilon + (1 - \varepsilon)f'(c)]$ aumenta com c . A isoterma convexa é chamada de favorável pois leva a variações de concentrações mais bruscas (*sharp*), enquanto que a isoterma côncava é chamada de isoterma desfavorável, pois produz espalhamento das frentes. Para o uso efetivo da capacidade de adsorção do leito fixo, deseja-se que a variação de concentração seja o mais brusca possível. Com uma frente que tenha este comportamento, há um melhor aproveitamento da capacidade de adsorção do leito até se atingir a concentração de ruptura do soluto no efluente e a coluna é tirada de serviço (COONEY, 1999).

Foi visto que, quando a dispersão axial pode ser negligenciada e há equilíbrio local e a isoterma é linear ou convexa, perfis de função degrau se desenvolvem no leito. Tais perfis não mudam sua forma à medida que eles atravessam o leito (COONEY, 1999).

Em contraste, para sistemas reais, em que o equilíbrio local não existe, e que uma certa dispersão axial ocorre, os perfis de concentração tendem a se espalhar. Entretanto, se a isoterma de adsorção é convexa, as zonas de baixa concentração do perfil possuirão adsorção (alto dq_e/dc) mais pronunciada em relação às partes de alta concentração do perfil. O efeito da forma da isoterma convexa é tender a tornar o perfil brusco. À medida que os perfis movem-se no leito, as forças que causam estes 2 efeitos se compensam, e ao final produz-se uma forma de perfil que não mais varia com a distância. Este perfil não é uma função degrau, pois os efeitos de espalhamento do não equilíbrio e da dispersão axial o afastam da forma de função degrau, mas ainda possui uma forma de “S” relativamente mais estreita (COONEY, 1999).

A **Figura 2.5** mostra os perfis de concentrações na fase líquida, em função da altura do leito e do tempo durante a adsorção. A concentração do fluido é c_0 na alimentação e c é a concentração no fluido em função da posição no leito. No início da operação no tempo t_1 , desenvolve-se um perfil de concentração como mostrado na curva t_1 da **Figura 2.5**. Depois de um breve tempo, o sólido junto à entrada da coluna se encontra saturado e a maioria da transferência de massa e da adsorção tem lugar em ponto ligeiramente mais distante da entrada do leito. Tem-se agora um novo perfil ou zona de transferência de massa (GEANKOPLIS, 1995).

Como visto na **Figura 2.5**, a adsorção acontece na zona de transferência de massa que é relativamente estreita. Conforme a solução continua fluindo, esta zona de transferência de massa – que tem uma forma de “S” – se move até o final da coluna. A concentração na saída continua sendo próxima de zero até que a zona de transferência de massa se aproxime da saída da coluna. Então, a concentração de adsorvato no

efluente começa a aumentar, atingindo-se a chamada concentração adimensional de ruptura, c_b/c_0 . Depois de alcançar o tempo de ruptura, a concentração se eleva com grande rapidez até a concentração adimensional c_d/c_0 , na qual o leito não tem mais efetividade. A concentração adimensional no ponto de ruptura representa o máximo que se pode admitir de soluto na fase fluida efluyente e em geral aceita-se o valor de c_b/c_d entre 0,01 até 0,05. O valor de c_d é aproximadamente igual a c_0 (GEANKOPLIS, 1995).

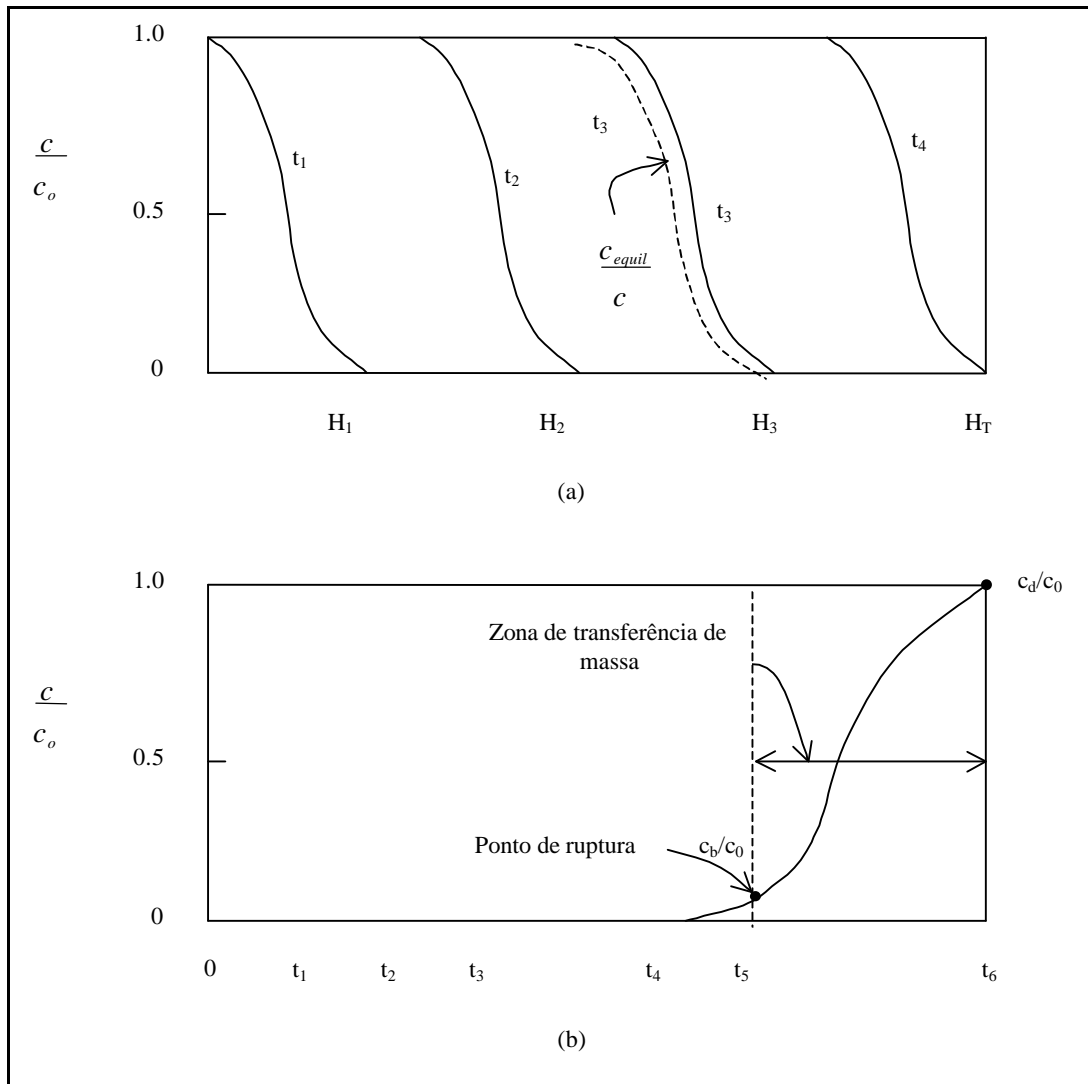


Figura 2.5: Perfis de concentração em um leito fixo: (a) perfis de concentração em várias posições e em diferentes tempos; (b) perfil de concentração do fluido na saída do leito. Fonte: Adaptado de Geankoplis (1995).

A capacidade estequiométrica do leito, se este estiver em equilíbrio com a alimentação, é proporcional à área entre a curva e a linha em que c/c_0 é igual a um. Matematicamente, a área total obtida pela Equação 2.36, representa a capacidade estequiométrica do leito,

$$t_t = \int_0^{\infty} \left(1 - \frac{c}{c_0}\right) dt \quad (2.36)$$

onde t_t é o tempo correspondente à utilização da capacidade estequiométrica total do leito. Já a capacidade útil do leito é a área sobre a curva até o ponto de ruptura e é expressa, matematicamente, pela Equação 2.37

$$t_u = \int_0^{t_b} \left(1 - \frac{c}{c_0}\right) dt \quad (2.37)$$

onde t_u é o tempo correspondente à utilização da capacidade útil do leito, que é, normalmente, praticamente igual ao tempo de ruptura (t_b), em que a concentração do efluente chega até o máximo permitido. A razão t_u/t_t é a fração da altura do leito utilizada até o ponto de ruptura. Denominando-se a altura total do leito de H_t e H_b como a altura de leito usada até o ponto de ruptura, pode-se escrever a relação dada pela Equação 2.38 (GEANKOPLIS, 1995).

$$H_b = \frac{t_u}{t_t} H_t \quad (2.38)$$

Observa-se que esta relação é válida quando há a formação de perfil de padrão constante. Já a altura de leito não utilizada é denominada H_{UNB} e é expressa pela Equação 2.39. Ela representa a altura da zona de transferência de massa e depende da velocidade do fluido e independe da altura total da coluna, uma vez que tiver sido atingido o padrão constante. Assim, pode-se estimar o valor de H_{UNB} em escala laboratorial ou piloto com o adsorvente desejado a um fluxo selecionado e, com este valor, calcular a altura de um leito industrial para atingir a capacidade útil requerida, H_b . Dessa forma, a altura do leito industrial é a soma da altura da zona de transferência de massa com a altura útil do leito (Equação 2.40).

$$H_{UNB} = \left(1 - \frac{t_u}{t_t}\right) H_t \quad (2.39)$$

$$H_t = H_{UNB} + H_b \quad (2.40)$$

O procedimento descrito anteriormente é válido se as condições da coluna laboratorial ou piloto forem semelhantes às condições que serão utilizadas na escala industrial. A coluna em pequena escala deve estar isolada para que seja similar a uma torre de grande diâmetro, que opera de forma adiabática. A velocidade mássica em ambas as unidades deverá ser a mesma e a altura do leito deve ser suficiente para que se atinja o

perfil padrão constante, ao qual corresponde uma altura da zona de transferência de massa constante (GEANKOPLIS, 1995).

Em vista do exposto, diversas pesquisas vem sendo realizadas para a melhor compreensão da operação de adsorção em leito fixo e para a aquisição de parâmetros das inúmeras configurações possíveis desta operação. Na seqüência do trabalho, são apresentados alguns trabalhos relevantes em relação ao estudo das curvas de ruptura e obtenção dos parâmetros de operação.

Wolborska e Pustelnik (1996) obtiveram resultados satisfatórios para o modelo cinético proposto para descrever o segmento inicial da curva de ruptura para os dois sistemas estudados (soluções com um único composto e soluções binárias). O modelo cinético foi baseado na resistência à transferência de massa externa, nesta porção inicial da curva, na região denominada de baixas concentrações (10^{-5} a 1 kg.m^{-3}). A adsorção em carvão ativado granular de soluções de um único componente e binárias de p-nitrofenol, fenol, p-clorofenol e ácido benzóico foram estudadas. Os resultados dos testes em leito fixo com soluções contendo um único soluto demonstraram que a utilização de diferentes quantidades de carvão (alturas de leito) produziram deslocamento paralelo da curva de ruptura somente para os casos em que se utilizaram quantidades superiores a 50 g de carvão, o que evidencia que para estes casos houve condições para que o formato da curva de ruptura chegasse ao de padrão constante. Foi possível estimarem-se os tempos de ruptura com boa correlação dos dados, em especial para os casos em que a faixa de quantidade de carvão ficou entre 65 – 150 g, mostrando que o modelo é mais satisfatório para a estimação na região onde o efluente do leito tem baixas concentrações.

Chern e Chien (2001) verificaram que o modelo de frentes de padrão constante, com força motriz linear na fase líquida, ajusta bem os dados de curvas de ruptura obtidas para a adsorção de ácido benzóico em leito fixo, com exceção do caso de leito curto (3 cm) e vazão baixa ($21,6 \text{ cm}^3.\text{h}^{-1}$). Também verificaram que para um mesmo comprimento de leito, $t_{1/2}$ (tempo em que a concentração adimensional c/c_0 é igual a 0,5) é inversamente proporcional à vazão volumétrica da solução e, para a mesma vazão, $t_{1/2}$ é proporcional ao comprimento do leito. Estas verificações foram realizadas para a altura de leito de 3 cm e vazão volumétrica de 21,6 e $43,3 \text{ cm}^3.\text{h}^{-1}$ e para a altura de leito de 6 cm e vazão volumétrica de 43,2 e $86,4 \text{ cm}^3.\text{h}^{-1}$. Os coeficientes individuais de transferência de massa na fase líquida foram obtidos a partir de uma correlação (Equação 2.41) sugerida na literatura e estes valores foram comparados com os obtidos a partir dos dados experimentais de curvas de ruptura.

$$Sh = \left(2 + 0,644Re^{1/2} Sc^{1/3}\right) [1 + 1,5(1 - \varepsilon)] \quad (2.41)$$

onde $Sh = d_p k_f \cdot D^{-1}$, $Re = \rho_f u_0 \varepsilon d_p \cdot \mu^{-1}$, sendo d_p o diâmetro da partícula e D a difusividade do soluto no fluido. Observaram que os valores dos parâmetros determinados pela correlação eram valores bastante superiores (aproximadamente o dobro) aos ajustados. Devido a este fato sugerem que a resistência à transferência de massa na fase sólida também tem algum impacto nas curvas de ruptura, já que a correlação utilizada para a estimação do coeficiente de transferência de massa considera somente a resistência no filme de líquido. Em vista do exposto, os autores propuseram uma correlação para o coeficiente volumétrico global de transferência de massa ($K_f a$) referido à fase líquida como uma função da vazão volumétrica, Q , (Equação 2.42). Esta se mostrou satisfatória, demonstrando que este coeficiente é independente do comprimento do leito, mas aumenta com o aumento da vazão, de acordo com

$$K_f a = k_1 + k_2 Q^{1/2} \quad (2.42)$$

Em trabalho posterior, Chern e Chien (2002), estudaram a adsorção em solução aquosa de p-nitrofenol em carvão ativado granular. Neste estudo, verificaram que os dados de curvas de ruptura foram bem ajustados ao modelo de frentes de padrão constante com força motriz linear na fase líquida e, também, que os tempos de ruptura aumentam proporcionalmente com o aumento da altura do leito, mas são inversamente proporcionais ao aumento do fluxo. Utilizaram a mesma correlação usada em seu trabalho anterior (Equação 2.41) para a obtenção de k_f e os valores obtidos foram bastante superiores quando comparados aos estimados a partir dos experimentos de ruptura. A Equação 2.42 também foi utilizada para se obter o coeficiente volumétrico global de transferência de massa referido à fase líquida e esta apresentou ótimo ajuste. Estas observações estão em concordância com as realizadas em seu trabalho anterior com ácido benzóico (CHERN e CHIEN, 2001).

Chatzopoulos, Varma e Irvine (1993), para estudar os efeitos da concentração inicial, do tamanho das partículas e das condições hidrodinâmicas na fase líquida sobre a taxa de adsorção de tolueno, realizaram uma série de experimentos em batelada. Estes foram realizados em 3 concentrações iniciais de tolueno ($c_0 \approx 10$ ppm; $c_0 \approx 40$ ppm e $c_0 \approx 60$ ppm), 2 tamanhos de partículas (diâmetros de 0,998 e 1,643 mm) e várias velocidades de agitação. O modelo para descrever a difusão dentro de uma partícula esférica, proposto pelos autores, é apresentado na Equação 2.43

$$\frac{\partial \eta}{\partial \tau} = \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial}{\partial \rho} \left[\rho^2 \exp(k(\eta/\eta_{sat})) \frac{\partial \eta}{\partial \rho} \right] \quad (2.43)$$

onde η , ρ e τ são quantidades adimensionais descritas pelas expressões $\eta = q/q_0$, $\rho = r/R$ e $\tau = D_0 t/R^2$. Nestas expressões, q é a concentração de soluto na superfície da fase sólida (mg.g^{-1}), q_0 é a concentração de soluto no sólido em equilíbrio com c_0 (mg.g^{-1}), r é a posição radial dentro da partícula (mm), R é o raio da partícula de adsorvente (mm), D_0 é o coeficiente de difusão na superfície a $q = 0$ ($\text{m}^2.\text{s}^{-1}$), t é o tempo (s) e k é o parâmetro definido pela expressão $D_s(q) = D_0 \exp[k(q/q_{\text{sat}})]$. Quando realizaram a estimação de D_s , considerando que esta fosse independente da concentração da superfície, ou seja $D_s = D_0$, $k = 0$ na Equação 2.43, verificaram que os valores preditos de k_f aumentavam significativamente com o aumento da velocidade de agitação, e que eram aparentemente independentes do tamanho das partículas. No mesmo trabalho, utilizaram uma correlação para a estimação de k_f (Equação 2.44) quando consideraram que o coeficiente D_s era dependente da concentração, ou seja, $k \neq 0$, dada por

$$k_f = k_{f,\text{ref}} \left(\frac{d_p}{d_{p,\text{ref}}} \right)^{(4\lambda-1)} \left(\frac{N}{N_{\text{ref}}} \right)^{3\lambda} \quad (2.44)$$

onde N é a velocidade do agitador (rpm), N_{ref} é a velocidade de referência do agitador, neste caso 600 rpm, d_p é o diâmetro da partícula (mm), $d_{p,\text{ref}}$ é o diâmetro de referência usado, neste caso, 1,643 mm e $k_{f,\text{ref}}$ é o coeficiente individual de transferência de massa referido à fase líquida (m.s^{-1}), escolhido como $9,93.10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$. Neste caso, obtiveram λ igual a 0,179, verificando então que k_f era inversamente proporcional ao diâmetro da partícula (expoente 0,284) e proporcional à velocidade de agitação (expoente 0,537). Baseados neste trabalho, Chatzopoulos e Varma (1995) realizaram o estudo da adsorção e dessorção de tolueno em fase aquosa em um leito fixo de carvão ativo granular, em que os valores de k_f foram determinados pelo ajuste de dados de curvas de ruptura. Os valores obtidos aumentam com o aumento do fluxo volumétrico e com a diminuição do tamanho das partículas. Uma correlação (Equação 2.45) foi proposta para determinar esta dependência de k_f com o número de Reynolds, que se mostrou bastante ajustada ao dados experimentais quando comparada a outras correlações citadas na literatura.

$$\text{Sh} = 2 + 3,44 \text{Re}^{0,471} \text{Sc}^{1/3} \quad (2.45)$$

Ao contrário do que se esperava, a concentração do efluente em várias corridas aproxima-se, em tempos longos, a uma concentração assintótica que é um pouco menor que à da corrente de alimentação. Além disso, na maioria dos casos, o modelo predizia a concentração do efluente a tempo longos, próximo ao equilíbrio, como sendo superior

aos valores experimentais. Os autores atribuíram que este fato é, possivelmente, devido à existência de porções do leito de carvão não facilmente acessíveis ao fluido que entra, onde o tolueno pode ser transportado somente por difusão. Estes locais podem incluir as regiões ao redor dos pontos de contato entre partículas vizinhas ou vazios de leito em que não há escoamento do fluido.

Capítulo 3

Materiais e métodos

Neste capítulo é apresentada a metodologia usada para a realização do trabalho, onde se trata da caracterização do adsorvente, das análises da solução aquosa de tolueno, da preparação do adsorvente, dos ensaios de equilíbrio, cinéticos e de curvas de ruptura.

3.1 Caracterização do carvão

Foi utilizado um carvão ativado vegetal granular comercial nos ensaios do presente trabalho. Para a caracterização do carvão, determinaram-se teores de cinzas e umidade, massa específica *bulk* e real, pH e área superficial e, calculou-se o diâmetro médio de partícula e a porosidade do leito.

3.1.1 Determinação da umidade

O percentagem de umidade foi determinada com base na norma ASTM2867-95, utilizando-se pesa-filtros de vidro com dimensões de 35 mm de diâmetro por 40 mm de altura. Entre 5 e 10 gramas de amostra foram colocadas em uma estufa a 150 °C, durante no mínimo 3 horas (tempo indicado na norma), até que, entre duas medidas consecutivas, a massa apresentasse valor constante. O teor de umidade, em base úmida, foi determinado pela Equação 3.1.

$$\% \text{ de umidade} = \frac{\text{massa inicial da amostra (g)} - \text{massa final da amostra (g)}}{\text{massa inicial da amostra (g)}} \times 100 \quad (3.1)$$

3.1.2 Determinação de cinzas

A percentagem de cinza foi determinada com base na norma ASTM D2866-94, utilizando-se cadinhos de porcelana calcinados a 650 °C. Aproximadamente 5 gramas de carvão foram calcinados a 650 °C durante cerca de 10 horas (tempo indicado na norma de 3 – 16 h), tempo necessário para que a amostra apresentasse massa constante entre duas medidas consecutivas. O conteúdo de cinza, em base úmida, é determinado pela Equação 3.2.

$$\% \text{ de cinzas} = \frac{\text{massa de sólidos res tante (g)}}{\text{massa inicial da amostra (g)}} \times 100 \quad (3.2)$$

3.1.3 Determinação da massa específica

Existem vários tipos de massas específicas a considerar nos carvões granulares. Realizou-se a determinação da massa específica *bulk* e da massa específica real. A massa específica *bulk* do carvão granular é importante para projetar o volume de um leito ou para determinar a quantidade de carvão a repor num leito existente, ela relaciona o volume do recipiente com a massa de material que ele pode conter. A massa específica real relaciona a massa da partícula com o seu volume.

3.1.3.1 Massa específica *bulk* (ρ_B)

A determinação da massa específica *bulk* é realizada com base na norma ASTM D2854-96. Utilizam-se provetas de 100 mL com o volume corrigido à temperatura ambiente. A amostra de carvão é carregada na proveta, deixando-se que caia livremente até o volume de 60 mL. A proveta carregada com o carvão é pesada numa balança de precisão e a massa específica *bulk* é determinada pela Equação 3.3.

$$\rho_B = \frac{\text{massa de carvão (g)}}{\text{volume correspondente ao nível ocupado pelo carvão (mL)}} \quad (3.3)$$

3.1.3.2 Massa específica real (ρ_r)

A determinação da massa específica real (ρ_r) foi realizada tomando-se aproximadamente dois gramas de carvão, que são pesados e colocados em um béquer. Adiciona-se água e o conjunto é aquecido até a ebulição da água para que o ar seja retirado de dentro dos poros do carvão. Após todo o carvão decantar, a mistura é resfriada até temperatura ambiente e o carvão é transferido para um balão volumétrico de 100 mL aferido, adicionando-se água até a marca do balão. O balão é, então, pesado para obter-se a soma das massas de água e de carvão. O volume ocupado pela água é calculado tomando-se a massa da água e sua massa específica à temperatura do laboratório. A massa específica real é determinada utilizando-se a Equação 3.4.

$$\rho_r = \frac{\text{massa de carvão (g)}}{\text{volume ocupado pelo carvão (mL)}} \quad (3.4)$$

3.1.4 Determinação da porosidade do leito

A porosidade do leito foi calculada utilizando a Equação 3.5,

$$\varepsilon = 1 - \frac{m}{\rho_r V} \quad (3.5)$$

onde m é a massa de carvão utilizada no leito fixo de adsorção (g), ρ_r é a massa específica real do carvão ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) e V é o volume total do leito (cm^3). O volume total do leito é obtido

multiplicando-se a área da seção transversal do leito pela altura atingida pelo carvão no leito.

3.1.5 Determinação do pH

A expressão pH do carvão será utilizada no presente trabalho para denominar o pH de uma solução a 1% (m/m) de carvão ativado em água destilada e deionizada. Esta suspensão foi aquecida a aproximadamente 90 °C e agitada por 20 min. Deixou-se esfriar à temperatura ambiente. O medidor de pH (Ingold, pH-206, com eletrodo de AgCl), utilizado para as medidas do pH da suspensão preparada, foi inicialmente calibrado com soluções tampão de pH = 4 e pH = 7 (BANSODE et al., 2003).

3.1.6 Área superficial

A área superficial interna dos materiais porosos é determinada pelo uso da chamada equação BET, que foi dada no item 2.4 sobre isotermas de equilíbrio. A determinação da área superficial foi realizada no Laboratório de Tecnologia Mineral da UFRGS, utilizando o analisador Quantachrome, modelo MP (Quantachrome Corporation).

3.1.7 Análise granulométrica

Para a determinação do diâmetro médio das partículas, utilizou-se o método de peneiras padronizadas. O método baseia-se na norma ASTM D2862 – 92 e consiste em colocar a amostra de carvão (aproximadamente 200 g) no topo de uma série de peneiras (marca Bertel). Cada peneira tem aberturas menores que as da precedente, geralmente formando uma série em $2^{1/n}$. Quando as peneiras são postas em vibração (agitador de peneiras Bertel) por um intervalo de tempo fixo (10 min \pm 10 s), ocorre a separação por tamanho das partículas. Utilizaram-se peneiras de 6, 8, 12, 16 e 20 mesh para a caracterização. O tamanho das partículas retidas nas diferentes peneiras é expresso como um comprimento médio entre a abertura da peneira imediatamente anterior e a abertura da peneira coletora.

3.2 Especificação do adsorvato

Foi utilizado como adsorvato tolueno (Quimex, 99,5%, PA-ACS; Synth, 99,5%, PA-ACS), cuja massa específica fica na faixa de 0,865-0,869 g.mL⁻¹ a 20°C. Com este composto químico foram preparadas todas as soluções utilizadas no presente trabalho.

3.3 Pré-tratamento do carvão

Na literatura são citados dois tipos de procedimentos para o preparo do carvão ativado granular em estudos de adsorção. Dessa forma, o carvão em estudo recebeu dois tipos de lavagem, a fim de selecionar a mais adequada para a realização dos trabalhos. As

duas metodologias, a seguir apresentadas, foram desenvolvidas durante o presente trabalho, já que quando é empregado algum tipo de lavagem nos estudos realizados por outros autores, este não se mostra claro quanto às variáveis envolvidas neste procedimento, como número de lavagens, temperatura, tempo de exposição, entre outros aspectos. O objetivo da lavagem é minimizar a liberação de substâncias, como finos, que podem alterar resultados analíticos da composição da solução analisada.

3.3.8 Lavagem com ácido

Um tipo de metodologia que é empregada para a preparação do carvão a ser utilizado em estudos de adsorção é a lavagem ácida para a eliminação de possíveis impurezas presentes, que é seguida pela lavagem com água (CHERN e CHIEN, 2001, 2002). Aproximadamente 100 gramas de carvão foram lavados com 200 mL de solução de HCl 1N, na temperatura de 50°C, sob agitação por 30 min. O carvão foi filtrado em filtro com placa de vidro sinterizado. Este procedimento foi repetido 5 vezes. Após, o carvão foi enxaguado 10 vezes com água deionizada, aquecida na temperatura de fervura. Ao final desse procedimento, foi coletada a água de lavagem, que foi centrifugada para a precipitação dos finos em suspensão. Analisou-se, então, a absorvância da solução obtida em espectrofotômetro (CARRY 300, VARIAN) no comprimento de onda de 206 nm e caminho óptico de 10 mm.

3.3.9 Lavagem com água

Chatzopoulos, Varma e Irvine (1993) utilizaram diversas lavagens com água como pré-tratamento para o carvão, não reportando de maneira clara o número de vezes que este procedimento foi realizado. Dessa forma, no presente estudo, aproximadamente 100 gramas de carvão foram lavados com aproximadamente 200mL de água destilada e deionizada, à temperatura de fervura, durante 30 min. Este procedimento foi repetido 10 vezes. A cada lavagem com novas alíquotas de água, o carvão foi filtrado em filtro com placa de vidro sinterizado e a solução obtida foi centrifugada para análise da absorvância em espectrofotômetro no comprimento de onda de 206 nm e caminho óptico de 10 mm.

3.4 Determinação da concentração de tolueno

A fim de determinar a absorvância lida no espectrofotômetro UV visível (CARRY 300, VARIAN) utilizado para a determinação de tolueno nas soluções, elaboraram-se curvas de calibração de absorvância *versus* concentração.

Prepararam-se soluções que abrangessem toda a faixa de concentrações a ser trabalhada durante o experimento. Para tanto, primeiramente, prepararam-se soluções-mãe de tolueno em balões volumétricos de 1 L e sua homogeneização foi realizada usando ultra-

som por 20 minutos. Após, realizaram-se diluições em balões de 250 mL, em duplicata, respeitando a relação $C_i V_i = C_f V_f$ (C=concentração, V=volume; i=inicial; f=final), também deixando homogeneizar as misturas em ultra-som por 5 minutos.

Realizou-se a leitura da absorbância nesse espectrofotômetro de bancada nos comprimentos de onda de 206 nm com caminho óptico de 10 mm e, 254 e 261 nm com caminho óptico de 100 mm para verificar qual dos comprimentos de onda levaria à melhor curva de calibração. Como mencionado no item 2.3, estes são os comprimentos de onda indicados para a análise espectrofotométrica do tolueno. O caminho óptico de 100 mm não é usual e este foi escolhido pois a absorbância lida, nos comprimentos de onda de 254 e 261 nm, com caminhos ópticos menores (10 e 50 mm) apresentaram valores muito baixos, próximos a zero, fora da faixa de validade da Lei de Beer. Os comprimentos de onda de 206 e 261 nm são citados por diversos autores (CHATZOPOULOS, VARMA e IRVINE, 1993; HINDARSO et al., 2001; SILVERSTEIN, 2000) para a análise da concentração de tolueno, enquanto que o comprimento de 254 nm é o comprimento de onda de trabalho do UV *on-line*, a ser utilizado em testes posteriores em planta piloto para a obtenção dos dados de curvas de ruptura. A planta utiliza este comprimento de onda, pois esta foi projetada para analisar compostos que possuam o anel benzênico em sua constituição. Portanto, caso não ocorresse diferença significativa entre as curvas obtidas se optaria pelo comprimento de onda de 254 nm.

Para a realização das medidas de absorbância da solução, primeiramente, zerou-se o espectrofotômetro de bancada com água destilada. As cubetas utilizadas eram de quartzo e estas eram mantidas em solução de Extran a 2%, que é uma solução neutra detergente. As cubetas eram vigorosamente enxaguadas para eliminar todos os traços de detergente. As medidas eram realizadas sempre da menor concentração para a maior e, entre cada medida, a célula tampada era enxaguada vigorosamente por três vezes com a solução seguinte a ser medida.

Os dados da absorbância em função da concentração foram plotados e fez-se uma regressão linear para o ajuste da reta pelo método dos mínimos quadrados no software Microsoft Excel®.

3.5 O Sistema de adsorção – Instrumentos e acessórios

Uma foto da Planta de Testes de Adsorção de Líquidos e Troca Iônica (PTA/TI) é apresentada na **Figura 3.1** e na **Figura 3.2** está apresentada a configuração da mesma. Esta planta piloto proporciona ao usuário um arranjo robusto dos seus componentes, a fim de executar várias investigações no campo de processos de adsorção. A unidade básica permite adsorção ou troca iônica de soluções aquosas à pressão ambiente e em

temperaturas, na coluna de adsorção, entre ambiente e 50°C. A coluna de vidro (**Figura 3.3**), que comporta o leito, têm diâmetro interno de 20 mm. Diferentes alturas de leito (até 600 mm) podem ser utilizadas, mediante o ajuste de um pistão móvel presente especialmente para esta finalidade. Na base da coluna e na base do pistão existem placas de vidro sinterizado que impedem que pequenas partículas de adsorvente passem para o restante da tubulação. A corrente de efluente da coluna de adsorção pode ser monitorada *on-line* com um detector ultravioleta (OPTEK®).



Figura 3.1: Foto da PTa/TI.

A PTa/TI é composta pelos componentes listados na Tabela 3.1. Como as operações de adsorção e troca iônica são processos demorados, os equipamentos contêm dispositivos para a operação automática por conexão com um microcomputador (PC). Para tal finalidade, a planta é dotada de módulos Nudam®, que são módulos de aquisição de dados, que permitem o acionamento e controle do sistema, através de uma porta serial RS-232 no PC. Os módulos permitem uma direta comunicação com uma grande variedade de sensores, podem converter, linearizar e escalonar diferentes formas de sinais. A Tabela 3.2 apresenta os módulos Nudam® existentes na PTa/TI e os dispositivos a estes ligados. O Nudam GND 6017 permite a entrada de dados analógicos, o Nudam GND 6063 funciona como um relé de saída de dados e, o Nudam GND 6013 realiza a aquisição de dados resistivos (os valores dos dados são em Volt).

3.5.1 Calibração e aferição dos equipamentos

Inicialmente, foi realizada a calibração de todos os equipamentos que compõem a PTA/TI, bem como a correlação das leituras de equipamentos da PTA/TI com equipamentos de bancada.

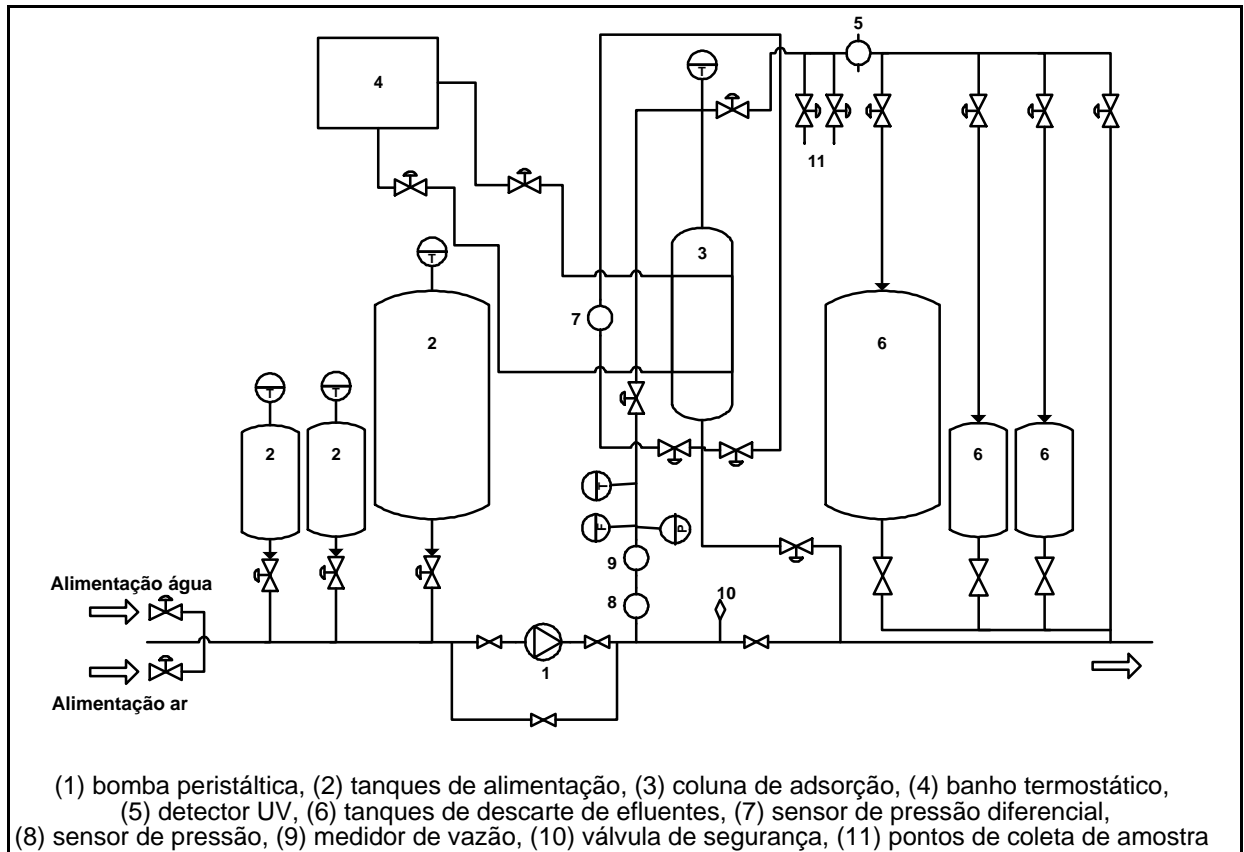


Figura 3.2: Fluxograma esquemático da planta de testes de adsorção e troca iônica - PTA/TI.



Figura 3.3: Foto da coluna de adsorção.

Tabela 3.1: Componentes da PTA/TI.

Componentes	Características	Marca e tipo
Bomba peristáltica para meios aquosos	0,12-13L/h, tubo elástico com controle externo (RS232)	Ismatec®, MCP 404
Tanque grande (2)	400 L, aço inoxidável	Eurotechnica
Tanque pequeno (4)	20 L, aço inoxidável	Eurotechnica
Coluna de adsorção (3)	Vidro, 2 colunas de 250mm e coluna 1 coluna de 600mm, diâmetro interno de 20mm	Normschliff
Banho termostático	5 – 90 °C (água deionizada)	LAUDA RM 12
Válvulas manuais (4)	-	-
Tubulação	6-8mm de diâmetro interno, aço inoxidável	Vários
Válvulas solenóides Solução aquosa	2/2, aço inoxidável, normalmente fechada	END-Automation MEAG2D332243-450
Válvulas solenóides Aquecimento fluido	3/2, aço galvanizado, normalmente aberta	END-Automation MGBG3D132245-450
Válvula de Segurança	Aço inoxidável, 0,4 – 65 bar,	-
Termorresistores (7)	PT 100 (5 instalados, 2 espera)	WIKA TR 101 1XPT100-A 4L
Sensor de pressão	Classe 0.5, 4-20mA, 10-30 VDC	WIKA S-10 0-2,5 bar
Sensor de pressão diferencial	0-600 mbar, output 4-20mA, selo Viton, 10-30 VDC	WIKA 891.34.2189
Medidor de fluxo	Faixa 0,3-3L/h, display eletrônico, flutuador magnético, compensador de temperatura	Krohne DK 37E/K010
Detector UV	Janelas de safira (10mm, 40mm), selos Viton, 254nm	OPTEK® OPL10, OPL40, Control 4422, AF46-B Ser.Nº23672
Módulos NuDAM (7)	NuDAM GND 6017, 6063 e 6013	NuDAM

Tabela 3.2: Relação de módulos Nudam® e respectivos equipamentos ligados a estes.

Módulo	Quantidade	Equipamentos ligados
Nudam GND 6017	1	Medidor de fluxo, detector UV, sensor de pressão diferencial, sensor de pressão
Nudam GND 6013	3	Termorresistores PT100
Nudam GND 6063	3	Válvulas solenóides

3.5.1.1 Aferição dos termorresistores

Os termorresistores PT100 foram aferidos, utilizando-se água pura à temperatura de fervura e gelo fundente, a fim de verificar se estes registravam as temperaturas de 100 e 0°C, respectivamente.

3.5.1.2 Curva de calibração do detector UV on-line da PTA/TI

Realizaram-se experimentos para a correlação entre os valores de absorbância lida pelo espectrofotômetro UV *on-line* com os valores do espectrofotômetro UV-VIS de bancada (CARRY 300, VARIAN), uma vez que estes possuíam características bastantes distintas. O primeiro possuía caminho óptico de 40 mm e célula de safira e o segundo caminho óptico de

100 mm e célula de quartzo. Para isso, coletaram-se amostras de efluente da planta em um amostrador especialmente projetado para tal fim, registrando-se o valor que estava sendo lido pelo espectrofotômetro *on-line* no momento da coleta da amostra cuja absorvância foi, posteriormente, lida no espectrofotômetro de bancada. Os dados foram plotados e fez-se uma regressão linear para o ajuste da reta pelo métodos dos mínimos quadrados no software Microsoft Excel[®].

3.5.1.3 Calibração da bomba peristáltica

Foi realizada a calibração da bomba peristáltica, ajustando-se diferentes rotações (5 à 240 rpm) no seu *display* frontal. No tempo zero, era colocada uma proveta graduada aferida ao final da linha para coletar toda no tempo registrado por um cronômetro. Ao final do tempo, registrava-se o volume dispensado no tempo estabelecido. Os dados foram então plotados e fez-se uma regressão linear para o ajuste da reta pelo métodos dos mínimos quadrados no software Microsoft Excel[®].

3.5.2 Configuração da interface gráfica

O software Elipse Windows foi utilizado como interface para o comando dos componentes da planta e para a aquisição de dados de absorvância, temperatura, vazão, pressão diferencial e pressão. Este software é totalmente configurável pelo usuário e as variáveis do processo podem ser visualizadas em tempo real, permitindo fácil e rápida compreensão do que está acontecendo. No Apêndice A é apresentada a metodologia para a configuração da interface gráfica utilizada no processo de adsorção. A aquisição de dados era realizada a cada intervalo de 30 min e estes dados foram registrados em banco de dados do Access Windows para posterior análise.

3.5.3 Modo de operação

Neste item é apresentada uma breve descrição do modo de operação da planta piloto utilizada para a realização dos experimentos. Esta descrição se faz importante uma vez que este é o primeiro trabalho que é desenvolvido nesta unidade. O presente trabalho será um guia básico para posteriores estudos a serem realizados na PTA/TI; portanto, ele contém os passos básicos para a utilização da mesma. Antes da ligação da planta para a iniciar os experimentos para a obtenção de dados de curva de ruptura, a coluna é condicionada conforme descrito no item 3.8.

Primeiramente, o operador deve ligar o disjuntor geral de alimentação de energia da planta. No painel de controle, ligar, nesta ordem, o disjuntor F1, F5 (liga os módulos Nudam[®]) e, finalmente, os disjuntores F2, F3 e F4 que fornecem energia para os demais

equipamentos da planta. Após, podem-se ligar todos os equipamentos que não são ligados automaticamente: espectrofotômetro *on-line*, bomba peristáltica e banho termostático.

Em seguida, liga-se o PC. Para abrir o software Elipse, no Menu Iniciar do Windows, deve-se entrar em Programas, Elipse Scada, Elipse Scada. Com o software Elipse aberto, a aplicação configurada para o monitoramento do processo (descrição da configuração realizada no item 3.5.2) deve ser aberta. Na janela do software Elipse, selecionar o ícone Abrir e procurar pelo arquivo correspondente à aplicação, cujo nome é planta_0504. Com a aplicação aberta, pressionar a tecla F8 do teclado para dar início ao monitoramento e, em seguida, abrir as válvulas correspondentes à configuração de escoamento de fluido desejada. No caso do presente trabalho, que utilizou caminho descendente, pressionar os botões das válvulas 4 (válvula do tanque de alimentação pequeno da direita), 7 (válvula que permite a entrada de fluido no topo da coluna), 10 (válvula que permite a saída de fluido da coluna), 15 (descarte). Finalmente, liga-se a bomba peristáltica para escoar o fluido.

Ao final do trabalho, antes de desligar a planta, deve-se encerrar o aplicativo do Elipse. Abrir o documento do software Access onde foram armazenados os dados de monitoramento da planta. Salvar uma cópia deste documento com um nome adequado e limpar o documento original onde foram armazenados os dados, para quando iniciar-se outra corrida, os dados não sejam gravados no mesmo documento, podendo causar confusões. Desligar o PC normalmente.

Para desligar a planta, primeiro desligar todos os equipamentos que não sejam desligados automaticamente (bomba peristáltica, espectrofotômetro *on-line* e banho termostático). Desligar os disjuntores no painel de controle da planta, na ordem indicada, F2, F3, F4, F5 e F1. Desligar o disjuntor geral da unidade.

3.6 Metodologia para a obtenção de isotermas de equilíbrio

Não há uma metodologia padronizada para obter dados de equilíbrio de adsorção. Dessa forma, a técnica aqui descrita é baseada nas descrições apresentadas em alguns trabalhos realizados por diversos autores (CHATZOPOULOS, VARMA e IRVINE, 1993; CHERN e CHIEN, 2001; HINDARSO et al., 2001) adaptados ao par adsorvente/adsorvato em estudo.

Os experimentos para obtenção de isoterma de equilíbrio foram realizados adicionando quantidades conhecidas de carvão ativado granular (8 x 12 mesh), a uma série de seis erlenmeyers dotados de tampa, contendo 250 mL de solução aquosa de tolueno na concentração de 50 ppm. As massas de carvão utilizadas foram 0,04, 0,08, 0,40, 0,80, 4,00 e 8,00 g. Estes frascos foram colocados em banho termostático agitado (DUBNOFF, TE-

053), na temperatura de 25 ± 1 °C, durante 24 h. A definição deste tempo está baseada nos resultados dos testes cinéticos, descritos no item 4.6. Juntamente com estes, um frasco adicional de solução contendo zero de massa de carvão também foi colocado nas mesmas condições, a fim de verificar o efeito do procedimento na concentração inicial da solução. Transcorridas as 24 h, as soluções de cada frasco foram filtradas em filtros (MILLEX LCR, com membrana PTFE modificada de $0,45 \mu\text{m}$ e 25 mm, MILLIPORE) e então medidas em espectrofotômetro UV visível (CARRY 300, VARIAN), no comprimento de onda de 254 nm e célula de quartzo de 100 mm.

As equações de isotermas de equilíbrio de Langmuir e Freundlich (**Tabela 3.3**) serão testadas para correlacionar os dados experimentais. Ambas as equações podem ser linearizadas e os parâmetros podem ser estimados por regressão linear por mínimos quadrados. Utiliza-se para tal finalidade uma rotina de cálculo criada no Software MatLab (Apêndice C).

Tabela 3.3: Equações de isotermas utilizadas para correlacionar os dados experimentais.

Modelo	Equação	Parâmetros
Langmuir	$q = \frac{K_2 N_1 c_e}{1 + K_2 c_e}$ Equação 2.6	$\frac{K_2}{N_1}$
Freundlich	$q = k_1 c_e^{1/n_1}$ Equação 2.7	$\frac{k_1}{n_1}$

3.7 Metodologia para realização dos testes cinéticos

Para a determinação da difusividade mássica foram realizados ensaios adicionando uma massa conhecida de carvão ativado granular (1 e 2 g) a um erlenmeyer dotado de tampa, contendo 250 mL de solução aquosa de tolueno (100 ppm). Este frasco e um outro, contendo zero de massa de carvão, foram colocados em banho termostático agitado (DUBNOFF, TE-053) na temperatura de 25 ± 1 °C. Em intervalos de tempo determinados, previamente estabelecidos, uma alíquota da solução de cada frasco foi filtrada (filtros MILLEX LCR, com membrana PTFE modificada de $0,45 \mu\text{m}$ e 25 mm, MILLIPORE) e então analisada em espectrofotômetro UV visível (CARRY 300, VARIAN), no comprimento de onda de 254 nm e célula de quartzo de 100 mm. A célula era completamente seca para evitar efeitos de diluição. Após a medida, a alíquota era retornada para o frasco, que era colocado novamente no banho. Este procedimento foi repetido até que a absorbância da solução de cada frasco não variasse mais com o tempo. O experimento foi realizado em triplicata.

Os valores de concentração de tolueno no sólido são obtidos através do balanço de massa dado pela Equação 2.4. Então a Equação 2.19, juntamente com os dados

experimentais é usada para a estimação do coeficiente de difusividade, realizada com o auxílio de rotina de cálculos criada no software MatLab (Apêndice C). Conhecendo-se o valor de D_s pode-se, então, estimar através da relação dada na Equação 2.31 o coeficiente de transferência de massa na fase sólida (k_s).

3.8 Obtenção de curvas de ruptura experimentais

Os experimentos para a obtenção das curvas de ruptura foram realizados na PTA/TI. Uma quantidade de carvão ativado era previamente pesada e então acondicionada na coluna de adsorção. Para a eliminação de bolhas de ar, fazia-se escoar água destilada através do leito, e, em seguida, a coluna era acoplada na planta. O procedimento para início de cada um dos experimentos foi realizado conforme descrito no item 3.5.3. Nos experimentos os dois fatores variados foram a vazão e a altura do leito. A **Tabela 3.4** apresenta os níveis desses fatores. Os níveis de vazão foram assim escolhidos pois normalmente trabalha-se com vazões na faixa de 0,2-15 L/h em correntes de fluxo descendente ao leito (COONEY, 1999), como no caso deste trabalho.

Tabela 3.4: Níveis em que os fatores manipuláveis foram analisados.

Fator	Nível baixo	Nível alto
Altura do leito (cm)	5	10
Vazão (L/h)	0,8	1,6

Para a corrente de alimentação, foram preparadas soluções de aproximadamente 50 ppm em balões volumétricos de 5 L. Estas soluções foram colocadas no tanque de alimentação pequeno da PTA/TI. Durante os experimentos de aquisição de dados de adsorção em leito fixo, os quais serão denominados de Corridas, foram realizadas coletas de amostras do tanque de alimentação, para o acompanhamento da concentração da alimentação (c_0). As amostras foram coletadas em vidros âmbar de 200 mL e analisadas posteriormente no espectrofotômetro de bancada. Foi calculada a concentração média da alimentação por meio da média aritmética dos valores de todas as amostras colhidas durante cada experimento, obtendo-se, dessa forma, um c_0 médio para cada corrida.

Capítulo 4

Resultados e Discussão

Neste capítulo são apresentados os resultados experimentais obtidos no presente trabalho, juntamente com uma discussão ao seu respeito, procurando sempre realizar a comparação com outros trabalhos existentes na literatura. Também são apresentadas as dificuldades ocorridas durante a realização das atividades, uma vez que nenhum trabalho experimental sobre adsorção de compostos orgânicos em leito fixo de carvão ativado granular em planta piloto havia sido realizado no Departamento de Engenharia Química da UFRGS e esta descrição será de grande valia para trabalhos posteriores a serem realizados. Os dados completos dos experimentos realizados são apresentados no Apêndice B.

4.1 Caracterização do carvão

O resultados das análises do carvão vegetal granular são apresentados na **Tabela 4.1**. Tipicamente, os valores de área superficial de carvões ativados estão na faixa de 600 a 2000 $\text{m}^2.\text{g}^{-1}$ (COONEY, 1999). Como pode ser observado, o valor de área superficial do carvão utilizado, 681 $\text{m}^2.\text{g}^{-1}$, encontra-se no limite inferior desta faixa, o que pode ter grande influência na adsorção. Isso se deve ao fato de que na adsorção, normalmente, grandes áreas superficiais significam alta adsorção de compostos orgânicos, especialmente de compostos orgânicos apolares. A adsorção de VOC em carvão ativado, então, está usualmente relacionada à área superficial dos carvões e, assim, ela é um importante atributo na seleção de adsorventes para os processos de separação.

O valor médio de diâmetro de poros é obtido a partir do teste de caracterização da área superficial, pelo método da isoterma BET. Como se pode observar na **Tabela 4.1**, de acordo com a classificação apresentada no Capítulo 2, o tamanho dos poros do carvão analisado se enquadra como mesoporos.

O conteúdo de cinzas está relacionado ao conteúdo de minerais, presentes no material que deu a origem ao carvão e, pode, também, ser influenciado pelo método de ativação do carvão. O teor de cinzas obtido na caracterização se encontra na média, para alguns tipos de carvões vegetais, que ficaram na faixa de 1,42 a 9,60 %, segundo os dados apresentados por Bansode *et al.* (2003).

Segundo Bansode *et al.* (2003), a massa específica *bulk* é uma variável importante no projeto de colunas de adsorção e afeta o custo global do processo de adsorção, já que

carvões com altas massas específicas, geralmente, não têm de ser regenerados tão freqüentemente pois eles podem adsorver mais adsorvato por unidade de volume. Usando o valor da massa específica *bulk*, foi calculada a porosidade que apresentou o valor de 0,70. O valor obtido ($0,50 \text{ g.mL}^{-1}$) para a massa específica *bulk* é um valor mediano, quando comparado com outros valores citados na literatura para carvões vegetais. Bansode *et al.* (2003) obtiveram valores na faixa de 0,30 a $0,57 \text{ g.mL}^{-1}$.

Quanto ao tamanho de partículas, para que houvesse maior uniformidade no leito de carvão nos experimentos, optou-se por trabalhar com a faixa granulométrica 8 x 12 mesh (faixa em que se encontrava a maior fração das partículas, cerca de 90%). O diâmetro das partículas foi obtido a partir do cálculo da média aritmética dos valores de abertura das peneiras de 8 e 12 mesh.

O pH da solução de carvão pode afetar diretamente o processo de adsorção e pode influenciar no pH final do tratamento de efluentes, por exemplo. Por essa razão, um pH próximo da neutralidade é geralmente preferível. Enxágües com soluções ácidas ou com água são efetivos na remoção de cinzas alcalinas dos carvões e, dessa forma, causam a diminuição do pH da solução em equilíbrio com o carvão (BANSODE *et al.*, 2003). O valor de pH da água posta em contato com o carvão apresentado na **Tabela 4.1** é correspondente ao carvão que sofreu lavagens com água destilada e deionizada. Pode-se comparar este valor com o encontrado para o carvão original, **Tabela 4.5**, mais alcalino.

Tabela 4.1: Dados referentes à caracterização do carvão vegetal granular utilizado no presente estudo.

Propriedades físicas e químicas	Valor
Área superficial	$681 \text{ m}^2.\text{g}^{-1}$
Umidade, b.u.	15,4%
Cinzas, b.u.	8,7%
Massa específica <i>Bulk</i>	$0,50 \text{ g.mL}^{-1}$
Massa específica Real	$1,72 \text{ g.mL}^{-1}$
Granulometria	8x12 mesh
Diâmetro da partícula	1,895 mm
pH da solução 1% (m/m) de carvão	8,3
Média de diâmetro de poros	23,7 Å

4.2 Pré-tratamento do carvão

Como foi comentado no item 3.3, lavagens do carvão são indicadas como pré-tratamento, principalmente para a eliminação de finos e possíveis impurezas. Alguns pesquisadores optam por lavagem somente com água (CHATZOPOULOS, VARMA e IRVINE, 1993) e outros por lavagem com ácido e posterior enxágüe com água (CHERN e CHIEN, 2001, 2002). No entanto, a literatura não apresenta maiores detalhes quanto às

metodologias empregadas. Dessa forma, foi realizada a análise dos resultados obtidos usando as duas metodologias propostas no presente trabalho para definir a que será usada. Levou-se em consideração o tempo de exposição de cada lavagem, o número de lavagens utilizadas, o deslocamento do pH da solução de água em contato com o carvão e o tempo de centrifugação para o estabelecimento da melhor técnica a ser usada.

Os resultados de absorvância da água de enxágüe do carvão que sofreu o pré-tratamento com solução ácida de HCl, em função do tempo de centrifugação, são apresentados na Tabela 4.2. Como pode ser observado, no tempo de 6 min de centrifugação, obteve-se aproximadamente zero de absorvância, portanto este tempo será utilizado na análise das soluções nos testes de isotermas de equilíbrio e testes cinéticos. Deve-se levar em consideração que todos os valores apresentados de absorvância corresponderiam a menos que 1 ppm de tolueno.

Tabela 4.2: Descrição da variação da absorvância de acordo com o tempo de centrifugação da água de lavagem do carvão com HCl ($\lambda=206$ nm e L=10mm).

Tempo (min)	Absorvância (%)
0	0,0114
1	0,0207
2	0,0080
3	0,0102
4	0,0042
5	0,0074
6	0,0006
7	0,0016

Também realizou-se a medida de pH da água utilizada antes e após a lavagem do carvão para o ensaio do tempo de centrifugação, obtendo-se os valores de 5,8 e 2,5, respectivamente, para o teste realizado. Em vista do exposto, optou-se por realizar experimento posterior para a análise da variação do pH da água de lavagem de acordo com o tempo de exposição ao carvão. Para tanto, utilizaram-se duas amostras (A e B) de 10 gramas do carvão lavado com HCl e água deionizada, seco em estufa a 110° C. A amostra pesada foi colocada em frascos com 100 mL de água deionizada, e estes frascos foram deixados em banho termostático agitado à temperatura de 35 °C. Medidas de pH foram realizadas de tempos em tempos, a partir do tempo zero. Observa-se, na **Tabela 4.3**, que o pH da solução analisada aumentou conforme aumentou o tempo de exposição ao carvão submetido à lavagem ácida.

Tabela 4.3: Valores de pH na água de lavagem do carvão ativado lavado com ácido.

Tempo de exposição (h)	Amostra A	Amostra B
	pH	
0	4,3	4,4
1	4,5	4,7
2	4,7	4,8
5	4,8	5,0
6	5,1	5,1
23	5,5	5,4

No pré-tratamento com água pura (pH = 6,1), as amostras coletadas das duas primeiras lavagens foram centrifugadas em diferentes tempos para definir o tempo de centrifugação, que foi fixado em 6 minutos, pois foi observado que a partir desse não havia mudança considerável da absorvância apresentada pela solução (**Tabela 4.4**). Também realizou-se medida de pH da água de lavagem sem ser centrifugada. Pode ser observado, também, na **Tabela 4.4** que houve uma diminuição da absorvância, conforme o aumento do número de lavagens. Exceções foram os valores obtidos após a 7ª e a 8ª lavagem, em que observou-se visualmente uma maior turbidez, provavelmente devido à formação de finos devido a agitação no meio de lavagem e/ou problemas na coleta da amostra de água.

Comparando os dois tipos de pré-tratamento testados, a lavagem em que foi empregada somente água foi escolhida como pré-tratamento do carvão para os testes a serem realizados no presente trabalho, pois neste ensaio observou-se o menor deslocamento do pH do carvão em relação ao original, uma vez que o pH original do carvão era 9,4 e o pH do carvão após a lavagem com água foi 8,3 (**Tabela 4.5**) e o pH do carvão após a lavagem com ácido e posterior enxágüe com água, ficou em torno de 4,3-5,5 (**Tabela 4.3**). Esta alteração do pH do carvão é importante de ser analisada, uma vez que pode ser alterado o caráter hidrofóbico da superfície do carvão, e, portanto, as suas características no processo de adsorção. Um carvão que é considerado hidrofóbico assume uma carga positiva quando imerso em água, pela adsorção de íons H⁺, tornando a água alcalina (COONEY, 1999), situação que se estabelece quando o segundo tipo de lavagem foi empregado no caso do carvão estudado. Além disso, a facilidade do tratamento se apresenta mais vantajosa, pois não é necessária a utilização de solução ácida, que após o procedimento descrito gera um resíduo ácido que deve ser tratado para o seu descarte, o que gera mais uma operação no processo e mais gastos de tempo e dinheiro. A lavagem realizada somente com água reduziu em mais de 10 vezes a absorvância da solução em contato com o carvão, mostrando-se uma metodologia bastante eficaz para a preparação do carvão, apesar de não ter chegado a patamares de adsorvância tão baixos como no caso da lavagem ácida. O valor de absorvância apresentado após a 10ª lavagem corresponderia a aproximadamente 2,5 ppm de tolueno.

Tabela 4.4: Valores obtidos de pH e absorvância para a solução da lavagem somente com água após cada lavagem.

1º Lavagem		2º Lavagem	
pH	9,1	pH	9,2
Tempo (min)	Absorvância (%)	Tempo (min)	Absorvância (%)
0	1,4861	0	1,3977
2	1,1998	2	-
6	1,1750	6	0,7275
12	1,2009	12	0,7141
24	1,2419	24	-
3º Lavagem		5º Lavagem	
pH	9,4	pH	9,9
Tempo (min)	Absorvância (%)	Tempo (min)	Absorvância (%)
0	0,9502	0	1,0055
6	0,4669	6	0,3815
6º Lavagem		7º Lavagem	
pH	9,8	pH	9,8
Tempo (min)	Absorvância (%)	Tempo (min)	Absorvância (%)
0	0,4078	0	0,3121
6	0,1719	6	0,2043
8º Lavagem		9º Lavagem	
pH	9,5	pH	9,6
Tempo (min)	Absorvância (%)	Tempo (min)	Absorvância (%)
0	0,8362	0	0,3279
6	0,3583	6	0,1459
10º Lavagem			
pH	9,5		
Tempo (min)	Absorvância (%)		
0	0,2087		
6	0,0867		

Tabela 4.5: Comparação do pH do carvão antes e após a lavagem com água.

Ensaio	Massa carvão s/lav. (g)	Massa total s/lav. carvão + água (g)	Massa carvão c/lav. (g)	Massa total c/lav. Carvão + água (g)	pH carvão s/lav.	pH carvão c/lav.
1	1,02	100,05	1,00	100,00	9,2	8,3
2	1,00	100,01	1,00	100,05	9,5	8,3
3	1,00	100,04	1,00	100,11	9,5	8,2
Média	-	-	-	-	9,4	8,3

4.3 Determinação da concentração de tolueno

As Figuras 4.1 a 4.3 apresentam as retas de calibração de concentração de tolueno obtidas. A faixa de concentração inicial em que estes experimentos foram realizados foi de 1,6-20 ppm. Verificou-se, então, que não havia diferença representativa entre o comprimento de 254 nm e os outros dois testados, assim optou-se por ele pois é o mesmo de trabalho do espectrofotômetro da PTA/TI. Dessa forma, a faixa de análise de concentração foi estendida até 72 ppm para a elaboração da curva completa que varresse

toda a faixa de trabalho. Portanto, o comprimento de onda de 254 nm e caminho óptico de 100 mm, foram utilizados para a análise das soluções de tolueno, no UV de bancada.

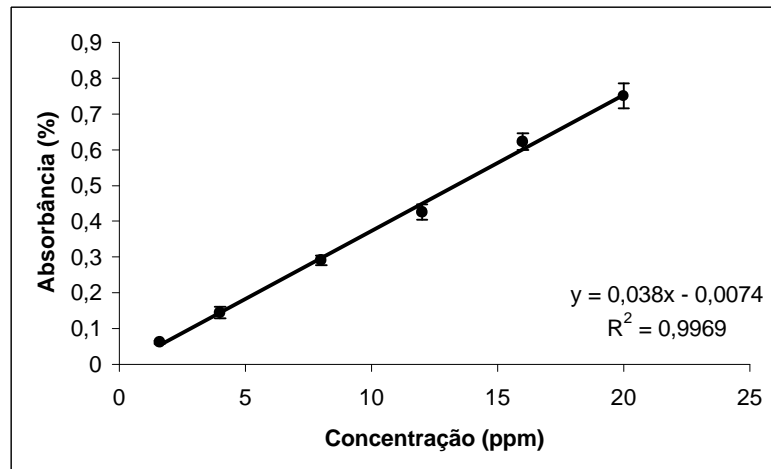


Figura 4.1: Curva de calibração de concentração de tolueno utilizando-se comprimento de onda de 206 nm e caminho óptico de 10 mm.

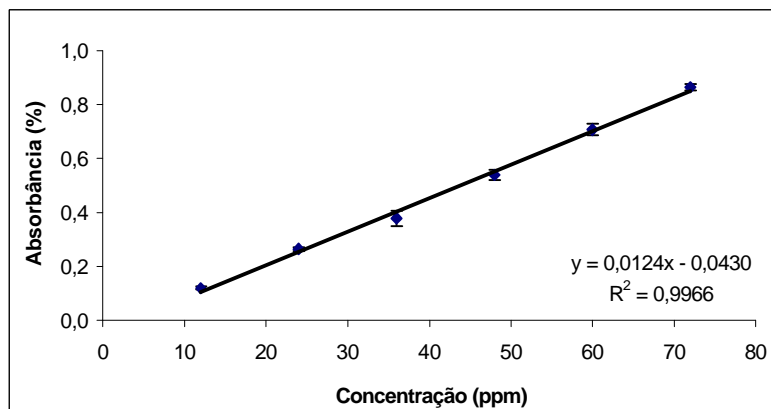


Figura 4.2: Curva de calibração de concentração de tolueno utilizando-se comprimento de onda de 254 nm e caminho óptico de 100 mm.

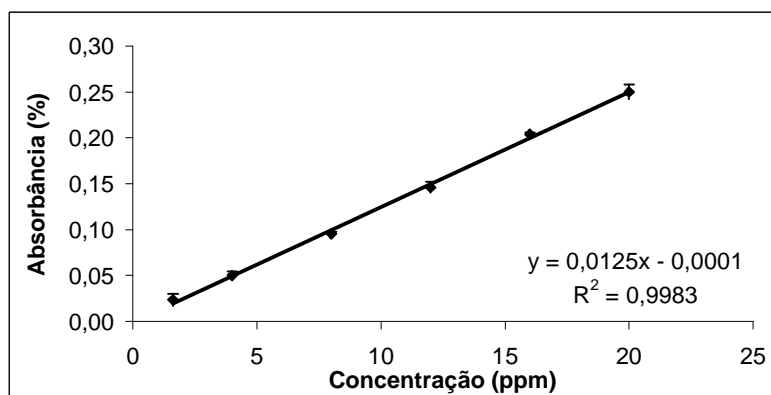


Figura 4.3: Curva de calibração de concentração de tolueno utilizando-se comprimento de onda de 261 nm e caminho óptico de 100 mm.

Também realizou-se a varredura do espectro de uma solução de tolueno de 60 ppm com os dois caminhos ópticos utilizados para a realização das curvas de calibração anteriormente citadas. A **Figura 4.4** apresenta estas varreduras, na qual pode-se notar que a intensidade do sinal no comprimento de onda de 206 nm, para ambos os caminhos ópticos, é superior a uma unidade de absorbância, o que evidencia que este comprimento não pode ser utilizado quando são analisadas soluções mais concentradas de tolueno, mas é um bom comprimento de trabalho para soluções diluídas. Já nos outros dois comprimentos utilizados para a realização das curvas de calibração (254 e 261 nm), pela observação dos sinais dos espectros, pode-se verificar que o caminho óptico de 100 mm utilizado é adequado para a análise.

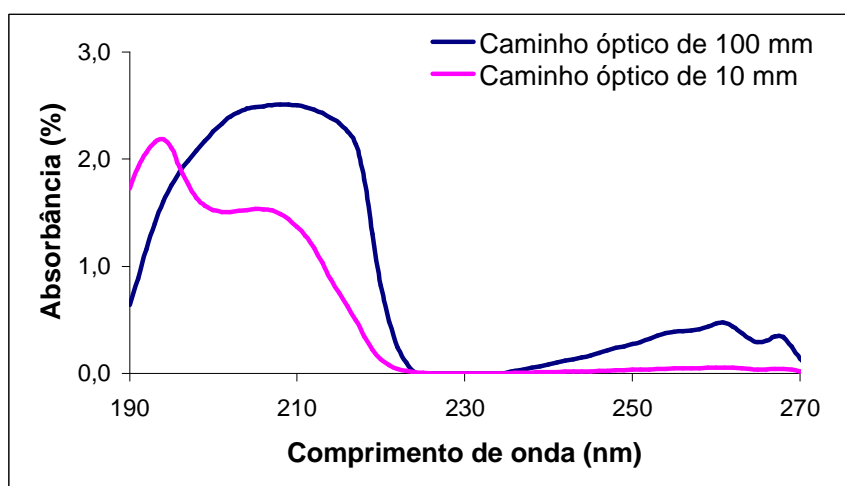


Figura 4.4: Espectros de varredura de uma solução de tolueno de 60 ppm utilizando diferentes caminhos ópticos.

Ampliando a região do espectro realizado com o caminho óptico de 100 mm correspondente a faixa 240 – 270 nm, é possível visualizar os sinais dos comprimentos de onda de 254 e 261 nm (**Figura 4.5**). Verifica-se que no comprimento de onda de 261 nm o sinal se mostra mais intenso e que em 254 nm há uma sobreposição de dois picos e a formação de um patamar.

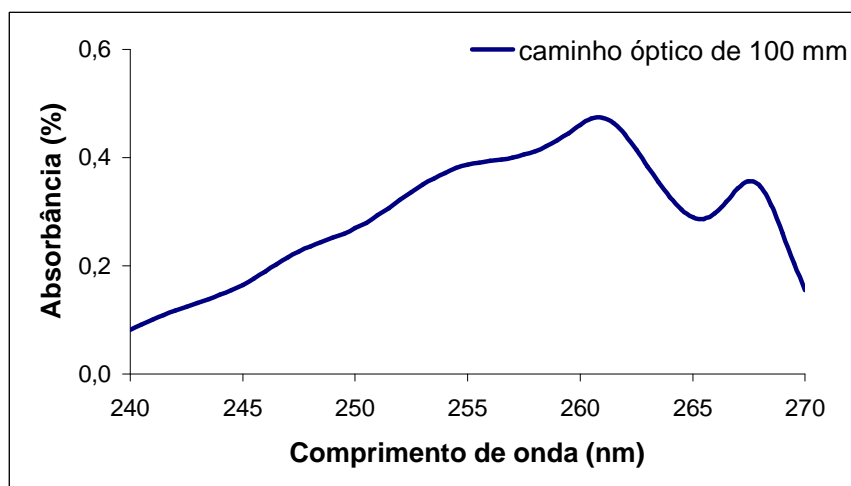


Figura 4.5: Detalhamento do espectro de varredura de uma solução de tolueno de 60 ppm.

Durante a obtenção dos dados de isoterma de equilíbrio, observou-se que a metodologia previamente selecionada para a separação de finos em suspensão, antes da análise em espectrofotômetro de bancada não era adequada para o trabalho em questão. Com a centrifugação, havia perdas de tolueno, possivelmente devido à rotação e ao leve aquecimento dos tubos centrifugados. Os primeiros experimentos, dessa forma, apresentaram grande incoerência de valores de absorbância ao analisarem-se as amostras. Com a repetição dos experimentos, e confirmação da continuidade da ocorrência de resultados incoerentes, questionou-se a adequação da metodologia utilizada.

Dessa forma, realizaram-se testes em que soluções de tolueno de concentrações conhecidas foram analisadas antes e após a centrifugação, onde verificou-se que as leituras de absorbância eram menores após a centrifugação, evidenciando a perda de tolueno.

Então, como alternativa para a remoção de finos de carvão que pudessem estar presentes em suspensão após os testes de equilíbrio, utilizaram-se membranas filtrantes (MILLEX LCR, com membrana PTFE modificada de 0,45 μm e 25 mm, MILLIPORE). Este foi o meio empregado para separar possíveis finos de carvão que ficassem em suspensão nos experimentos de isoterma de equilíbrio e teste cinético. Para avaliar se os filtros, além de removerem os finos em suspensão, também removiam tolueno, as soluções preparadas tiveram a sua absorbância medida antes e após a filtração com membrana filtrante. A reta apresentada na **Figura 4.6** corresponde aos dados obtidos nestes testes, com a solução sem ser filtrada.

Os dados da absorbância das soluções filtradas em função da concentração foram plotados e fez-se uma regressão linear para o ajuste da reta pelo método dos mínimos

quadrados no software Microsoft Excel[®]. Uma reta foi então obtida (**Figura 4.6**), que será utilizada para converter os dados de absorvância em concentração naqueles testes em que a solução for filtrada (testes de equilíbrio e cinético).

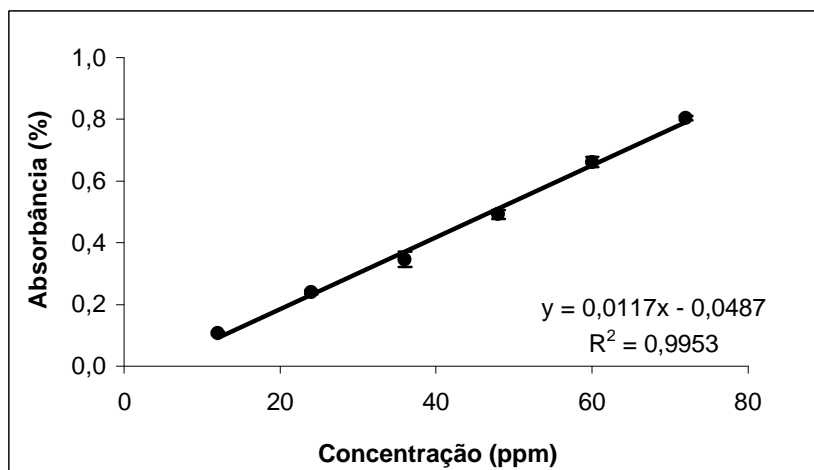


Figura 4.6: Curva de calibração de concentração de tolueno para soluções filtradas utilizando-se comprimento de onda de 254 nm e caminho óptico de 100 mm.

4.4 Posta em marcha de planta de testes de adsorção e troca iônica

Durante a posta em marcha da planta de adsorção, verificou-se que o medidor de vazão apresentava problemas e este foi desligado da PTA/TI; todos os demais instrumentos não apresentaram nenhum defeito ou problemas. Os termorresistores estavam adequados de acordo com o teste aplicado.

Diversas dificuldades foram enfrentadas para a obtenção dos dados para a elaboração da curva de calibração entre os espectrofotômetros utilizados no presente trabalho, principalmente no que se refere à coleta de amostras, como será comentado a seguir. Acreditava-se, inicialmente, que para a coleta de amostras de efluente da planta, grande quantidade de solução deveria percola-lá para garantir que a concentração da solução fosse realmente a desejada, e, dessa forma, não houvesse efeitos de diluição no percurso, o que levou um longo período de tempo.

Para a realização da coleta de amostras, primeiramente, tentou-se utilizar os pontos de coleta existentes na PTA/TI, na sua configuração. Devido a sua localização na planta, em um ponto anterior à passagem pelo UV *on-line*, em um nível abaixo, eles não puderam ser utilizados. Esta localização impossibilitou as coletas, pois quando as válvulas dos coletores

eram abertas, a solução que preenchia a tubulação, principalmente a parte superior, descia pelo ponto de coleta de amostra, deixando a tubulação parcialmente vazia, já que a vazão utilizada era baixa. Este fato fazia com que o UV *on-line* se esvaziasse e houvesse formação de bolhas de ar na janela de leitura deste, além de promover a descalibração do equipamento, fazendo com que houvesse a necessidade de nova calibração e reiniciação dos trabalhos. Tentativas de aumento da vazão não foram feitas, uma vez que estas até poderiam solucionar o problema nesta parte do trabalho, mas quando os experimentos de adsorção com leite estivessem acontecendo estes pontos não poderiam ser utilizados para possíveis coletas de amostras, já que estes eram feitos em baixa faixa de vazão.

Assim, optou-se por realizar a coleta de amostras no final da tubulação, antes dos tanques de efluentes. Com o auxílio de mangueiras, a amostra era coletada em vidros âmbar de 200 mL. As amostras, primeiramente, eram colhidas na alimentação e na saída e, então, analisadas no espectrofotômetro de bancada para garantir que toda a planta tivesse com a solução na mesma concentração. No entanto, sempre que estas amostras (alimentação e saída) eram confrontadas, havia diferença nas absorbâncias apresentadas por elas. Sempre os valores de absorbância da alimentação eram bastante superiores aos da saída, demonstrando ou que a planta não estava completamente “lavada” com a solução de tolueno ou que estava acontecendo alguma perda de soluto durante o processo. Para eliminar estas hipóteses, passou-se uma solução de concentração conhecida na planta por um longo período, uma semana, aproximadamente. Durante este período, analisaram-se amostras da alimentação e da saída e os valores de absorbância não concordavam (**Tabela 4.6**), demonstrando que, apesar do tempo, esta discrepância entre os valores de absorbância não deixava de ocorrer.

Tabela 4.6: Leituras de absorbância de pares de amostras coletadas na alimentação e na saída da PTA/TI, para verificação da concentração da solução na linha, sem amostrador especial.

Absorbância (%)			
Alimentação	Saída	Alimentação	Saída
0,4407	0,2736	1,3691	0,8819
0,4200	0,2580	1,3360	0,8282
0,7805	0,3794	1,1989	0,5827
0,7922	0,4598	1,1953	0,7194
0,8117	0,4308	1,4082	0,5081
0,8122	0,4418	1,4225	0,4894
0,7535	0,4399	1,3948	0,2036
0,7646	0,3828	1,3972	0,2076
0,5997	0,934	0,9257	0,2119
1,4530	0,9698	1,0449	0,1954
1,4060	0,8959	0,6229	0,1877
1,4281	0,8839	0,6203	0,1847

Observando a coleta no final da linha, verificou-se que, como a vazão era baixa, o frasco de amostra demorava para encher, o que poderia ocasionar a perda de tolueno para o ambiente, já que a coleta era em vaso aberto. Posteriormente, verificou-se que a solução que chegava ao frasco coletor percorria um percurso de aproximadamente 2 m, escoando em um tubo quase vazio. Formava-se um pequeno filete de líquido escoando no tubo, permitindo uma possível perda de tolueno naquele percurso, também.

Tentativas de deslocamento da mangueira para pontos mais altos foram realizadas, o que possibilitou que esta permanecesse cheia de solução. Contudo, isso não foi suficiente, pois no final da linha ainda a coleta era realizada em um frasco que estava em ambiente aberto. Acoplaram-se mangueiras bastante finas, que eram introduzidas no fundo do frasco de coleta de amostra, para que a solução que ali chegasse não tivesse contato com o ambiente e permitia-se que a solução transbordasse por ele por algum tempo para ambientá-lo e tentar diminuir a perda de tolueno. Estas tentativas fizeram com que diminuísse um pouco a diferença entre os valores de absorvância entre a alimentação e a saída, mas ela ainda existia e devia ser considerada.

Finalmente, confeccionou-se um amostrador de vidro específico para a coleta de amostra. Ele tem capacidade de 200 mL, aproximadamente, é semelhante a uma bureta, só que mais curto e com um diâmetro maior, com as duas extremidades afuniladas. Em uma delas ele possui uma válvula manual, do tipo que se usa em vidrarias de laboratório, e a outra extremidade é aberta. Este amostrador foi disposto na planta, em um ponto mais alto do que toda a tubulação para permitir que esta estivesse sempre cheia, com a extremidade que possuía a válvula para baixo, onde era acoplada a mangueira que vinha da planta. A outra ponta do amostrador era conectada a outra mangueira, bastante fina, que gotejava no tanque de efluente.

Realizaram-se novas coletas de amostras, permitindo que a solução enchesse o amostrador e transbordasse por cerca de dez minutos, no mínimo, entre as coletas de amostras. Analisaram-se as soluções antes e após passagem pela planta sem leito e os dados de absorvância entre a alimentação e a saída apresentaram valores bastante próximos.

Assim, iniciou-se a coleta de amostras de efluente da planta. Nos testes preliminares, ao se coletarem as amostras, registravam-se os valores de absorvância apresentados pelo UV *on-line* em uma planilha e, então, realizavam-se as análises no espectrofotômetro de bancada. Na **Figura 4.7** está apresentada a reta obtida que correlaciona os dados de absorvância entre os espectrofotômetros utilizados no presente trabalho, bem como a equação que representa estes dados. Esta equação da reta, juntamente com a equação da

reta de calibração da solução de tolueno, serão utilizadas para converter os valores de absorvância lidos pelo UV on-line e armazenados pelo aplicativo criado para o monitoramento da PTA/TI, durante os experimentos de obtenção de curvas de ruptura.

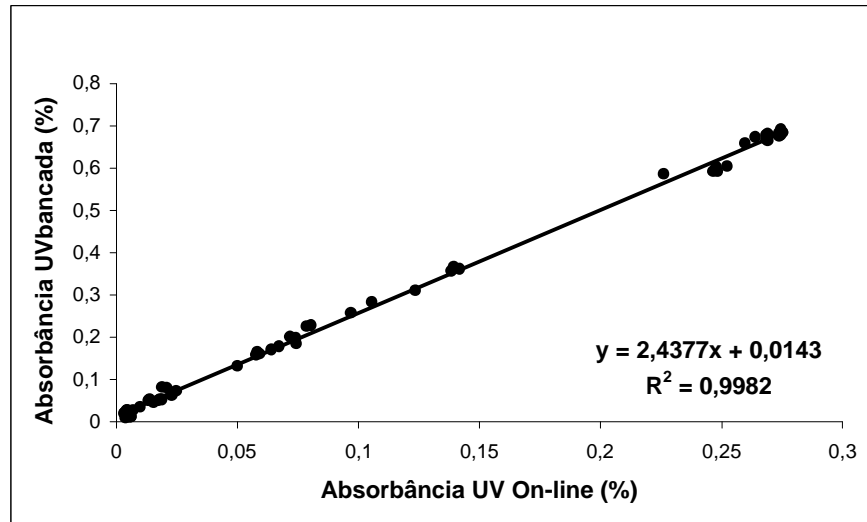


Figura 4.7: Retas de calibração entre os espectrofotômetros de bancada e *on-line*.

A reta de calibração da bomba peristáltica é apresentada na **Figura 4.8**. Esta será utilizada para o ajuste da rotação utilizada conforme a vazão desejada para os experimentos de obtenção de dados de curvas de ruptura.

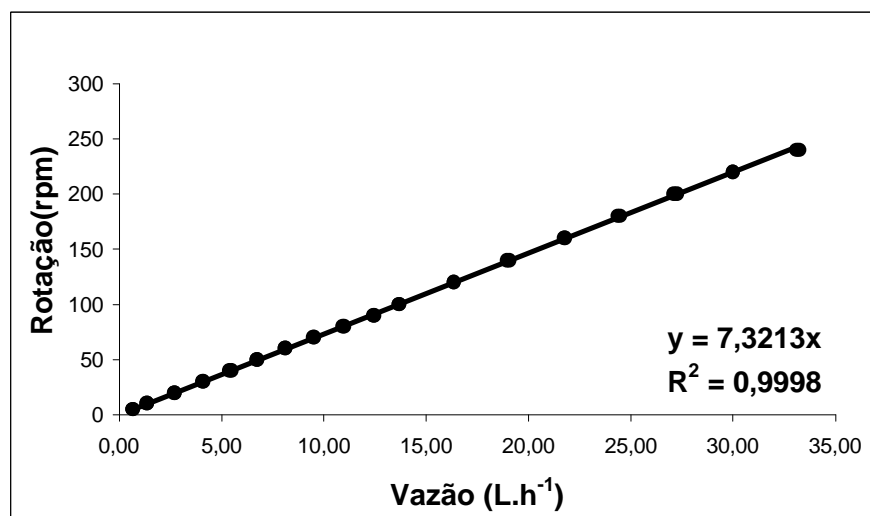


Figura 4.8: Retas de calibração da bomba peristáltica.

4.5 Isotermas de equilíbrio

Para a avaliação dos dois modelos de equação de isotermas de equilíbrio ajustados utilizaram-se os seguintes índices: o erro médio relativo (EMR) do modelo calculado pela Equação 4.1, o coeficiente de correlação (R^2) calculado pela Equação 4.2 e o valor de RMS (*root mean square percent error*) calculado pela Equação 4.3.

$$EMR = \frac{1}{d} \sum_{i=1}^d \left| \frac{S_i^{obs} - S_i^{calc}}{S_i^{obs}} \right| \times 100 \quad (4.1)$$

onde d é o número de dados, S_i^{obs} é o valor observado de q e S_i^{calc} é o valor calculado de q utilizando os parâmetros estimados do modelo.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^d (S_i^{calc} - S_i^{obs})^2}{\sum_{i=1}^d (S_i^{obs} - \bar{S})^2} \quad (4.2)$$

onde \bar{S} é a média global dos valores observados de q .

$$RMS = 100 \times \left(\frac{1}{d} \sum_{i=1}^d \left[\frac{S_i^{obs} - S_i^{calc}}{S_i^{obs}} \right]^2 \right)^{1/2} \quad (4.3)$$

No estudo dos dados de isotermas de equilíbrio, verificou-se que o modelo de Langmuir não era adequado para descrever o equilíbrio, tendo apresentado valores inconsistentes para os parâmetros. Já os dados experimentais se ajustam ao modelo de Freundlich. Os valores dos parâmetros estimados são apresentados na **Tabela 4.7**. Na **Figura 4.9** estão apresentados os dados experimentais e a curva que descreve o modelo de Freundlich. Nota-se que a curva apresenta um formato levemente côncavo. Pode-se observar que os valores de EMR e RMS foram muito altos, demonstrando que o ajuste não foi satisfatório. São considerados adequados os valores até 10% para ambos os índices.

Tabela 4.7: Parâmetros da Equação da Isoterma de Freundlich.

Parâmetros	Valores
k_1 ($\text{mg}^{-0.1344} \cdot \text{L}^{1.1344} \cdot \text{g}^{-1}$)	1,5776
n_1	0,8815
EMR (%)	10,75
R^2	0,9794
RMS (%)	14,66

Como foi comentado no Capítulo 2, os valores mais usuais para o parâmetro n_1 da isoterma de Freundlich são superiores à unidade, que são os valores obtidos quando se

trabalha com isoterma favoráveis. Os valores de n_1 obtidos por Chatzopoulos, Varma e Irvine (1993) para tolueno em fase aquosa foram de 1,934 (para $c_e < 1,35 \text{ mg.L}^{-1}$), 3,610 (para a faixa de concentração de $1,35 - 25 \text{ mg.L}^{-1}$) e 23,474 (para $c_e > 25 \text{ mg.L}^{-1}$), com valores de RMS de 2,87, 2,01 e 0,89, respectivamente. Nota-se que estes autores obtiveram valores de RMS bastante inferiores aos encontrados no presente trabalho. No trabalho realizado por Hindarso *et al.* (2001), os autores consideraram que o modelo de Freundlich não descreveu adequadamente o equilíbrio a baixas concentrações. No entanto, pode-se verificar que o parâmetro n_1 também apresentou valor superior ao unitário (6,2735, com RMS de 8,97). Ambos trabalhos citados possuíam formato de isoterma de equilíbrio favorável. Nenhum outro trabalho foi encontrado na literatura que possuísse um sistema semelhante à presente pesquisa, com sistema de adsorção de tolueno em fase aquosa em carvão ativado granular, que fosse descrito pelo modelo de Freundlich, com formato de isoterma de equilíbrio côncava, para comparação. Todos os demais trabalhos pesquisados, com sistema de carvão ativado granular com outros solutos também possuíam forma da isoterma de equilíbrio favorável e, aqueles que puderam ser descritos pela equação da isoterma de Freundlich, dessa forma, também apresentaram valores de n_1 superiores à unidade.

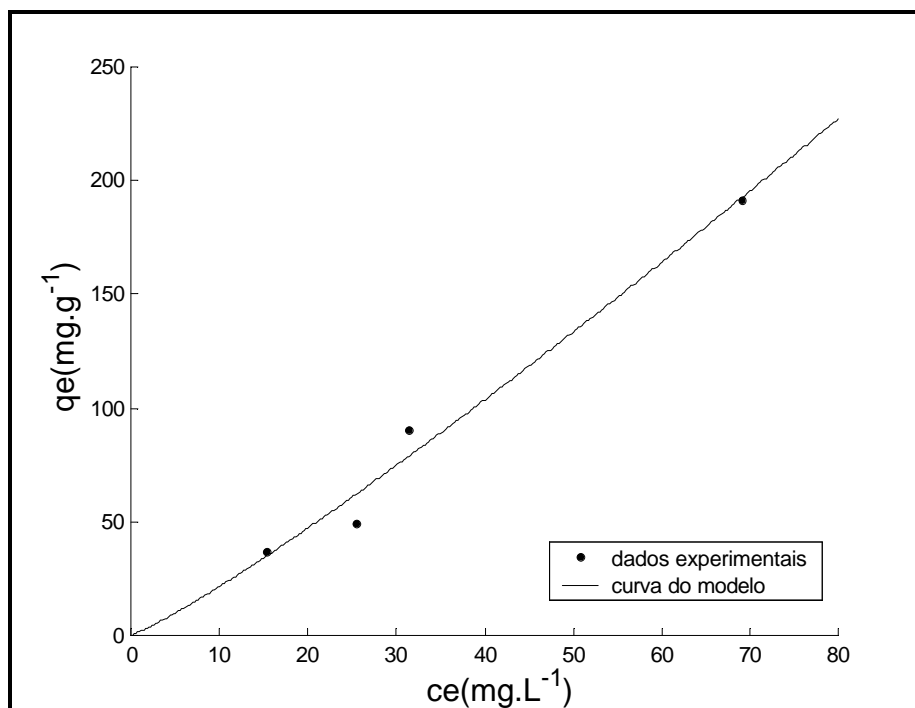


Figura 4.9: Isoterma de equilíbrio de Freundlich a 25° C .

4.6 Testes cinéticos

Na **Figura 4.10** e **Figura 4.11** são apresentados os dados experimentais e a curva do modelo dada pela Equação 2.19, para os testes cinéticos com 1 e 2 g de carvão, respectivamente. Nestas figuras é possível observar que o modelo correlacionou melhor os dados do experimento com 2 g de carvão, fato este já evidenciado pelos valores inferiores de EMR e RMS deste teste. No experimento com 1 g de carvão, o modelo não foi capaz de prever o comportamento da porção final da curva. Considerou-se que, em ambos experimentos, a partir de aproximadamente 13 h a concentração na fase sólida se torna aproximadamente constante.

Os valores do parâmetros estimados, obtidos a partir dos dados dos experimentos com 1 e 2 g de carvão, são apresentados na **Tabela 4.8**.

Tabela 4.8: Valores de difusividade mássica efetiva obtidos a partir da estimação de parâmetros.

	Testes com 1 g de carvão	Testes com 2 g de carvão
c_0 (mg.L ⁻¹)	108	108
Difusividade mássica (cm ² .h ⁻¹)	$6,5 \cdot 10^{-4}$	$5,7 \cdot 10^{-4}$
k_s (cm.h ⁻¹)	0,0172	0,0151
EMR (%)	8,0841	5,0570
R^2	0,9638	0,9698
RMS (%)	12,74	6,97

Observa-se na **Tabela 4.8** que há uma pequena diferença entre os dois valores de D_s . Esta pequena diferença indica que na faixa de estudo não há variação considerável de D_s com relação à massa, o que sugere o uso de sua média aritmética. Para D_s este valor é $6,1 \cdot 10^{-4}$ cm².h⁻¹ e para k_s é 0,0162 cm.h⁻¹. Os valores de D_s estão em concordância com os valores obtidos por Chatzopoulos, Varma e Irvine (1993). Os valores de D_s obtidos por estes autores foram de aproximadamente $2 \cdot 10^{-4}$ cm².h⁻¹ para os experimentos com partículas de diâmetro de 1,643 mm e concentração inicial de tolueno de 62 mg.L⁻¹. Neste trabalhos, os autores observaram que, quando consideravam a difusividade independente da concentração na superfície, os valores de D_s aumentavam com o aumento da concentração inicial da solução. Como que a concentração inicial da solução utilizada no presente trabalho foi bastante superior à concentração utilizada por esses autores, o valor médio de $6,1 \cdot 10^{-4}$ cm².h⁻¹ se apresenta como um valor compatível, tendo mesma ordem de grandeza.

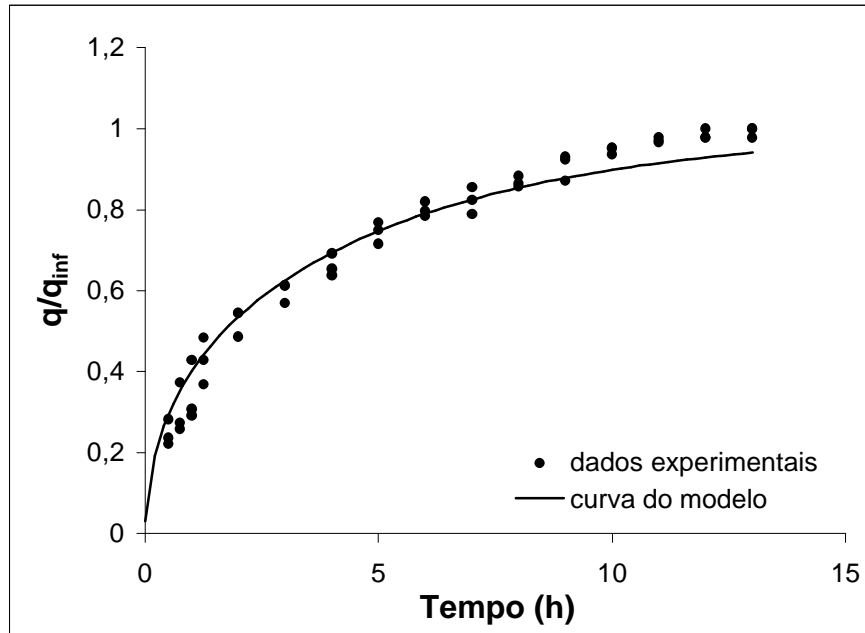


Figura 4.10: Dados experimentais dos testes cinéticos com 1 g de carvão e curva do modelo.

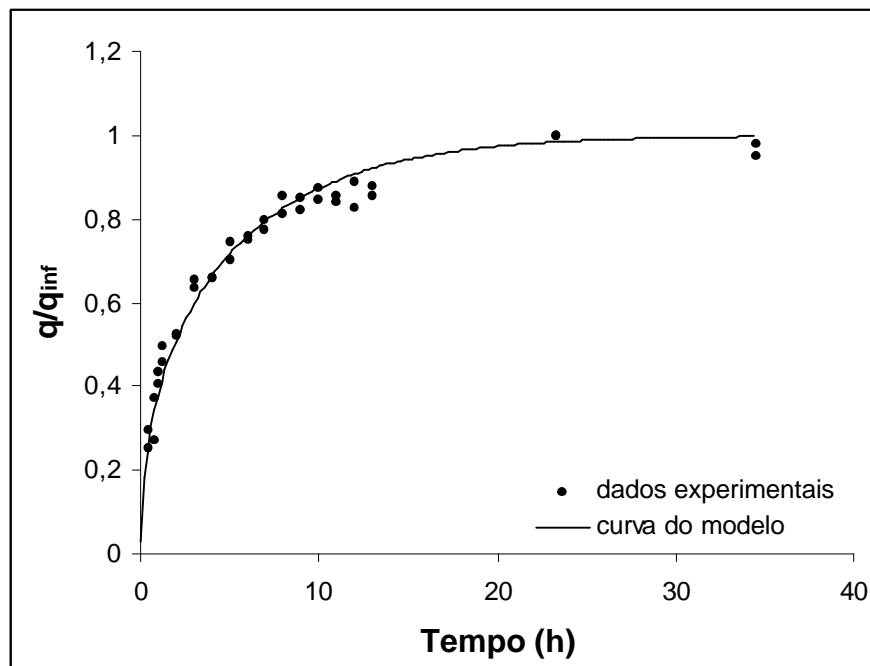


Figura 4.11: Dados experimentais dos testes cinéticos com 2 g de carvão e curva do modelo.

4.7 Curvas de ruptura

O estudo da adsorção em leito fixo foi realizado usando os dados armazenados na planilha do Access[®] gerada durante os experimentos, através da aplicação planta_0504 configurada no software Elipse[®]. Como já mencionado, os experimentos realizados são denominados de Corrida, e estes foram realizados utilizando duas vazões e duas alturas de leito.

Na **Tabela 4.9** são apresentados os dados referentes a cada experimento realizado na planta piloto de adsorção. Observou-se, durante os experimentos preliminares, que havia oscilações na concentração da solução de alimentação, devido à perda de tolueno por volatilização. Para minimizar essa perda, utilizou-se uma manta flutuante de polietileno no tanque de alimentação e foram realizadas diversas cargas, durante os experimentos, procurando evitar que houvesse ampla variação de nível do tanque, para que a porção vazia deste fosse a menor possível. No entanto, estas medidas não foram suficientes para que não houvesse oscilações na concentração da alimentação (c_0) nos experimentos, como pode ser observado na **Tabela 4.9**. Chatzopoulos, Varma e Irvine (1993) utilizaram várias camadas de bolinhas vazadas de polipropileno no tanque de alimentação em seu estudo da adsorção de tolueno para evitar a volatilização.

Tabela 4.9: Dados dos experimentos em leito fixo.

Experimento	Altura do Leito (cm)	Vazão (L.h ⁻¹)	Massa de carvão (g)	Concentração inicial c_0 (ppm)	Porosidade real	Tempo total (h)	Tempo final de ruptura (h)
Corrida 1	10	0,8	20,3888	49 ± 5,5	0,63	252	229,25
Corrida 2	10	0,8	20,0005	62 ± 7,5	0,62	267	197,47
Corrida 3	5	0,8	10,0007	60 ± 1,1	0,63	167	110,23
Corrida 4	5	0,8	10,0016	64 ± 3,2	0,63	259	107,67
Corrida 5	10	1,6	20,0008	55 ± 3,7	0,63	188	117,73
Corrida 6	10	1,6	20,0010	52 ± 4,4	0,63	166	117,63
Corrida 7	5	1,6	10,0017	55 ± 3,2	0,63	69	68,78
Corrida 8	5	1,6	10,1793	65 ± 2,0	0,62	77	77,37

Observa-se na **Tabela 4.9** que a porosidade do leito de carvão ficou em torno de 0,63, valor inferior à porosidade determinada através da massa específica *bulk*, igual a 0,70. Isso deve-se, provavelmente, ao fato de que a determinação da massa específica *bulk* está intimamente relacionada com a compactação das partículas de carvão. No condicionamento do leito de carvão na coluna, utilizou-se água destilada para eliminar possíveis bolhas de ar em seus interstícios, podendo ocasionar maior compactação deste. A leitura da altura do leito foi, então, realizada após este condicionamento, resultando em um valor diferente de porosidade, porém mais representativa da condição real do leito.

Durante a realização dos experimentos, verificou-se que o banho termostático original da planta não era capaz de manter constante a temperatura, pois ele era um banho só de aquecimento. Dessa forma, ele foi trocado por um outro banho termostático que possuía sistema de resfriamento. Procurou-se manter, então, a temperatura ao redor de 25 ± 2 °C, mas em alguns momentos dos experimentos a temperatura ficou fora da faixa de temperatura por diferentes motivos. Primeiramente, o tempo de resposta do banho para atingir o *set point* era relativamente grande e, também, algumas vezes, devido às oscilações de temperatura ambiente, durante os vários dias de experimento. Como a planta ficava longos períodos sem acompanhamento de operadores e havia oscilações de temperatura ambiente, principalmente durante a noite e nos finais de semana, também houve afastamento da temperatura desejada. Os dados completos das temperaturas da solução, na entrada e na saída da coluna nos experimentos na planta piloto, são apresentados no Apêndice B.

Na **Figura 4.12** são mostradas as curvas obtidas nos experimentos de adsorção em leito fixo realizados na PTA/TI. Nelas é possível verificar que, na sua porção inicial, a concentração de tolueno no efluente é próxima a zero e com o decorrer da operação esta vai se elevando, mas não chega a atingir um valor constante, como descrito nos livros didáticos, e sim oscilatório. Esta oscilação ocorreu em todos os experimentos e, dessa forma, tomou-se como tempo final de ruptura o tempo a partir do qual não ocorre mais elevação significativa da concentração de efluente e são estes os tempos que são apresentados na **Tabela 4.9**. Como exemplo, cita-se a Corrida 2, onde o tempo total do experimento foi de 267,4 e o tempo final de ruptura de 197,47 h. Este procedimento foi adotado, pois observou-se que a concentração de tolueno na saída não chegava a atingir o valor da alimentação. No caso da Corrida 2, a concentração na alimentação foi cerca de 62 ppm e a concentração na saída, no tempo final de ruptura, foi cerca de 40 ppm. Como comentado no item 2.6, Chatzopoulos e Varna (1995) também observaram que para alguns experimentos de adsorção de tolueno em leito fixo, a concentração no efluente foi inferior à de alimentação. A justificativa dada por eles para este fato foi a possível existência de porções do leito não facilmente acessíveis ao fluido, como pontos de contato entre partículas vizinhas ou vazios onde ocorre uma saturação muito lenta. Os dados completos de todas as corridas realizadas são apresentados no Apêndice B (**Tabela B.12-19**). Os gráficos e resultados apresentados a partir deste ponto consideram os valores de concentração de efluente truncados até o valor de tempo final de ruptura apresentado na **Tabela 4.9**.

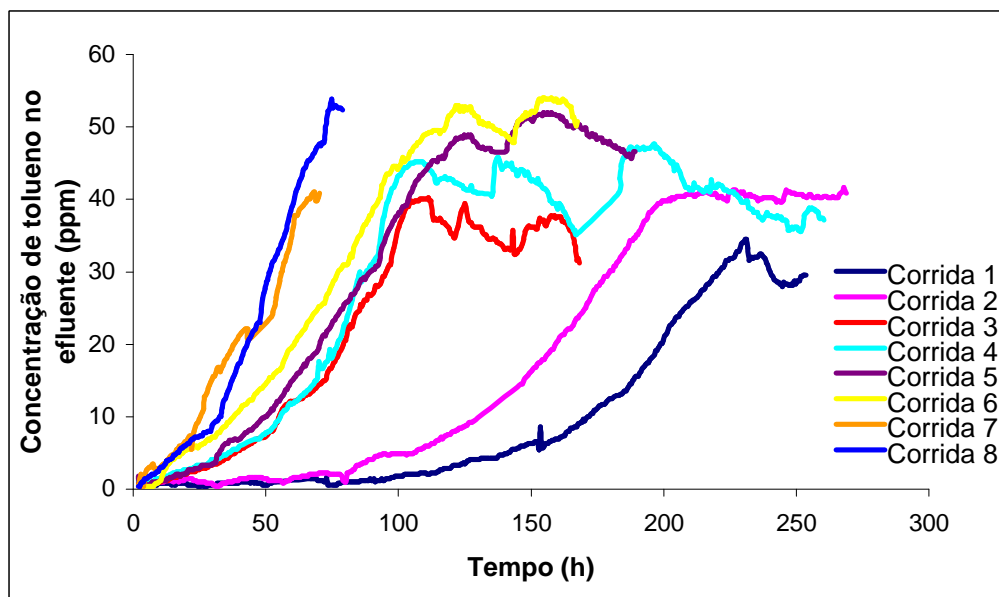


Figura 4.12: Curvas de concentração de tolueno no efluente nos experimentos em leito fixo.

Para a obtenção das curvas de ruptura experimentais, plotaram-se os valores da razão entre a concentração de tolueno no efluente ($c(t)$ e concentração na alimentação (c_0)) pelo tempo. A **Figura 4.13** e a **Figura 4.14** apresentam as curvas de ruptura experimentais em que se compara a influência da vazão em leitos de mesma altura. Observa-se que quanto maior a vazão, para uma mesma altura de leito, menor o tempo para atingir a saturação do leito, como esperado. A **Figura 4.15** e a **Figura 4.16** apresentam as curvas de ruptura experimentais onde se compara a influência da altura do leito em experimentos com mesma vazão. Verifica-se, nestes casos, que quanto maior a altura do leito, para uma mesma vazão, maior é o tempo para atingir a saturação do leito, conforme o esperado. No entanto, não se sabia, no princípio, qual seria esse tempo final de ruptura, que foi, então, determinado através dos experimentos. Esta análise está em concordância com o trabalho realizado por Chern e Chien (2001), no estudo da adsorção de ácido benzóico em leito fixo, onde foi verificado que $t_{1/2}$ (tempo para que a concentração adimensional c/c_0 seja igual a 0,5) é inversamente proporcional à vazão do leito, para uma mesma altura de leito, e diretamente proporcional ao comprimento do leito, para uma mesma vazão. Em seu trabalho posterior, Chern e Chien (2002) observaram o mesmo comportamento quanto aos tempos de ruptura, em experimentos de adsorção de p-nitrofenol em solução aquosa, verificando que eles eram proporcionais à altura do leito e inversamente proporcionais ao fluxo. Estas observações de proporcionalidade e proporcionalidade inversa, são válidas, pois nos casos estudados, os autores tinham a formação de frentes de padrão constante. No caso do

presente trabalho, não há a formação deste tipo de frente, mas o tipo de tendência é mantido.

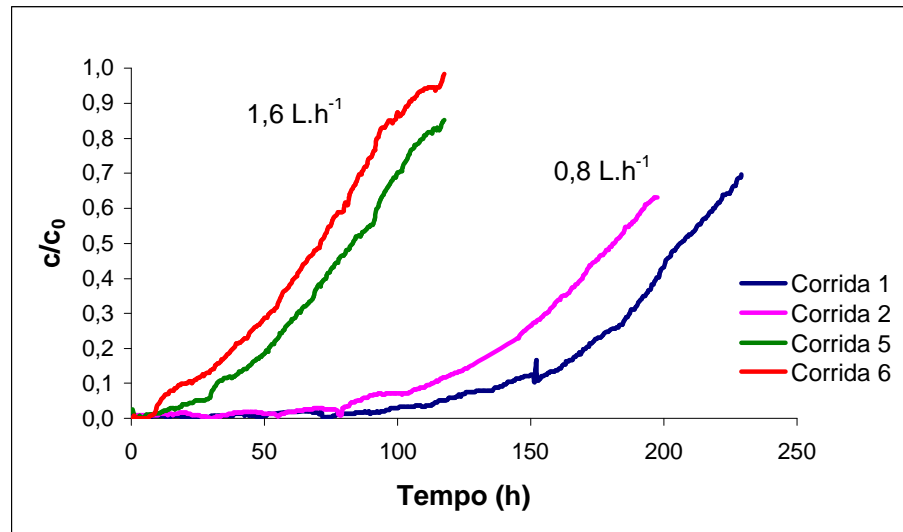


Figura 4.13: Curvas de ruptura experimentais dos experimentos com leito de 10 cm e diferentes vazões.

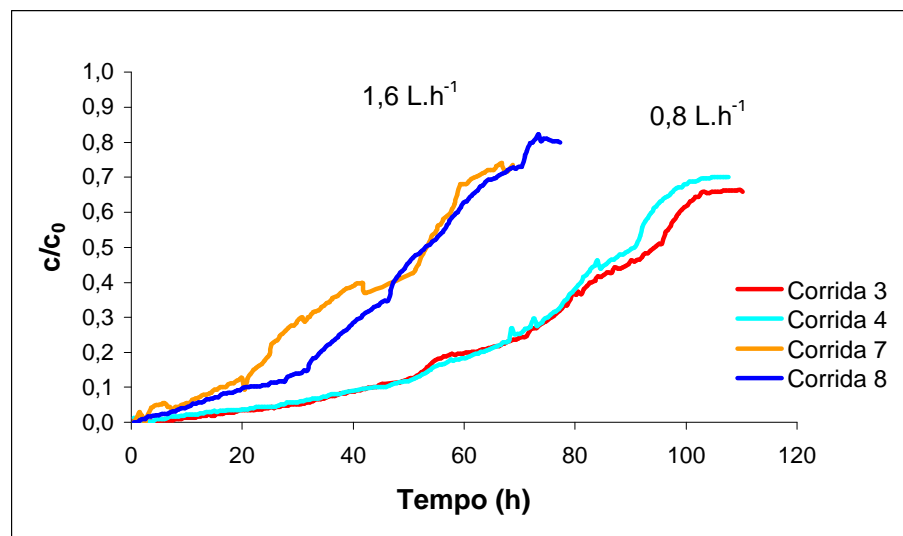


Figura 4.14: Curvas de ruptura experimentais dos experimentos com leito de 5 cm e diferentes vazões.

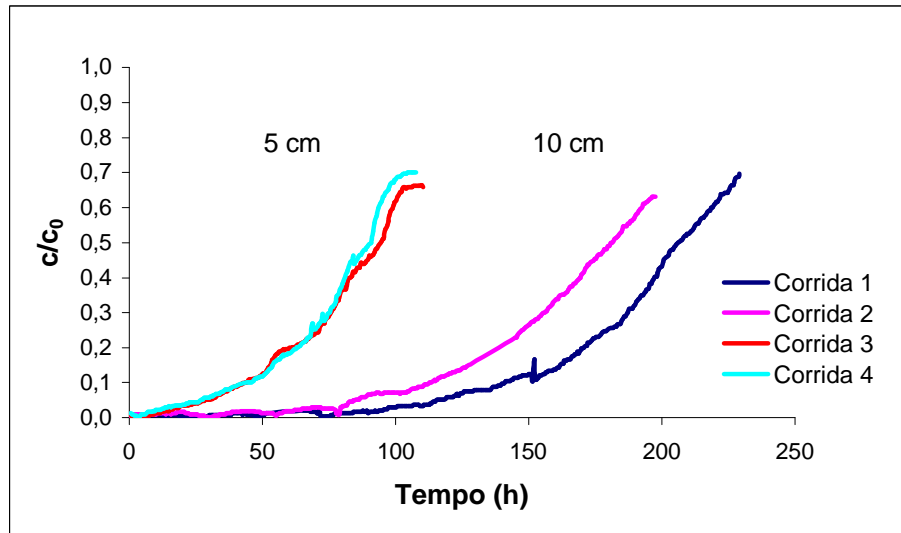


Figura 4.15: Curvas de ruptura experimentais dos experimentos realizados com vazão de 0,8 L.h⁻¹ e diferentes alturas de leito.

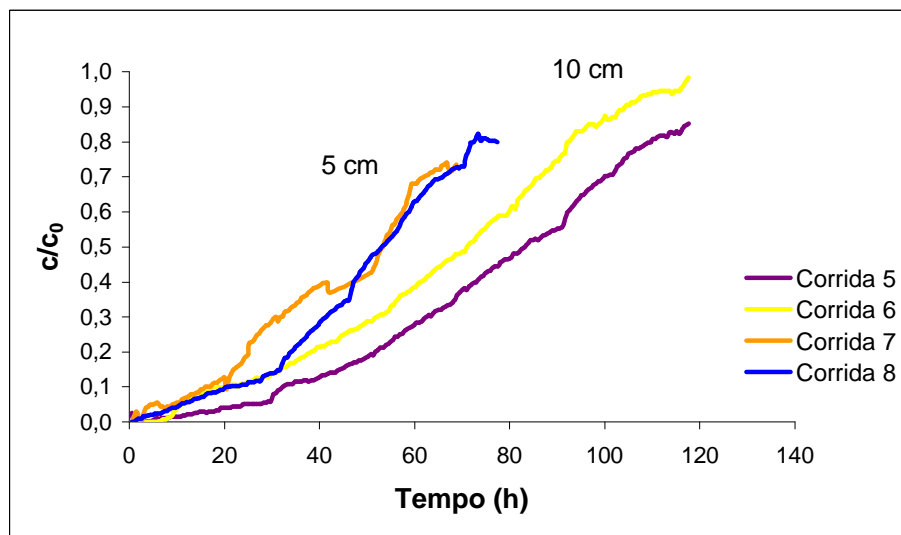


Figura 4.16: Curvas de ruptura experimentais dos experimentos realizados com vazão de 1,6 L.h⁻¹ e diferentes alturas de leito.

Quanto ao formato das curvas de ruptura experimentais, é possível observar que eles são bastante distintos. Caso se tente transladar as curvas obtidas em dois experimentos com a mesma vazão, com alturas distintas (**Figura 4.15**) não é possível obter sobreposição destas, demonstrando que elas não correspondem à forma de padrão constante, mas semelhante à de padrões proporcionais.

A modelagem matemática da operação de adsorção em leito fixo por meio de uma resolução analítica não foi possível uma vez que o formato da isoterma de equilíbrio obtida para o par adsorvente/adsorvato em estudo se mostrou côncavo. Como comentado no item 2.6, quando a curva da isoterma possui este formato, há a formação de padrões proporcionais, em que há o espalhamento das frentes com o tempo e com a distância que foi percorrida do leito. Dessa forma, este espalhamento que ocorre impede o ajuste adequado de uma única curva que descreva o perfil de concentração, já que não há dados de como ocorre essa mudança de perfil, ou seja, uma relação de $c/c_0(t, x)$, onde x é a distância percorrida no leito e t é o tempo. O que é possível de se obter é $c/c_0(t)$ em $x = L$, a concentração do soluto no efluente do leito, que são as curvas apresentadas na **Figura 4.13** e **4.14**. A obtenção de parâmetros de transporte como o k_f , a partir dos dados das curvas de ruptura, no caso de isoterma desfavorável, deve ser realizada através de uma resolução numérica, mas o desenvolvimento deste tipo de resolução não está no escopo desta pesquisa.

Entretanto, utilizou-se o programa de resolução numérica criado por Wada (2004), baseado na Equação 2.33, com as considerações de que não há dispersão axial e resistência à transferência de massa na fase fluido. A partir da segunda consideração, o valor de q_i na Equação 2.21 é a concentração do soluto na fase sólida em equilíbrio com a solução de concentração c , e pode ser aproximado pela expressão da isoterma de equilíbrio. No caso do presente trabalho, $q_i = 1,5776 c^{1,1344}$ é substituído na Equação 2.21 e esta, por sua vez, é substituída na equação do balanço (Equação 2.33). Como $c = f(t, z)$, realizou-se a discretização de c em z e com integração numérica dc/dt , obteve-se o valor de $c(z, t)$. No entanto, a resolução não forneceu resultados satisfatórios, apresentando formato bastante distinto dos dados experimentais.

Empregando uma abordagem empírica para o projeto de leitos de adsorção e usando os dados de curvas de ruptura, foi realizada a estimativa da altura da zona de transferência de massa de cada um dos experimentos, como é feito quando as curvas possuem o formato padrão constante. Entretanto, na verdade, por se tratar de padrões proporcionais, em que há o espalhamento das frentes à medida que estas percorrem o leito, considerou-se que o valor de altura da zona de transferência de massa estimado, neste trabalho, é a maior altura que a zona de transferência de massa atingiu em cada experimento. Além disso, também foi estimado o valor de k_f através de correlações.

Para correlacionar a variação de c/c_0 com o tempo, para cada experimento, ajustaram-se polinômios de quarta ordem. Os coeficientes dos polinômios e os coeficientes de correlação (R^2) dos modelos são apresentados na Tabela 4.10.

Tabela 4.10: Coeficientes de cada um dos graus do polinômio ajustados aos dados experimentais.

Experimento	Coeficiente do grau do polinômio					R ²
	4	3	2	1	0	
Corrida 1	2,53.10 ⁻¹⁰	2,37.10 ⁻⁸	-6,83.10 ⁻⁶	4,46.10 ⁻⁴	1,04.10 ⁻³	0,9963
Corrida 2	-1,91.10 ⁻¹⁰	1,88.10 ⁻⁷	-1,59.10 ⁻⁵	5,46.10 ⁻⁴	5,90.10 ⁻³	0,9989
Corrida 3	-7,93.10 ⁻⁹	1,94.10 ⁻⁶	-8,86.10 ⁻⁵	3,31.10 ⁻³	-9,99.10 ⁻³	0,9957
Corrida 4	-1,86.10 ⁻⁸	4,38.10 ⁻⁶	-2,50.10 ⁻⁴	6,58.10 ⁻³	-1,84.10 ⁻²	0,9950
Corrida 5	-5,95.10 ⁻⁹	1,03.10 ⁻⁶	1,10.10 ⁻⁵	1,45.10 ⁻³	-3,06.10 ⁻⁴	0,9988
Corrida 6	-1,90.10 ⁻⁸	3,88.10 ⁻⁶	-1,95.10 ⁻⁴	8,65.10 ⁻³	-2,72.10 ⁻²	0,9991
Corrida 7	7,81.10 ⁻⁸	-1,17.10 ⁻⁵	6,32.10 ⁻⁴	-2,69.10 ⁻³	2,82.10 ⁻²	0,9888
Corrida 8	-9,57.10 ⁻⁸	1,26.10 ⁻⁵	-3,65.10 ⁻⁴	7,58.10 ⁻³	-5,16.10 ⁻³	0,9984

As equações polinomiais ajustadas foram usadas para o cálculo do tempo que corresponde à capacidade real do leito (t_t) e do tempo correspondente à capacidade útil do leito (t_u), através das equações 2.36 e 2.37, respectivamente. Foi escolhida, como concentração adimensional de ruptura, o valor $c/c_0 = 0,02$ (ponto de ruptura). Este valor foi escolhido com base no limite que é indicado pela Agência para Substâncias Tóxicas e Registros de Doenças (*Agency for Toxic Substances and Disease Registry*), que é de 1 mg.L⁻¹, considerando que a concentração na alimentação é cerca de 50 ppm. Dessa forma, pela análise dos dados, utilizaram-se como limite superior da integral da Equação 2.37 os tempos correspondentes aos pontos em que c/c_0 era igual 0,02, aproximadamente. Com estes valores, então, foi possível calcular a altura da zona de transferência de massa (H_{UNB}) de cada um dos experimentos (**Tabela 4.11**). Observa-se que para a maioria dos casos as alturas da zona de transferência das duplicatas possuem valores bastante próximos.

Tabela 4.11: Resultados de tempo total, tempo útil, altura útil e altura da zona de transferência de massa dos experimentos de adsorção em leito fixo.

Experimento	Altura do Leito (cm)	Vazão (L.h ⁻¹)	t_t (h)	t_u (h)	H_b (cm)	H_{UNB} (cm)	Massa de tolueno retida (g)	$M_{\text{tolueno}}/M_{\text{carvão}}$ (mg/g)
Corrida 1	10	0,8	196,3	64,9	3,3	6,7	7,7	378
Corrida 2	10	0,8	166,4	61,2	3,7	6,3	8,3	415
Corrida 3	5	0,8	84,9	12,9	0,8	4,2	4,1	410
Corrida 4	5	0,8	82,4	9,9	0,6	4,4	4,2	420
Corrida 5	10	1,6	79,1	11,9	1,5	8,5	7,0	350
Corrida 6	10	1,6	66,9	8,9	1,3	8,7	5,6	280
Corrida 7	5	1,6	46,0	2,9	0,3	4,7	4,1	410
Corrida 8	5	1,6	51,6	4,0	0,4	4,6	5,4	530

Analisando as corridas que foram realizadas na vazão de 0,8 L.h⁻¹ e com alturas de leito diferentes, verifica-se que possuem alturas de zona de transferência de massa que aumentam com o aumento da altura do leito. Isso deve-se, possivelmente ao fato de que

nos experimentos com leito mais longo há o maior espalhamento das frentes de adsorção. Nesta situação, como ocorre este espalhamento, caso se desejar estimar a altura da zona de transferência de massa em um leito industrial, o leito em escala piloto deve ter a mesma altura do leito industrial e operar na mesmas condições de velocidade superficial. Já nas corridas com vazão de $1,6 \text{ L.h}^{-1}$ e com alturas de leito diferentes, as alturas da zona de transferência de massa se aproximam bastante da altura total do leito, evidenciando que, nestes casos alturas de leito maiores devam ser investigadas, pois pode não ter altura de leito suficiente para o desenvolvimento de uma zona de transferência de massa.

Acredita-se, também, que o leito de 5 cm de altura era muito curto para qualquer uma das vazões, pois as alturas da zona de transferência de massa correspondentes são muito próximas à altura total do leito. No entanto, quando se analisa os experimentos com leito de 10 cm, com vazões diferentes, observa-se que as alturas da zona de transferência de massa são distintas. Para este caso, pode-se analisar o efeito do espalhamento em função do tempo de residência do fluido no leito. Quanto menor a vazão, maior é o tempo de residência e maior é o tempo disponível para ocorrer o espalhamento. Para este caso, espera-se que quanto maior a vazão, maior o valor do coeficiente de transferência de massa da fase líquida (k_f) e, portanto, menor a resistência à transferência de massa nesta fase. Dessa forma, mais facilmente as condições na interface sólido-líquido se aproximam das condições de equilíbrio, ou seja, o espalhamento é mais influenciado pelo equilíbrio. No caso do presente trabalho, tem-se isoterma desfavorável e, por isso, espera-se que ocorra o maior espalhamento da frente, como pode ser observado na **Tabela 4.11**.

Sabendo-se que $t = V/Q$ e, por sua vez, $dt = dV/Q$, realizou-se esta substituição na Equação 2.36, chegando-se à expressão

$$t = (1/Qc_0) \int_0^V (c_0 - c) dV \quad (4.4)$$

Nesta expressão, o resultado da integral é a massa de tolueno retida em cada um dos experimentos, que é apresentada na **Tabela 4.11**.

Para a estimação do coeficiente de transferência de massa da fase fluida por correlações empíricas, determinou-se o valor do coeficiente de difusão do tolueno na água a $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Este foi estimado a partir da correlação de Wilke e Chang, dada pela Equação 4.5. Esta correlação é indicada para soluções diluídas de não eletrólitos.

$$\frac{D_{AB} \mu_B}{T} = \frac{7,4 \times 10^{-8} (\Phi_B M_B)^{1/2}}{V_A^{0,6}} \quad (4.5)$$

onde D_{AB} é expresso em $\text{cm}^2.\text{s}^{-1}$, μ_B é a viscosidade da solução (centipoise), T é a temperatura absoluta (K), M_B é o massa molar do solvente, V_A é o volume molal de soluto no

ponto de ebulição normal ($\text{cm}^3 \cdot \text{gmol}^{-1}$), Φ_B é o parâmetro de associação do solvente B, neste caso, o valor é obtido de tabela de Welty, Wicks e Wilson (1984). Na **Tabela 4.12** são apresentados os valores dos parâmetros necessários para a estimação de D_{AB} através da Equação 4.5, além de seu valor estimado (Welty, Wicks e Wilson, 1984).

Tabela 4.12: Valores dos parâmetros utilizados para a estimação de D_{AB} .

Parâmetro	Valor
T(K)	298
Φ_B	2,26
M_B	18
$V_A(\text{cm}^3 \cdot \text{gmol}^{-1})$	133,2
$\mu_B(298\text{K})(\text{centipoise})$	0,95
$D_{AB}(\text{m}^2/\text{s})$	$7,87 \cdot 10^{-10}$

Para a estimação dos valores dos coeficientes de transferência de massa na fase líquida (Tabela 4.14) pelas correlações apresentadas na Tabela 2.1, utilizaram-se os valores das propriedades da água (solvente) apresentadas na Tabela 4.13.

Tabela 4.13: Propriedades físicas da água a 25 °C.

Propriedade	Valor
$\rho (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	997,41
$C_p (\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	4,1798

Tabela 4.14: Valores de $k_f (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ estimados por correlações empíricas.

Correlação	Vazão experimental	
	0,8 L.h ⁻¹	1,6 L.h ⁻¹
Wilson e Geankoplis	$5,40 \cdot 10^{-6}$	$6,81 \cdot 10^{-6}$
Yoshida	$4,54 \cdot 10^{-6}$	$6,38 \cdot 10^{-6}$
Wakao e Funazkri	$6,90 \cdot 10^{-6}$	$1,00 \cdot 10^{-5}$
Gnielinski	$6,60 \cdot 10^{-6}$	$8,80 \cdot 10^{-6}$
Chatzopoulos e Varna	$1,88 \cdot 10^{-5}$	$2,45 \cdot 10^{-6}$

Todas as correlações forneceram valores de coeficientes de transferência de massa na fase fluido na mesma ordem de grandeza. Dessa forma, para a análise das resistências à transferência de massa nas fases fluido e sólida, foram utilizados para exemplificar esta análise os valores de k_f obtidos a partir da correlação de Wilson e Geankoplis (1996) e os valores de k_s obtidos nos testes cinéticos com 1 g de carvão. Foram calculadas as resistências à transferência de massa nas duas fases e estes valores são apresentados na **Tabela 4.15**. Quando comparadas as duas resistências à transferência de massa em ambas

fases, verifica-se que a resistência na fase fluida é bastante inferior à resistência na fase sólida, portanto, a consideração da resistência da fase fluida desprezível não deve causar erro significativo.

Tabela 4.15: Valores de resistência à transferência de massa nas fases fluido e sólida.

Vazão (L.h ⁻¹)	Resistência à transferência de massa na fase fluido (s.m ⁻¹)	Resistência à transferência de massa na fase sólida (s.m ⁻¹)
0,8	1,85.10 ⁵	2,09.10 ⁷
1,6	1,47.10 ⁵	2,09.10 ⁷

Para a complementação da análise do estudo da adsorção em leito fixo, analisaram-se, também, os dados referentes à perda de carga no leito e à variação de temperatura nos experimentos.

Houve, durante a realização dos experimentos na planta piloto, uma falha na aquisição dos valores de pressão diferencial e estes não foram obtidos para um grupo de corridas. Isso aconteceu porque, para o funcionamento do Elipse, é utilizada uma chave. Sem esta chave, quando aberta uma aplicação, se ela tiver muitos tags, o Elipse eliminará os tags excedentes. Acredita-se que em algum momento, houve a abertura da aplicação planta_0504 sem esta chave, ocasionando a eliminação do tag correspondente à pressão diferencial. Quando solucionado este problema, metade dos experimentos já tinha sido realizada.

Para aqueles experimentos em que foram obtidos os dados de pressão diferencial, observou-se que houve aumento da pressão diferencial com o decorrer do experimento. Foram levantadas hipóteses para a ocorrência desse aumento. Primeiramente, pelo fato do fluxo através do leito ser descendente, poderia estar ocorrendo a compactação do leito. Em segundo lugar, poderia estar ocorrendo um bloqueio dos poros da placa de vidro sinterizado, que existe nas duas extremidades do leito, com o decorrer dos experimentos. A terceira hipótese seria o inchamento do carvão com a saturação do leito.

Com base nestas hipóteses, foi realizado um experimento com leito de carvão de 10 cm de altura através do qual foi passada água destilada durante um período de tempo bastante longo com vazão de 1 L.h⁻¹. O objetivo era verificar se haveria o aumento de pressão diferencial, que neste caso, poderia ser atribuído à compactação do leito e ao bloqueio dos poros da placa de vidro. No entanto, quando compararam-se as corridas com solução aquosa de tolueno e o experimento com água (**Figura 4.17** e **Figura 4.18**), verificou-se que o aumento na pressão diferencial das corridas é bastante superior ao do experimento com água. Começa a ocorrer um pequeno aumento, para o experimento com

água, após um tempo bastante longo, cerca de 200 h, que é superior aos tempos experimentais da maioria das corridas. Isso sugere que, possivelmente, o aumento da pressão diferencial nas corridas com solução aquosa deve-se à modificação da estrutura física do carvão com a saturação com o soluto. Para tentar evidenciar este fato, e comparar este aumento na pressão diferencial com a variação da concentração no leito, plotou-se em um mesmo gráfico os valores obtidos para a Corrida 3. Fica claro, observando a **Figura 4.19**, que há uma relação entre a quantidade de soluto retido no leito de carvão com a pressão diferencial. Observa-se também que quando o leito atinge a saturação também não há mais aumento na pressão diferencial.

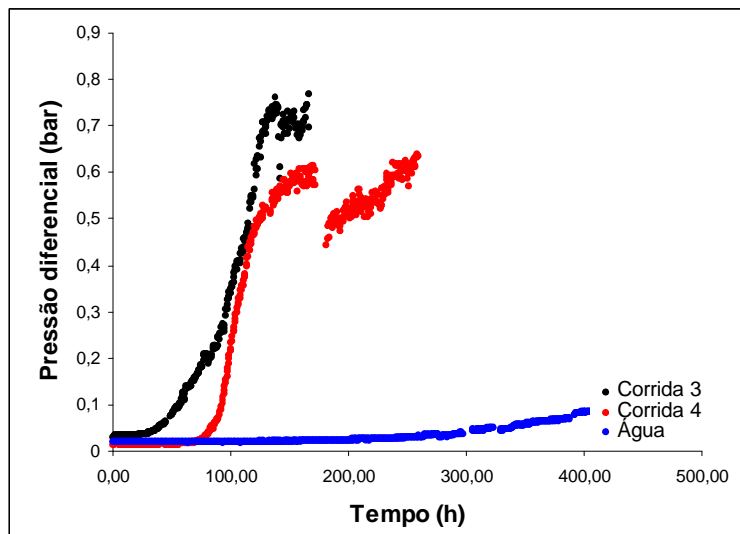


Figura 4.17: Pressão diferencial no leito nos experimentos com leito de 10 cm e vazão de $1,6 \text{ L.h}^{-1}$ em função do tempo.

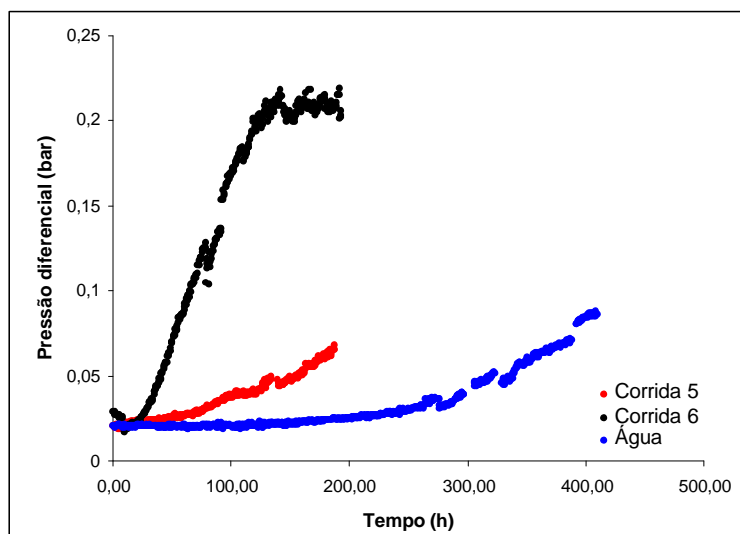


Figura 4.18: Pressão diferencial no leito nos experimentos com leito de 5 cm e vazão de $0,8 \text{ L.h}^{-1}$ em função do tempo.

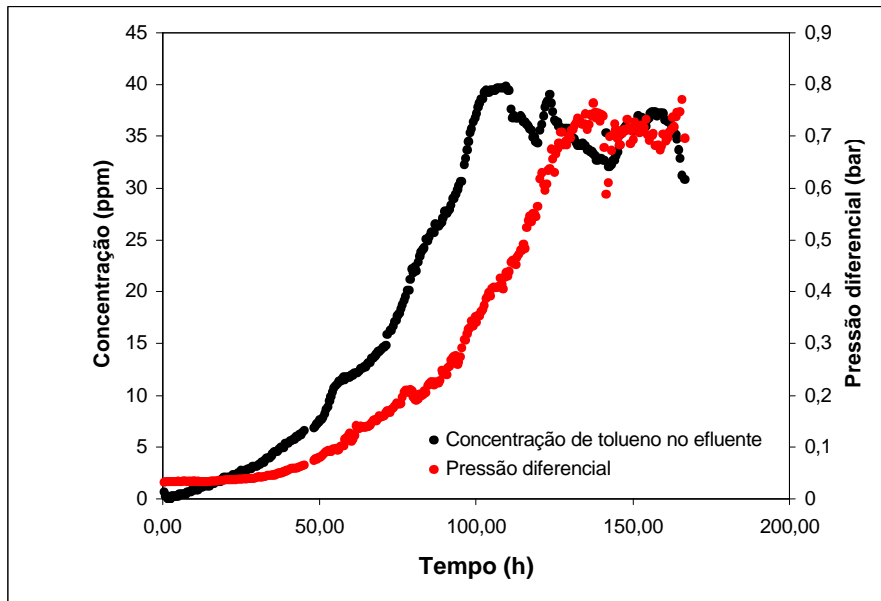


Figura 4.19: Comparação entre a variação da pressão diferencial e da concentração de tolueno no efluente com o tempo.

Finalmente, para verificar se as oscilações na concentração de tolueno no efluente, na porção final dos experimentos, poderiam ser devidas às oscilações na temperatura, anteriormente citadas, plotou-se, em um mesmo gráfico, a medição resultante destas duas grandezas (**Figura 4.20**). Caso houvesse, repetidamente, aumento na concentração de tolueno no efluente associado ao aumento de temperatura, poderia ser levantada a hipótese de que estas oscilações estariam ligadas a efeitos de dessorção. Pela observação da **Figura 4.20**, parece não haver esta relação sistêmica entre a temperatura e a concentração de tolueno. Outra hipótese, para estes tempos longos, seria que as oscilações na concentração de efluente estariam, possivelmente, ligadas às cargas realizadas no tanque de alimentação. Esta hipótese foi levantada pois, como comentado anteriormente, havia considerável variação em c_0 e esta era devida à volatilização de tolueno das soluções armazenadas nos tanques. Sempre quando ocorriam cargas no tanque de alimentação, verificava-se, em instantes depois, o aumento na concentração de tolueno na corrente de efluente.

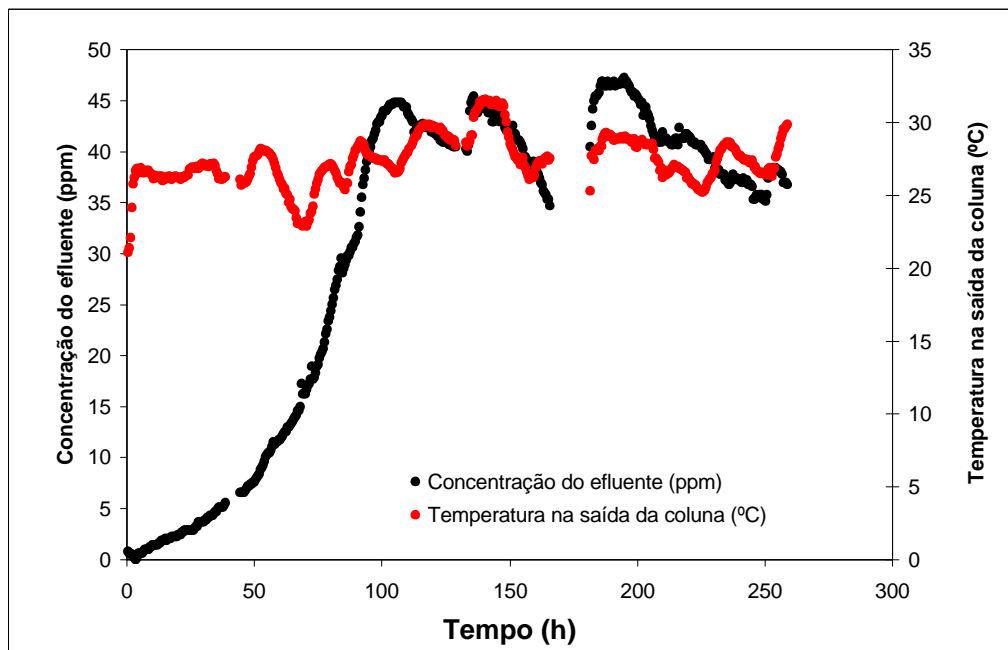


Figura 4.20: Concentração de tolueno e temperatura do efluente da Corrida 4.

Capítulo 5

Conclusões e Sugestões

Neste capítulo serão apresentadas as conclusões do presente trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

5.1 Conclusões

A metodologia de trabalho, envolvendo a obtenção de isothermas de equilíbrio, realização de testes cinéticos e caracterização de carvão, desenvolvida para o estudo de adsorção de tolueno em solução aquosa em leito fixo de carvão ativado na Planta de Testes de Adsorção e Troca Iônica se mostrou adequada e pode ser estendida para outros pares adsorvente/adsorvato.

A aplicação criada por meio do software Elipse[®] é adequada para o monitoramento da adsorção na PTA/TI, permitindo o acompanhamento on-line da operação. Ela foi fundamental para que não houvesse longos períodos experimentais sem o acompanhamento da operação.

O carvão ativado granular utilizado se mostrou um carvão com área superficial baixa ($681 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$), característica de grande influência na adsorção de compostos orgânicos voláteis.

A lavagem do carvão ativado granular com água destilada e deionizada se mostrou como a melhor metodologia a ser empregada como pré-tratamento no presente estudo, não alterando significativamente as características originais do carvão.

A centrifugação das amostras de solução aquosa de tolueno não é uma técnica adequada para a remoção de finos em suspensão, pois podem ocorrer perdas de tolueno por volatilização. Devem-se realizar sempre testes preliminares para verificar a possível influência na volatilização dos compostos em estudo e usar com cautela esta metodologia quando se estiver trabalhando com compostos orgânicos voláteis. A utilização de membrana filtrante se mostrou a técnica mais adequada para a remoção de finos. Com esta última também devem-se realizar estudos preliminares para a verificação de possíveis influências da membrana sobre a concentração das soluções.

A análise espectrofotométrica de tolueno em solução aquosa no comprimento de onda de 254 nm e caminho óptico de 100 mm é uma metodologia adequada para as análises destas soluções na faixa de estudo trabalhada.

O cuidado nas coletas de amostras de solução de tolueno é fundamental, por se tratar de um composto bastante volátil. Verificou-se que a exposição prolongada da solução aquosa de tolueno, em vaso aberto, pode causar erros experimentais e por em risco todo o trabalho de pesquisa.

A equação de isoterma de equilíbrio que melhor correlacionou os dados experimentais da adsorção de solução aquosa de tolueno no carvão ativado granular em estudo foi a equação de Freundlich, com o formato de isoterma desfavorável, representada por $q_i = 1,5776 c^{1,1344}$.

O modelo para a estimação da difusividade mássica efetiva do tolueno no carvão utilizado se ajustou adequadamente aos dados experimentais e os valores obtidos são da mesma ordem de grandeza que outros citados na literatura. Além disso, verificou-se que para a faixa de estudo não houve variação de D_s com relação à massa e , dessa forma, o valor de estimado médio de D_s foi $6,1 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2 \cdot \text{h}^{-1}$ e para k_s é $0,0162 \text{ cm} \cdot \text{h}^{-1}$.

No estudo da operação em leito fixo, a concentração do efluente não chega a alcançar o valor da concentração da alimentação, não atingindo um valor constante, mas oscilatório em torno de um valor médio. Além disso, a concentração de tolueno na corrente efluente não chega a atingir o mesmo valor da concentração na alimentação.

Dados preliminares da variação de pressão diferencial no leito indicam que ela aumentou enquanto havia adsorção no leito.

Verificou-se que quanto maior a vazão, para uma mesma altura de leito, menor o tempo para atingir a saturação do leito e que quanto maior a altura do leito, para uma mesma vazão, maior é o tempo para atingir a saturação, como era esperado.

A análise das alturas de zona de transferência de massa, da comparação entre os dados experimentais com a simulação realizada pelo modelo numérico e a comparação entre k_f e k_s , indicam que a resistência à transferência de massa na fase líquida pode ser desprezível e que, possivelmente, a dispersão axial no leito não pode ser desprezada.

5.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

Seguem algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Realização de estudos de outros pares de adsorvente/adsorvato que apresentem formato de isoterma favorável, permitindo, assim, a modelagem do processo de adsorção em leito fixo por meio de resolução analítica.

- Implementação de resolução numérica da operação de adsorção em leito fixo para o caso de isoterma desfavorável, que considere a dispersão axial.
- Realização de experimentos com leitos mais longos.
- Realização de estudos para comparar o efeito da saturação do leito na variação da pressão diferencial no decorrer do processo de adsorção.
- Realização de estudos de adsorção em outras temperaturas.
- Realização de experimentos de dessorção.
- Realização de estudos de adsorção de multicomponentes.

Referências

ATSDR. **Agency for Toxic Substances and Disease Registry**. Disponível em: <<http://www.atsdr.cdc.gov/tfacts56.html>>. Acesso em 14 de fevereiro, 2004.

BANSODE, R.R., et al. Adsorption of volatile organic compounds by pecan shell- and almond shell-based granular activated carbon. **Bioresource Technology**, Essex, Inglaterra, GB, v.90, n.2, p.175-184, 2003.

BENKHEDDA, et al. Experimental and modeled results describing the adsorption of toluene onto activated carbon. **Journal of Chemical and Engineering Data**, Washington, US, v.45, n.4, p.650-653, 2000.

CHATZOPOULOS, D., VARMA, A. Aqueous-phase adsorption and desorption of toluene in activated carbon fixed beds: experiments and model. **Chemical Engineering Science**, New York, US, v.50, n.1, p.127-141, 1995.

CHATZOPOULOS, D., VARMA, A., IRVINE; R.L. Activated carbon adsorption and desorption of toluene in the aqueous phase. **AIChE Journal**, New York, US, v.39, n.12, p.2027-2041, 1993.

CHERN, J.M., CHIEN, Y.W. Adsorption isotherm of benzoic acid onto activated carbon and breakthrough curves in fixed-bed columns. **Industrial & Engineering Chemistry Research**. Washington, US, v.40, n.17, p.3775-3780, 2001.

CHERN, J.M., CHIEN, Y.W. Adsorption of nitrophenol onto activated carbon: isotherms and breakthrough curves. **Water Research**, New York, US, v.36, n.3, p.647-655, 2002.

CHERN, J.M., WU, C.Y. Desorption of dye from activated carbon beds: effects of temperature, pH, and alcohol. **Water Research**, New York, US, v.35, n.17, p.4159-4165, 2001.

COONEY, D.O. ADESANYA, B.A., HINES, A.L. Effect of particle size distribution on adsorption kinetics in stirred batch systems. **Chemical Engineering Science**, New York, US, v.38, n.9, p.1535-1541, 1983.

COONEY, D.O. **Adsorption Design for Wastewater Treatment**. Lewis, Boca Raton, US, 1999.

DABROWSKI, A. Adsorption – from theory to practice. **Advances in Colloid and Interface Science**, Amsterdam, NL, v.93, n.1-3, p.135-224, 2001.

EVERETT, H. **IUPAC Manual of Symbols and Terminology for Physicochemical Quantities and Units, Appendix II, Part I**, Dezembro, 2001 Disponível em:

<http://www.iupac.org/reports/2001/colloid_2001/manual_of_s_and_t.pdf>. Acesso em 26 de janeiro, 2004.

GEANKOPLIS, C. J. **Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias**. Compañía Editorial Continental, ed. 2, 830 p., México, 1995.

GLUECKAUF, E. Theory of chromatography. Part 10 – Formule for diffusion into spheres and their application to chromatography. **Transactions of the Faraday Society**, London, GB, v.51, p.1540-1551, 1955.

HINDARSO, et al. Adsorption of benzene and toluene from aqueous solution onto granular activated carbon. **Journal of Chemical and Engineering Data**, Washington, US, v.46, n.4, p.788-791, 2001.

KNOWLES, A., BURGESS, C. **Practical Absorption Spectrometry**. Chapman and Hall, 234 p., London, Inglaterra, 1984.

LEVAN, M.D., CARTA, G., YON, C.M. **Adsorption and Ion Exchange**. In: Perry's Chemical Engineers' Handbook. McGraw-Hill, US, 7^a ed., Perry, R.H.; Green, D.W.; Maloney, J.O., 1997.

LI, L.,QUINLIVAN, P.A., KNAPPE, D.R.U. Effects of activated carbon surface chemistry and pore structure on the adsorption of organic contaminants from aqueous solution. **Carbon**, Elmsford, US, v.40, n.12, p.2085-2100, 2002.

NIST. Chemistry WebBook. Disponível em: <<http://webbook.nist.gov/chemistry>>. Acesso em: 12 de janeiro de 2004.

PIRES, et al. Adsorption of acetone, methyl ethyl ketone, 1,1,1-trichloroethane, and trichloroethylene in granular activated carbons. **Journal of Chemical and Engineering Data**, Washington, US, v.48, n.2, p.416-420, 2003.

RADKE, C.J., PRAUSNITZ, J.M. Adsorption of organic solutes from dilute aqueous solution on activated carbon. **Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals**, Washington, US, v.11, n.4, p.445-451, 1972.

ROBERTS, P.V., CORNALL, P., SUMMERS, R.S. External mass-transfer rate in fixed-bed adsorption. **Journal of the Environmental Engineering Division**, ASCE, New York, US, v.111, n.6 , p. 891–905, 1985.

RUTHVEN, D.M. **Principles of Adsorption and Adsorption Processes**. John Wiley & Sons, New York, US, 1984.

SEADER, J. D.; HENLEY, E. J. **Separation Process Principles**. John Wiley & Sons, Inc. New York, US, 886 p., 1998.

SILVERSTEIN, R.M.. **Identificação espectrométrica de compostos orgânicos**. LTC, Rio de Janeiro, Brasil, 6ª ed., 2000.

WADA, K. [Programa de resolução numérica], 2004.

WARD, T.M., GETZEN, F.W. Influence of pH on the adsorption of aromatic acids on activated carbon. **Environmental Science & Technology**, Easton, US , v.4, n.1, p.64-67, 1970.

WELTY, J. R., WICKS, C. E., WILSON, R. E. **Fundamentals of Momentum, Heat, and Mass Transfer**. John Wiley & Sons, Singapore, 3ª ed., 1984.

WOLBORSKA, A., PUSTELNIK, P.A simplified method for determination of the breakthrough time of an adsorbent layer. **Water Research**, New York, US, v.30, n.11, p.2643-2650, 1996.

YUN, J.H., CHOI, D.K. Adsorption isotherms of benzene and methybenzene vapors on activated carbon. **Journal of Chemical and Engineering Data**, Washington, US, v.42, n.5, p.894-896, 1997.

Apêndice A - Elaboração da Interface Gráfica

Neste Apêndice é apresentada a metodologia que foi utilizada para a elaboração da interface gráfica (aplicação) utilizada para o processo de adsorção na PTA/TI, utilizando o software Elipse Windows. Este software é totalmente configurável pelo usuário e as variáveis do processo podem ser visualizadas em tempo real, permitindo fácil e rápida compreensão do que está acontecendo.

O Elipse Windows apresenta uma janela chamada *Organizer*, que oferece uma visão rápida e organizada de toda a aplicação e ajuda na configuração de todos os objetos envolvidos no sistema através de uma árvore hierárquica de opções e, a partir dessa pode-se criar toda a aplicação. A estrutura do *Organizer* (**Figura A.1**) pode ser comparada à árvore de diretórios do Gerenciador de Arquivos do Windows. Desta forma, a estrutura da aplicação começa no canto superior esquerdo com a raiz da aplicação e todos os objetos da aplicação descem a partir desta, agrupando-se de acordo com o seu tipo. Quando seleciona-se um destes ramos da árvore de aplicação, ele se expande mostrando o seu conteúdo o que permite o fácil acesso e configuração de qualquer parte da aplicação.

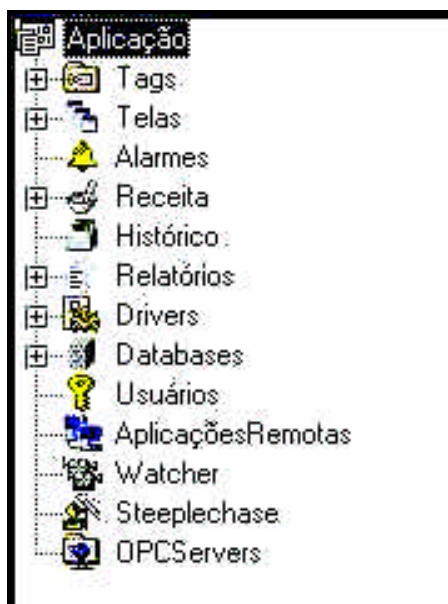


Figura A.1: Estrutura básica do Organizer com os seus ramos.

Antes de iniciar a elaboração da aplicação no Elipse Windows foram necessárias, primeiramente, a identificação e ligação dos canais dos três tipos de módulos Nudam[®] existentes (Tabela 3.6) aos equipamentos que compõem a PTA/TI, sendo que a cada canal do módulo pode ser conectado um equipamento ou sensor. Módulos Nudam[®] são dispositivos de aquisição de dados que permitem total controle do sistema, sendo necessária uma porta serial RS-232 junto ao PC. Eles permitem uma direta comunicação

com uma grande variedade de sensores, podem converter, linearizar e escalonar diferentes formas de sinais.

A.1 Criação dos Tags

Realizada essa etapa, no software Elipse, através da janela do *Organizer* criaram-se *tags* (variáveis numéricas ou alfanuméricas envolvidas na aplicação) às quais foram ligados todos os equipamentos e sensores de interesse para o processo. Utilizaram-se na apresentação criada dois tipos de *tags*, o PLC e o expressão. O *tag* PLC é usado para trocar informações com os equipamentos de aquisição de dados, usando drivers de I/O. O *tag* expressão permite que seja atribuída uma expressão numérica ou alfanumérica a um *tag*, podendo ser criadas equações que envolvam outros *tags* e *strings*. O segundo tipo de *tag* foi utilizado para aqueles equipamentos que enviavam sinais de tensão para o software, ao invés do valor da medida em sua unidade correta. Nestes casos, elaboraram-se curvas de correlação entre a tensão lida em um *display* na tela da aplicação criada com a leitura no *display* dos equipamentos.

A.1.1 Curva de correlação de pressão diferencial com a tensão

Diferentes vazões de água foram passadas no leito da planta para produzir perdas de carga que varressem o espectro de leituras do equipamento instalado na PTA/TI. Realizou-se a leitura simultânea dos valores de pressão indicado no medidor de pressão diferencial e do sinal de tensão indicado na aplicação do Elipse Windows. Os dados foram armazenados em planilha do Microsoft Excel[®], plotados e realizou-se a regressão linear por mínimos quadrados gerando a reta que é apresentada na **Figura A.2**. A equação da reta foi então utilizada para a elaboração de um *tag* expressão na aplicação que foi implementada (**Figura A.3**). Este *tag* expressão envolveu também o *tag* PLC *pressao3*, pois este é que recebe os sinais de tensão enviados pelo equipamento.

A.1.2 Curva de correlação da absorbância da solução líquida com a tensão

Diferentes soluções foram circuladas na planta para produzir absorbâncias que varressem o espectro de leituras do detector UV *on-line* instalado na PTA/TI. Realizou-se a leitura simultânea dos valores de absorbância apresentados no display do espectrofotômetro e de tensão lida na aplicação do Elipse Windows. Os dados foram armazenados em planilha do Microsoft Excel[®], plotados e realizou-se a regressão linear por mínimos quadrados gerando a reta que é apresentada na **Figura A.4**. A equação foi então utilizada para a elaboração de um *tag* expressão na aplicação que foi implementada (**Figura A.5**). Este *tag* expressão envolveu também o *tag* PLC *pressao3*, pois este é que recebe os valores de tensão enviados pelo equipamento.

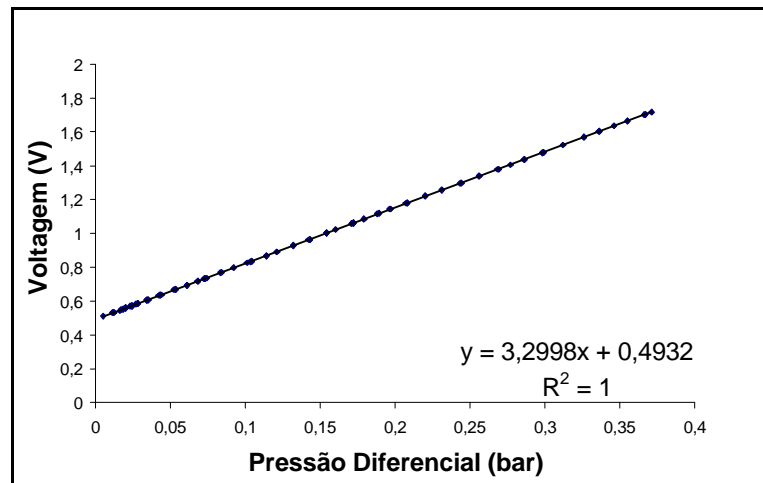


Figura A.2: Retas que correlaciona a pressão diferencial no leito com o sinal de tensão.

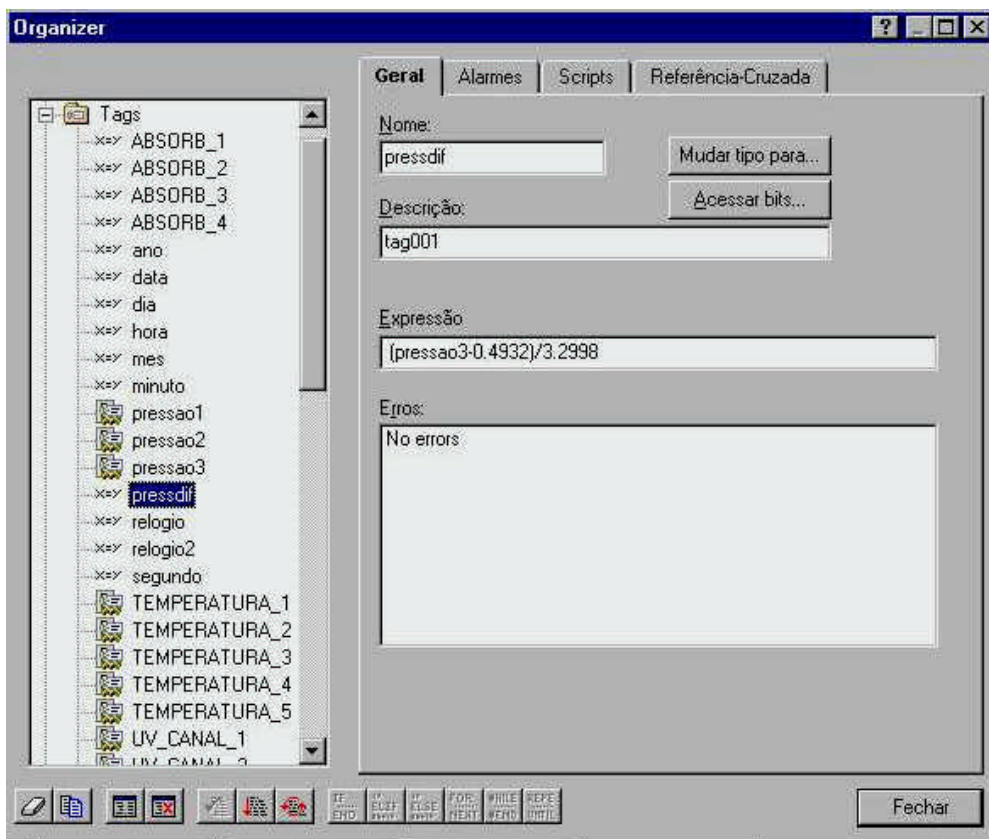


Figura A.3: Janela do *Organizer* tendo em detalhe a guia da configuração geral do tag expressão criado com o auxílio da equação da reta e do tag PLC *pressao3*.

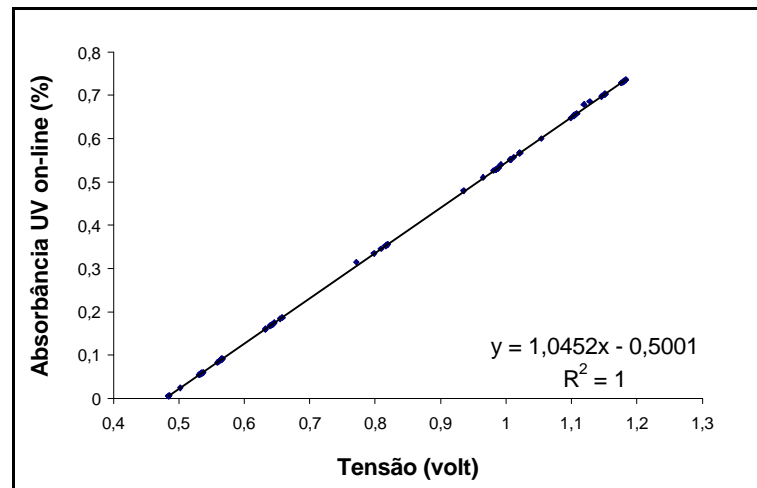


Figura A.4: Reta que correlaciona a absorbância com a tensão.

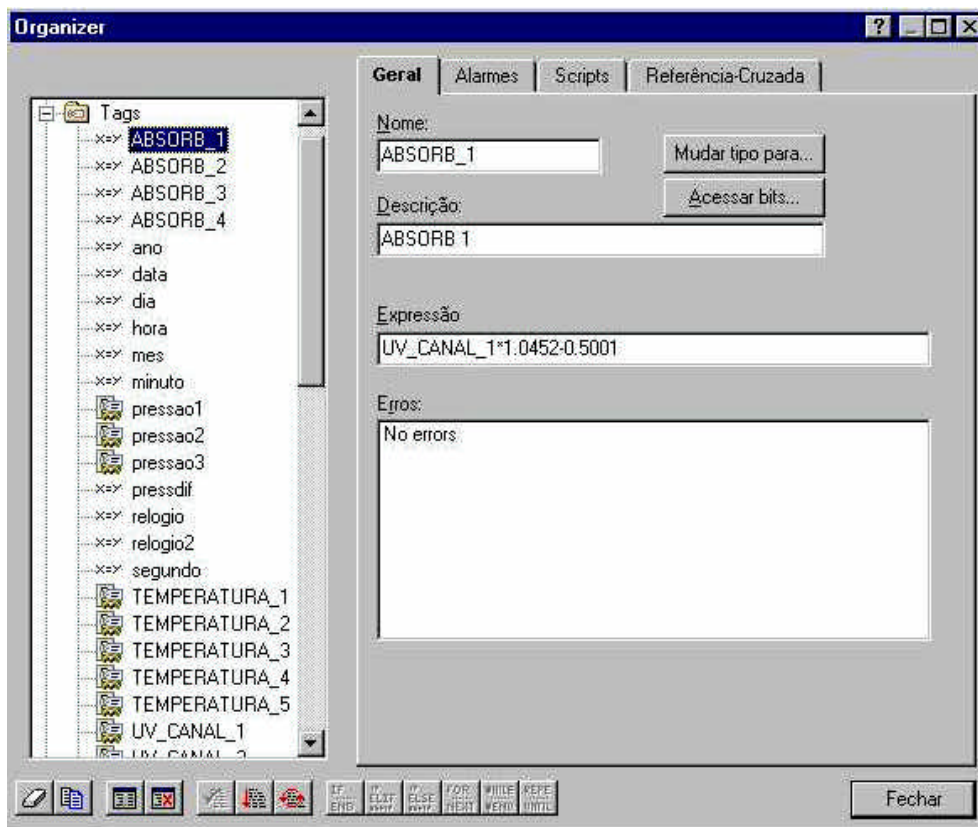


Figura A.5: Janela do *Organizer* tendo em detalhe a guia da configuração geral do tag expressão criado com o auxílio da equação da reta e do tag PLC UV_CANAL_1.

A.2 Criação de objetos de tela

A tela no Elipse pode ser definida como uma janela para o monitoramento de um processo e cada aplicação pode ter diversas telas. Os objetos de tela são elementos gráficos usados para mostrar os valores do tag de uma forma mais aparente. Na aplicação criada, utilizou-se uma única tela para uma fácil e rápida visualização de tudo que estava

acontecendo durante os experimentos e os objetos de tela utilizados foram botões e displays.

Os objetos de tela são criados a partir da barra de ferramentas Objetos ou através do Menu Objetos. Seleciona-se o objeto que se deseja criar e arrasta-se o mouse com o seu botão esquerdo pressionado na área da tela, sendo que, ao se soltar o botão, o objeto será posicionado dentro da área especificada.

Estes objetos têm propriedades em comum que podem ser alteradas selecionando-se o ramo Tela no *Organizer*. Este se abrirá e mostrará todos os objetos criados. Basta selecionar o objeto cujas propriedades se deseja alterar e realizar a configuração nas guias que se abrem ao lado direito do Organizer. Será utilizado para exemplificar o procedimento o botão da válvula 12 (**Figura A.6**).

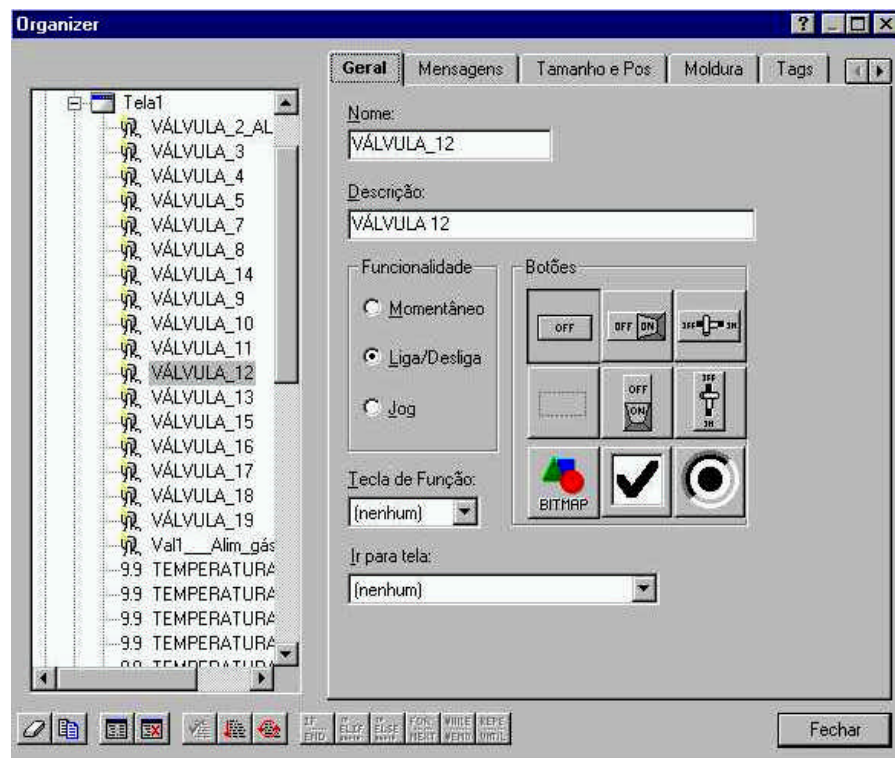


Figura A.6: Guia de propriedades gerais do botão.

O Botão é um objeto utilizado para acionamentos ou execuções de tarefas especificadas pelo usuário, através do mouse ou teclado. Quando se seleciona um botão qualquer da tela, a primeira guia que aparece é a de propriedades gerais do botão (**Figura A.6**). Nesta pode-se definir o nome do botão que será usado na árvore do *Organizer* e nos *Scripts*, realizar uma breve descrição sobre o botão, escolher qual o tipo de funcionamento do botão e o formato do botão. Utilizaram-se nesta aplicação somente botões do tipo

Liga/Desliga, sendo que estes dois estados podem ser definidos como ligado e desligado na guia Mensagens (**Figura A.7**). Na guia Mensagens se define o texto que será mostrado no botão quando ele estiver pressionado e quando ele estiver despressionado; podem, também, ser estabelecidas cores diferentes para os dois tipos de situação para chamar a atenção do operador. O campo valor define o valor a ser atribuído ao *Tag* associado, quando o botão estiver pressionado ou não. Todas as válvulas solenóides da PTA/TI são do tipo normalmente fechada, ou seja, quando não acionadas estas estão fechadas; exceções são as duas válvulas que ligam o banho termostático à camisa da coluna de adsorção, que são do tipo normalmente abertas. Portanto, todas as válvulas (exceto as do banho) possuem o valor 0, cor do botão cinza e mensagem desligada quando não estiverem pressionadas e valor 1, cor do botão branca e mensagem ligada quando estiverem pressionadas.

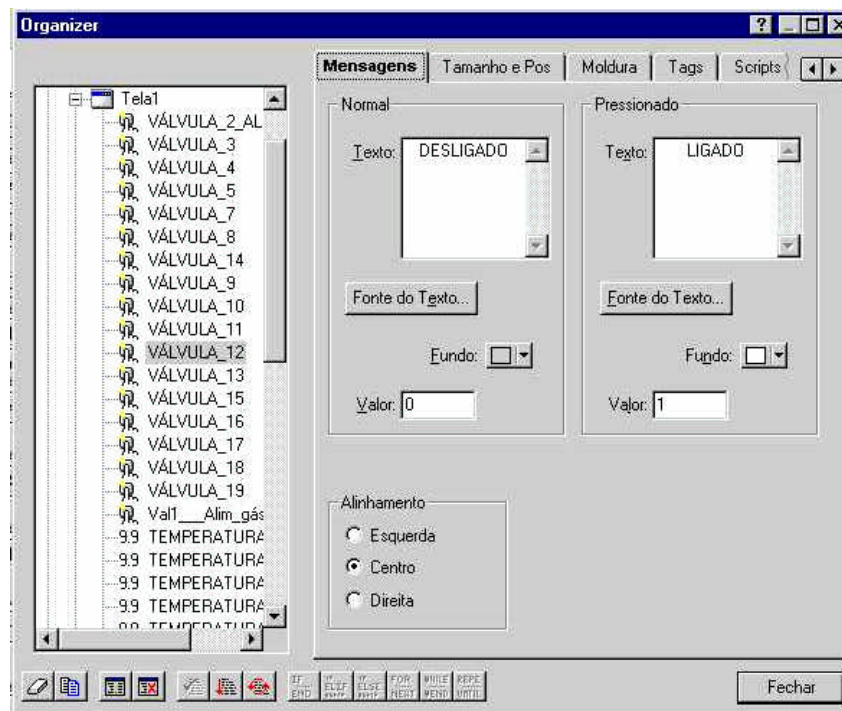


Figura A.7: Guia Mensagens do botão.

A guia Moldura apresentada da **Figura A.8** permite que o usuário configure características visuais aos objetos, como título, presença ou não de moldura, detalhes como espessura da moldura e efeitos 3D.

A guia de *Tags* (**Figura A.9**) permite a seleção do *tag* ao qual o objeto será relacionado. O campo Objetos mostra a árvore da aplicação e conforme o objeto selecionado nesta, suas propriedades aparecerão na janela Propriedades ao lado.

Seleciona-se, então o diretório *Tag* (**Figura A.10**) na aplicação e selecionam-se aquele(s) que será(ão) associado(s) ao objeto e pressiona-se, em seguida, adicionar. Para excluir um *Tag* já selecionado basta selecioná-lo na janela *Tags selecionados* e clicar em remover.

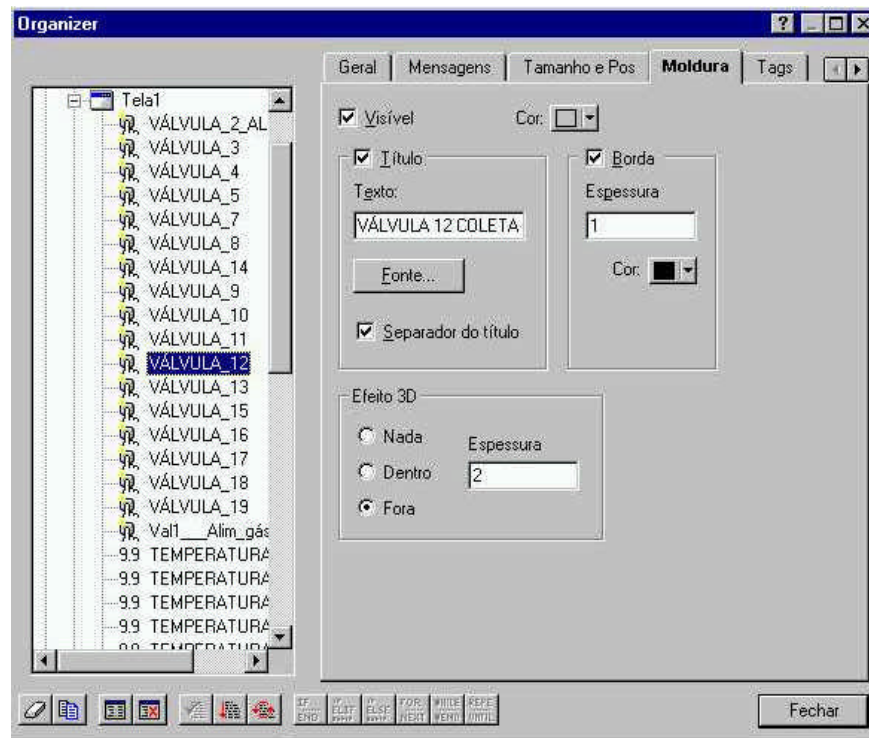


Figura A.8: Guia Moldura.

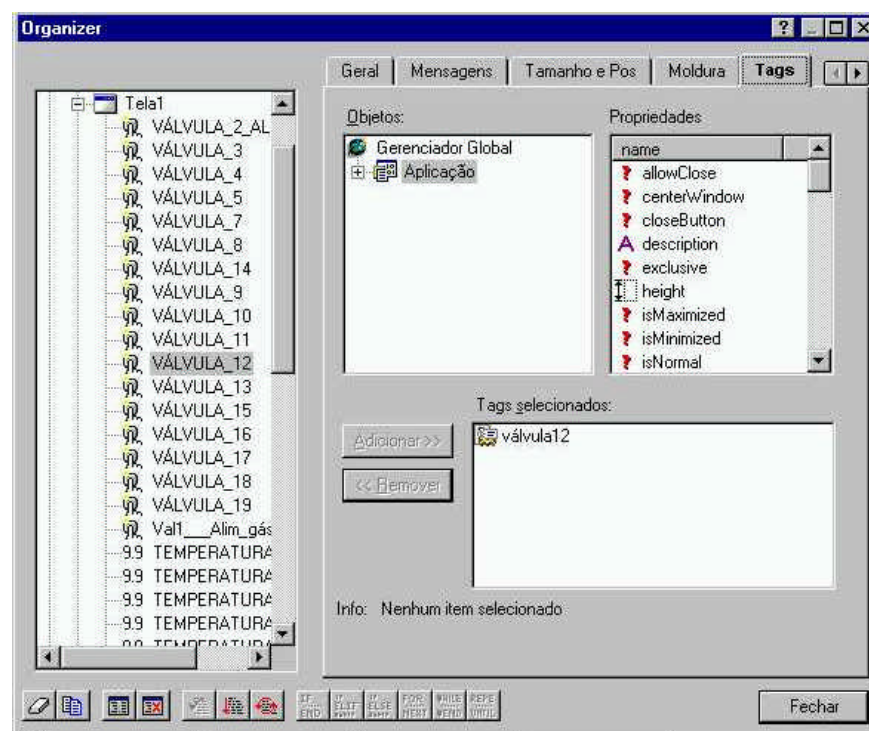


Figura A.9: Guia de Tags.

O outro tipo de objeto utilizado é o *display* que permite que sejam acompanhados os valores dos *tags* em tempo real e a sua configuração é bastante semelhante à dos botões. Estes objetos foram utilizados para a visualização dos valores de temperatura, pressão, pressão diferencial e absorbância.

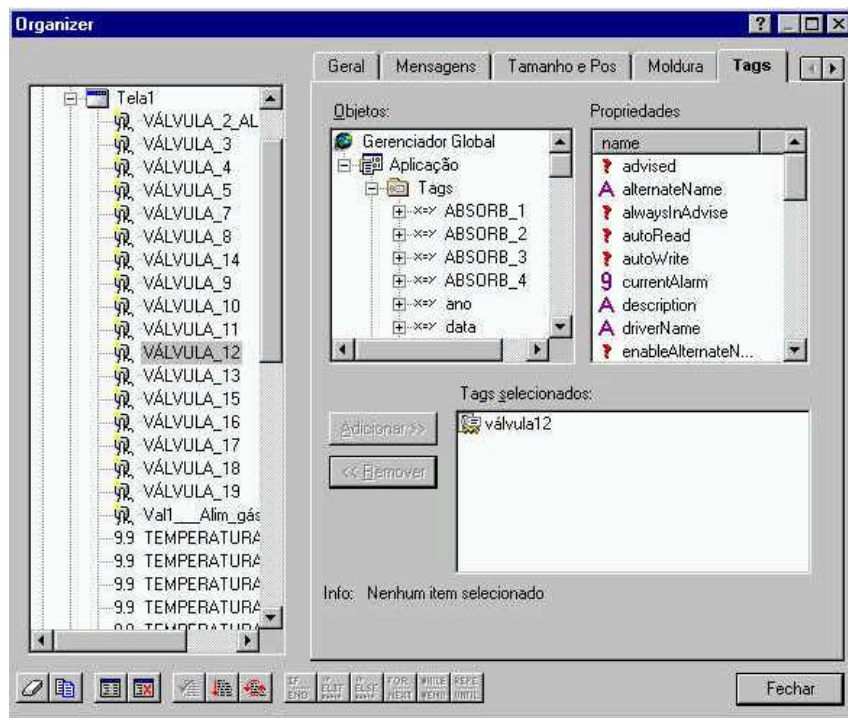


Figura A.10: Guia de Tags com seus ramos estendidos.

A **Figura A.11** apresenta a aplicação criada para o monitoramento da planta em seu formato normal, quando a planta encontra-se desligada; pode-se notar que os botões das válvulas solenóides estão em seu formato normalmente fechado, com exceção das válvulas que ligam o banho termostático à camisa da coluna de adsorção. Todos os valores dos *displays* são iguais a zero com exceção daqueles que estão correlacionados a *tags* tipo expressão que apresentam valor do coeficiente linear da reta de calibração dos equipamentos.

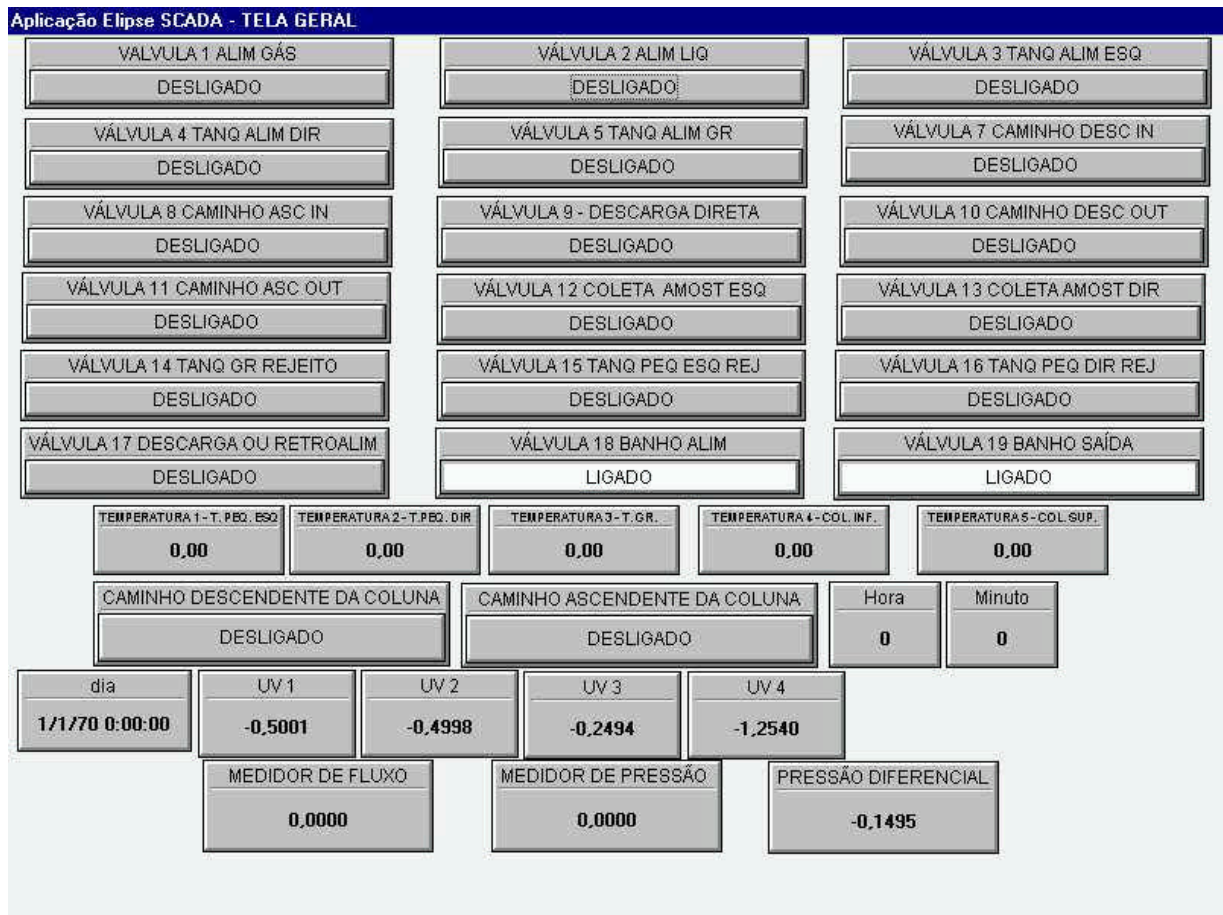


Figura A.11: Tela da aplicação criada com todos os seus objetos.

A.3 Comunicação com Drivers

Drivers são arquivos independentes do Elipse com extensão DLL e é por meio deles que o Elipse Windows pode comunicar-se com equipamentos de aquisição de dados e outros computadores executando o Elipse. Na árvore do *Organizer* existe o ramo *Drivers*, que, quando selecionado, permite a instalação e configuração do driver. Quando um *Driver* está instalado, um novo ramo abaixo e mais à direita de *Drivers* é criado e, neste, é possível verificar e configurar todas as suas propriedades. Foi utilizado um único *driver* na aplicação criada, o Driver 1 (ADAM 4000/5000) que é do tipo PLC (Figura A.12). Na Figura A.13 pode-se verificar que todos os tags da aplicação estão ligados ao Driver 1.

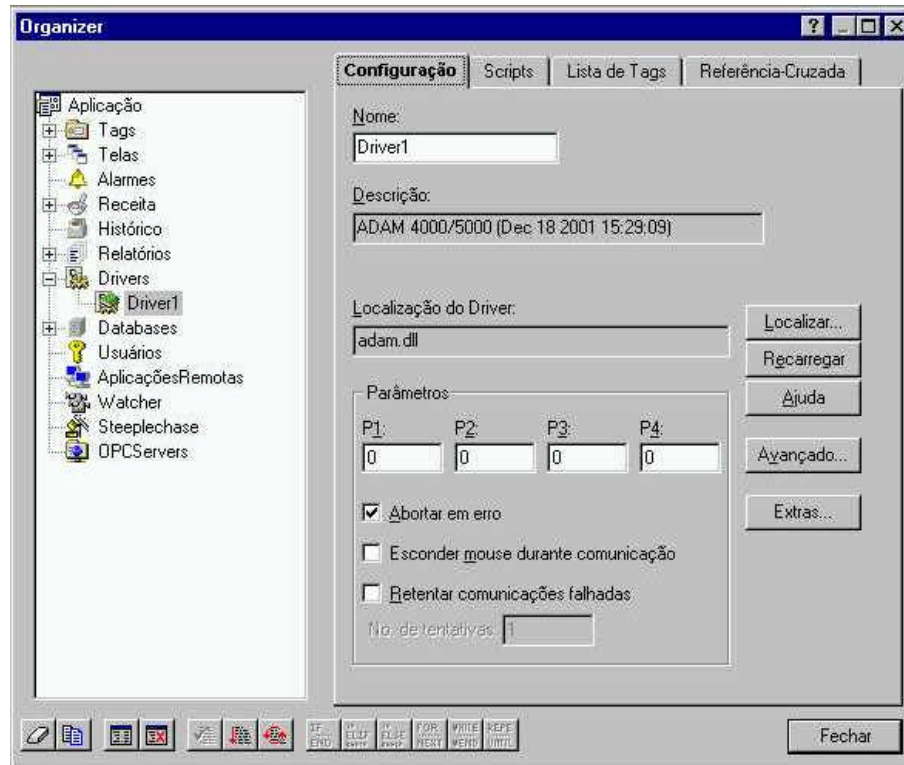


Figura A.12: Configuração do *Driver 1*.

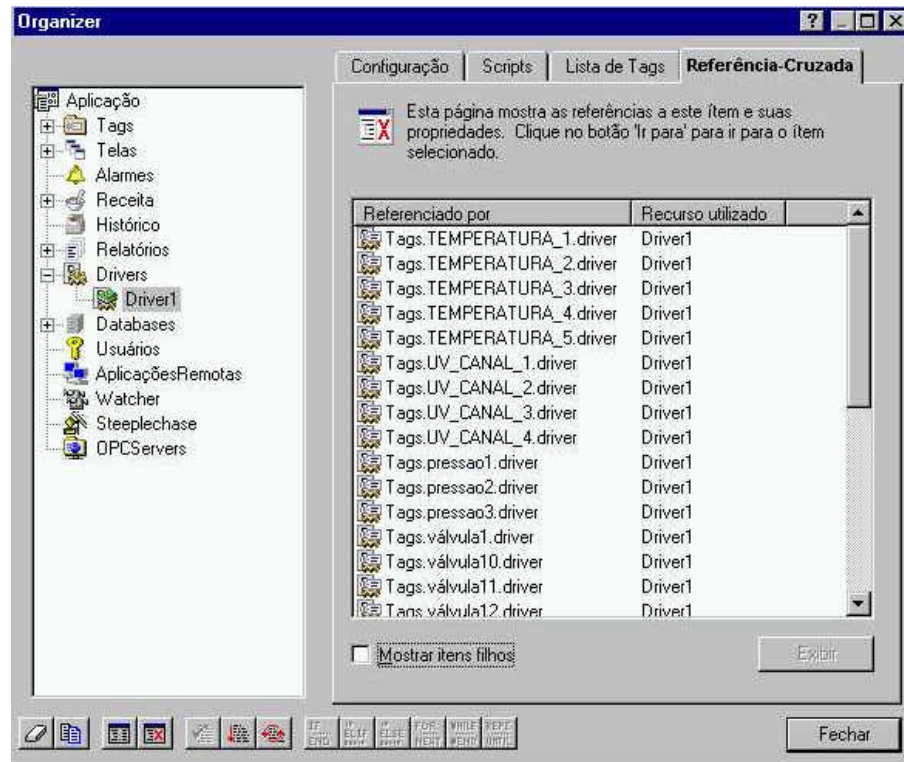


Figura A.13: Referência cruzada do *Driver 1*.

A.4 Utilização de Databases (ODBC)

A opção *Databases* do Eclipse Windows permite criar e manipular um banco de dados usando o ODBC (*Open Database Connectivity*) do Windows que efetua a manipulação do banco de dados, enviando e recebendo dados do Elipse. O ODBC é uma interface estratégica para acessar dados em um ambiente heterogêneo de sistemas gerenciadores de banco de dados relacionados ou não.

Para utilizar um banco de dados no Elipse é preciso selecionar a opção *Databases* na árvore de aplicação no *Organizer*. A **Figura A.14** mostra uma lista de todos os bancos de dados existentes na aplicação criada. Para conectar o Elipse ao ODBC basta pressionar o botão Novo à direita da página. Uma janela é mostrada perguntando se deseja-se criar uma conexão com uma tabela já existente ou criar uma nova tabela. A seguir, uma lista contendo as conexões existentes será mostrada, podendo-se escolher entre os drivers ODBC possíveis (MS-Access, MS-Excel, entre outros).

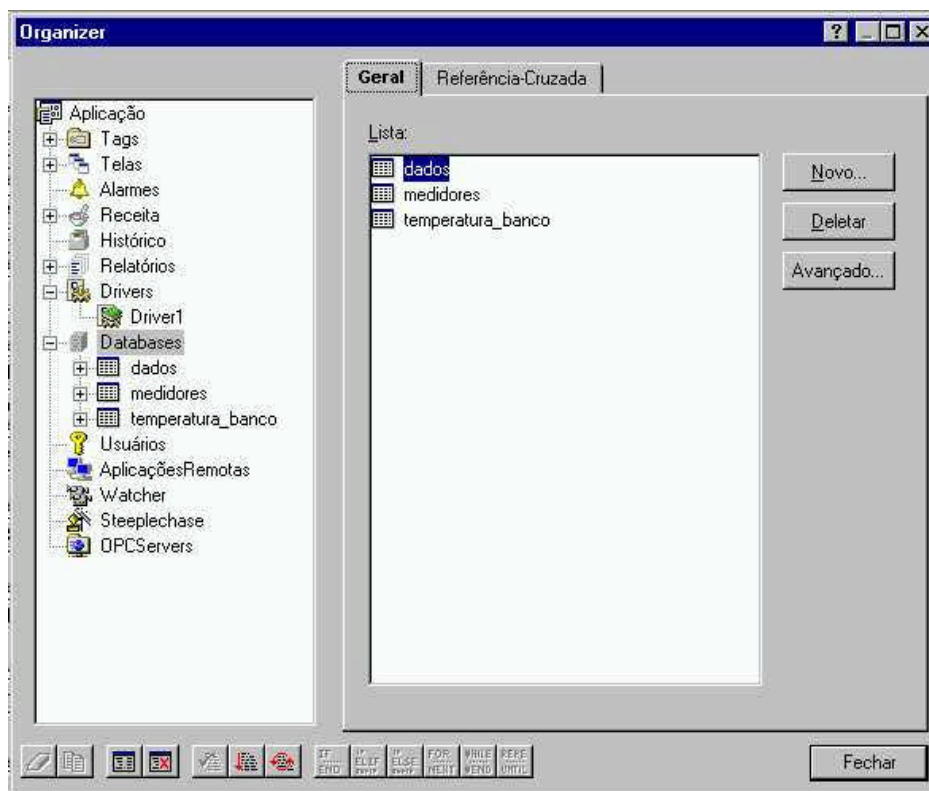


Figura A.14: Listagem dos bancos de dados existentes na aplicação criada.

No trabalho em questão, selecionou-se o MS-Access. Neste, criou-se um banco de dados contendo três tabelas cujos nomes são: dados, medidores e temperatura_banco. Em cada tabela, criaram-se as colunas correspondentes para o armazenamento de dados de

absorbância, pressão, pressão diferencial e temperatura e a respectiva data/hora. No Elipse, selecionou-se a opção Databases na árvore do Organizer. Pressionou-se o botão Novo e o Assistente de Nova Conexão (**Figura A.15**) mostrou uma janela para escolher-se entre fazer uma conexão com uma tabela já existente (ODBC) ou criar uma nova tabela. Selecionou-se a primeira opção e, então, uma nova janela contendo as opções de conexões disponíveis foi mostrada (**Figura A.16**).

Ao final, os títulos das tabelas selecionadas aparecem abaixo da opção Databases na árvore da aplicação e seus respectivos campos aparecem abaixo do título, como pode ser verificado na **Figura A.17**. A manipulação dos registros do Banco de Dados é feita através de funções especiais em uma página de Scripts da aplicação, que será vista no item A.5 .

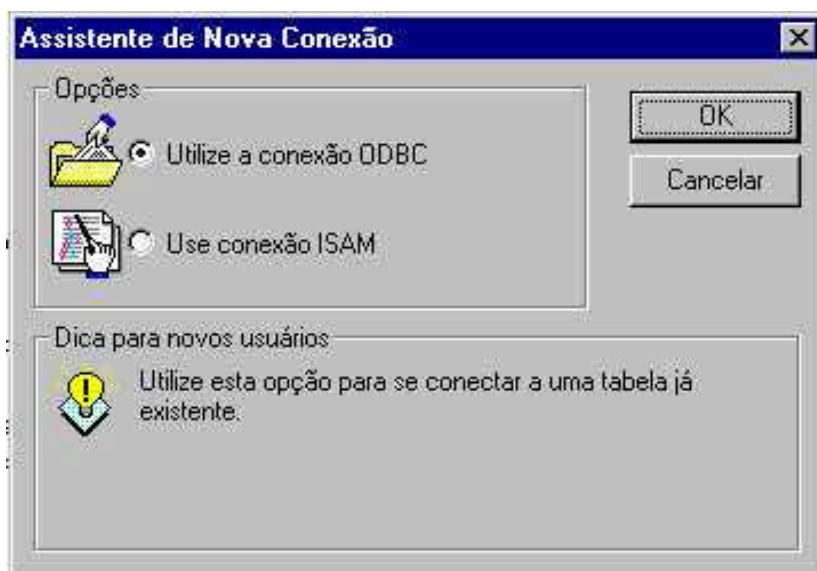


Figura A.15: Tela do Assistente de Nova Conexão.

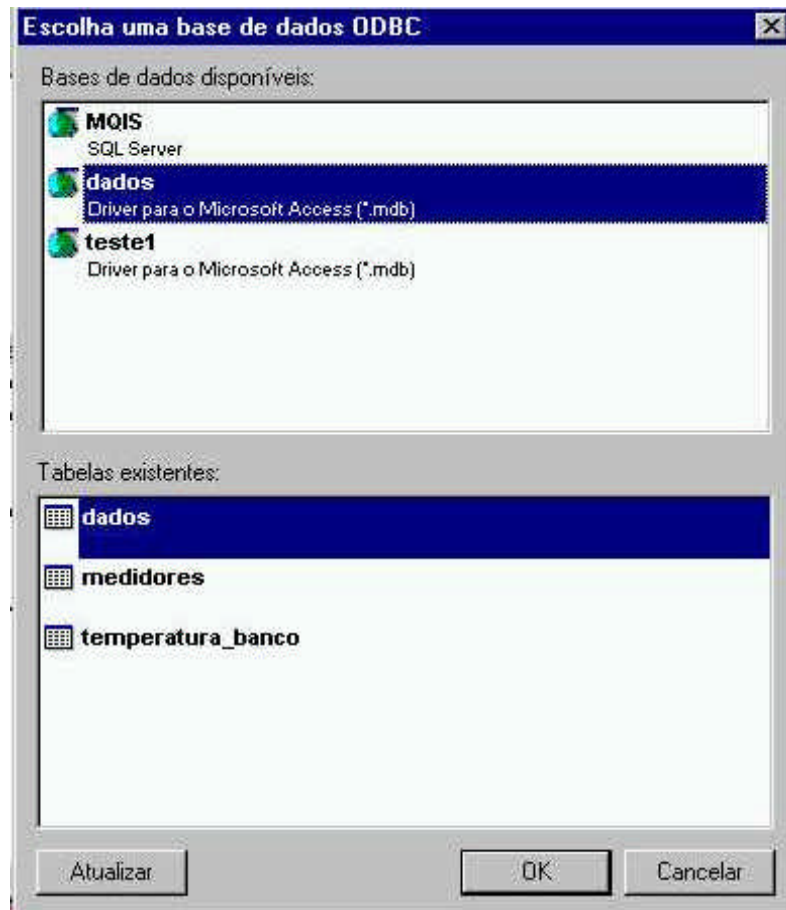


Figura A.16: Lista com as conexões disponíveis.

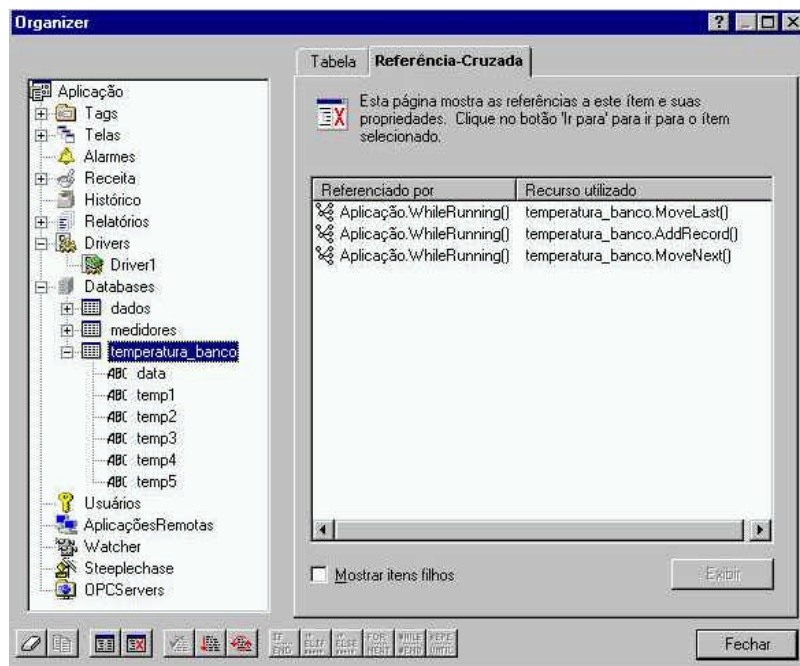


Figura A.17: Referência cruzada do *database* temperatura_banco da aplicação.

A.5 Scripts da aplicação

Scripts são módulos em linguagem *Elipse Basic*, onde se podem definir linhas de código e desta forma eles permitem uma maior flexibilidade para associar ações a eventos específicos. Com o ramo aplicação selecionado, escolheu-se a guia *Scripts* e dentre os disponíveis selecionou-se *WhileRunning* que é rodado de acordo com o intervalo de tempo definido pelo usuário, neste caso 30 min, para a aquisição de dados no Access.

No *script* criado (**Figura A.18**), as linhas de comando iniciais servem para a criação da data e hora correspondente a cada ponto experimental coletado no banco de dados. Em seguida a estas linhas, as próximas fazem referência à coluna tabela que será utilizada para o armazenamento do dado (*tag*) correspondente no arquivo do Access. Os comandos utilizados no *script* foram o *MoveLast*, que move o ponteiro de registros do arquivo de coleta de dados para o último registro; o *AddRecord* que adiciona um novo registro ao banco de dados e; o *MoveNext* que move o ponteiro de registros do arquivo no arquivo de coleta de dados para o próximo registro. Portanto, se a aplicação é encerrada e, posteriormente, colocada a rodar novamente, o comando *MoveLast* fará com que seja procurado o último dado registrado e, então, o próximo será armazenado sem que haja a possibilidade de um dado ser sobreposto por outro.

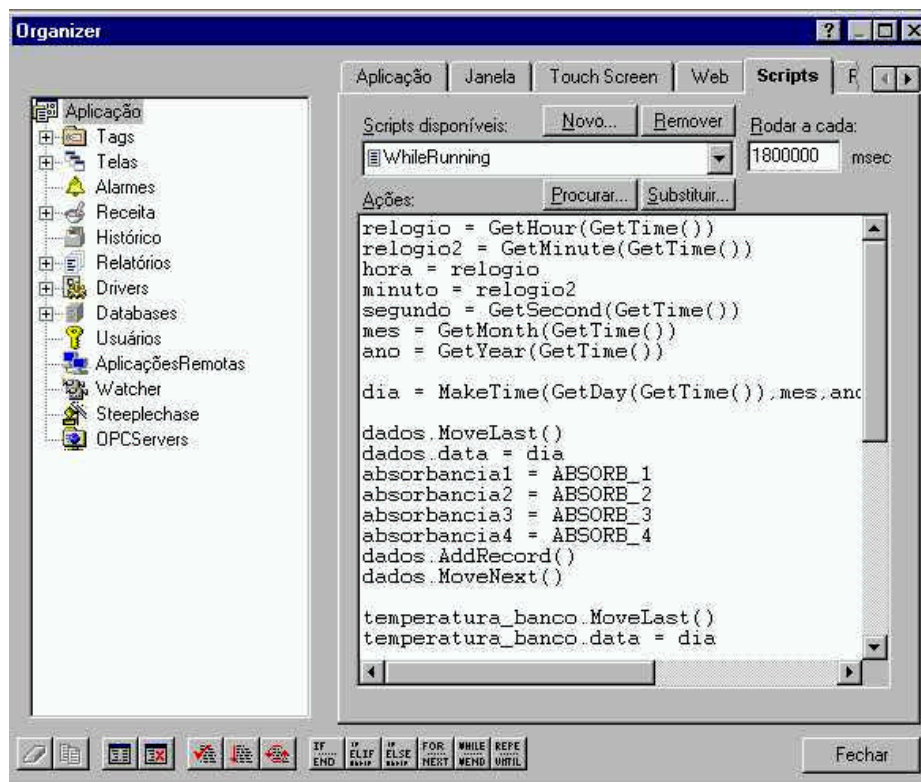


Figura A.18: Tela do Script da aplicação criada.

A aplicação criada foi, então, utilizada para a coleta de dados dos experimentos de curvas de ruptura. Esta aplicação foi de fundamental importância, ela dispensa a presença do operador a cada intervalo de coleta de amostra. Sem ela haveria problemas na coleta de dados e, dessa forma, haveria a interrupção desta nos períodos noturnos, já que os experimentos duravam dias sem nenhuma parada.

Apêndice B - Dados Experimentais

Neste apêndice são apresentados os dados experimentais completos utilizados para a realização dos trabalhos.

B.1 Caracterização do carvão

Neste item são apresentados os resultados da caracterização do carvão. Na **Tabela B.1**, **Tabela B.2** e são apresentados os resultados referentes à determinação da área superficial, cinzas e massa específica bulk.

Tabela B.1: Resultados referentes à determinação da área superficial do carvão.

P/P_0	Volume (cc.g ⁻¹)	P/P_0	Volume (cc.g ⁻¹)
$9,8197 \cdot 10^{-2}$	224,6522	$9,9142 \cdot 10^{-1}$	260,6567
$1,5303 \cdot 10^{-1}$	229,5178	$8,9873 \cdot 10^{-1}$	257,5956
$1,9791 \cdot 10^{-1}$	232,0611	$7,9633 \cdot 10^{-1}$	255,7222
$2,4918 \cdot 10^{-1}$	234,3289	$6,9684 \cdot 10^{-1}$	253,7445
$3,0108 \cdot 10^{-1}$	236,2433	$5,9797 \cdot 10^{-1}$	251,4455
$4,0619 \cdot 10^{-1}$	239,4167	$4,9939 \cdot 10^{-1}$	248,9089
$5,0671 \cdot 10^{-1}$	242,1822	$3,9530 \cdot 10^{-1}$	239,7133
$6,0524 \cdot 10^{-1}$	245,1011	$2,9908 \cdot 10^{-1}$	236,7144
$7,0456 \cdot 10^{-1}$	248,3122	$1,9380 \cdot 10^{-1}$	232,4367
$8,0324 \cdot 10^{-1}$	251,8622	$9,8336 \cdot 10^{-2}$	225,2433
$9,0183 \cdot 10^{-1}$	255,7889	-	-

Tabela B.2: Dados da determinação de cinzas do carvão.

Cadinho	Peso do cadinho (g)	Peso do carvão (g)	Cadinho + Carvão (g)	Cadinho + cinzas (g)	%cinzas
A1	26,9945	5,002	31,9965	27,4247	8,6
A2	27,2818	5,0057	32,2875	27,7593	9,5
A3	21,423	5,0015	26,4245	21,8593	8,7
Média de A1 e A3					8,7

Tabela B.3: Dados da determinação da massa específica bulk.

Proveta	Massa da Proveta (g)	Massa da Proveta + Carvão (g)	Massa do Carvão (g)	Massa da proveta + 60mL de água (g)	Massa da água na proveta (g)	Vol da proveta corrigidos a temp 20°C (mL)	Massa Específica Bulk (g/mL)
P1	125,69	154,46	28,77	185,69	60	60,17	0,4782
P2	117,2	148,57	31,37	177,31	60,11	60,28	0,5204

B.2 Determinação de concentração de tolueno

Neste item são apresentados os dados referentes à determinação da concentração das soluções aquosas de tolueno. Na **Tabela B.4**, **Tabela B.5**, **Tabela B.6** e **Tabela B.7** são apresentadas as absorvâncias correspondentes aos comprimentos de onda de 206 nm com

caminho óptico de 10 mm, 254 nm com 100 mm, 261 nm com 100 mm e, 254 com 100 mm de solução filtrada, respectivamente.

Tabela B.4: Dados de leitura de absorvância de amostras de solução aquosa de tolueno no comprimento de onda de 206 nm e caminho óptico de 10 mm.

Concentração (ppm)	Absorvância (%)						Média	Desvios
	Amostra1	Amostra2	Amostra3	Amostra4	Amostra5	Amostra6		
1,6	0,0695	0,0597	0,0638	0,0688	0,0607	0,0510	0,0623	0,005117
4	0,1600	0,1525	0,1590	0,1549	0,1203	0,1220	0,1448	0,015756
8	0,3056	0,3156	0,2731	0,2908	0,2780	0,2818	0,2908	0,013189
12	0,4401	0,4456	0,4488	0,4348	0,3919	0,3948	0,4260	0,021767
16	0,6460	0,6344	0,6113	0,6095	0,5799	0,6563	0,6229	0,022667
20	0,7999	0,7601	0,6984	0,7792	0,7011	0,7652	0,7507	0,033933

Tabela B.5: Dados de leitura de absorvância de amostras de solução aquosa de tolueno no comprimento de onda de 254 nm e caminho óptico de 100 mm.

Concentração (ppm)	Absorvância (%)				Média	Desvio
	Amostra1	Amostra2	Amostra3	Amostra4		
12	0,1126	0,1154	0,1282	0,1216	0,1195	0,00545
24	0,2607	0,2580	0,2772	0,2580	0,2635	0,006863
36	0,3873	0,3224	0,4162	0,3875	0,3784	0,027975
48	0,5482	0,5017	0,5548	0,5483	0,5383	0,018275
60	0,6715	0,6997	0,7316	0,7267	0,7074	0,021775
72	0,8397	0,8671	0,8795	0,8708	0,8643	0,012288

Tabela B.6: Dados de leitura de absorvância de amostras de solução aquosa de tolueno no comprimento de onda de 261 nm e caminho óptico de 100 mm.

Concentração (ppm)	Absorvância (%)				Média	Desvios
	Amostra1	Amostra2	Amostra3	Amostra4		
1,6	0,0179	0,0154	0,0313	0,0294	0,0235	0,0069
4	0,0481	0,0418	0,0557	0,0536	0,0498	0,0049
8	0,0959	0,0909	0,0945	0,1005	0,0955	0,0028
12	0,1394	0,141	0,1512	0,1527	0,1461	0,0059
16	0,203	0,2029	0,2079	0,2026	0,2041	0,0019
20	0,2506	0,2476	0,2371	0,2656	0,2502	0,0079

Tabela B.7: Dados de leitura de absorvância de amostras filtradas de solução aquosa de tolueno no comprimento de onda de 254 nm e caminho óptico de 100 mm.

Concentração (ppm)	Absorvância (%)					
	Amostra1	Amostra2	Amostra3	Amostra4	Média	Desvio
12	0,1018	0,1024	0,1155	0,1090	0,1072	0,0051
24	0,2380	0,2321	0,2531	0,2313	0,2386	0,0072
36	0,3556	0,2952	0,3707	0,3585	0,3450	0,0249
48	0,5082	0,4629	0,5035	0,4953	0,4925	0,0148
60	0,6267	0,6641	0,6759	0,6796	0,6616	0,0174
72	0,7955	0,8190	0,8019	0,8012	0,8044	0,0073

B.3 Posta em marcha da PTA/TI

Na **Tabela B.8** são apresentados os dados referentes às absorvâncias da solução aquosa de tolueno lidas nos espectrofotômetros on-line e de bancada, utilizados para realizar a correlação das absorvâncias entre estes equipamentos.

Tabela B.8: Dados de absorvância lidos pelos espectrofotômetros de banca e on-line de amostras de efluentes à PTA/TI utilizados para a elaboração da curva de calibração entre os espectrofotômetros.

Frasco	Absorvância Lida		Frasco	Absorvância Lida	
	UV On-line	UV Bancada		UV On-line	UV Bancada
1	0,2640	0,6737	30	0,02460	0,0734
2	0,2596	0,6594	31	0,0228	0,0622
3	0,2746	0,6793	32	0,0187	0,053
4	0,2746	0,6915	33	0,0178	0,0535
5	0,2752	0,6835	34	0,0172	0,051
6	0,2752	0,6844	35	0,0154	0,0466
7	0,2739	0,6832	36	0,0591	0,1611
8	0,2739	0,6749	37	0,0582	0,1656
9	0,2690	0,6808	38	0,0577	0,1587
10	0,2690	0,6648	39	0,0500	0,132
11	0,2685	0,6778	40	0,0969	0,2581
12	0,2685	0,6680	41	0,1055	0,2832
13	0,0055	0,0113	42	0,0672	0,1784
14	0,0059	0,0123	43	0,0640	0,1705
15	0,0059	0,0121	44	0,0804	0,2281
16	0,0038	0,0093	45	0,0785	0,2265
17	0,0067	0,0278	46	0,0739	0,1987
18	0,0053	0,021	47	0,0742	0,185
19	0,0044	0,0218	48	0,0717	0,2008
20	0,0033	0,0214	49	0,1394	0,3664
21	0,0032	0,0204	50	0,1385	0,3567
22	0,0043	0,0274	51	0,1418	0,3615
23	0,0044	0,0277	52	0,1235	0,3103
24	0,0043	0,026	53	0,2482	0,5918
25	0,0097	0,0355	54	0,2466	0,5922
26	0,0137	0,0539	55	0,2522	0,6047
27	0,0133	0,0512	56	0,2478	0,6034
28	0,0206	0,0799	57	0,2261	0,5861
29	0,0188	0,0820	-	-	-

B.4 Isotermas de equilíbrio

Na **Tabela B.9** são apresentados os dados dos experimentos de isotermas de equilíbrio. São apresentados os valores de massa, de concentração da solução no equilíbrio (c_e) e da concentração de soluto na fase sólida no equilíbrio (q_e).

Tabela B.9: Dados dos experimentos de equilíbrio de adsorção.

	Massa de carvão utilizada (g)	c_e (mg de soluto/L de solução)	q_e (mg de soluto/g de carvão)
Frasco1	0,0425	69,08547	191,7096028
Frasco2	0,1992	31,34188	90,31304706
Frasco3	0,3989	25,50427	49,33430181
Frasco4	0,6009	15,41026	36,37876519
Branco Sol		99,48718	

B.5 Teste cinético

Na **Tabela B.10** e **Tabela B.11** são apresentados os dados referentes aos testes cinéticos realizados. As massas de carvão utilizadas nos testes 1, 2 e 3 da **Tabela B.10** são 1,0005, 1,0008 e 1,0014 g, respectivamente. As massa de carvão utilizadas nos testes 1, 2 e 3 da **Tabela B.11** são 2,0016, 2,0010 e 2,0012 g, respectivamente.

Tabela B.10: Dados dos testes cinéticos com 1g de carvão.

Tempo (h)	Absorbância (%)					
	Frascos com carvão			Branco		
	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 1	Teste 2	Teste 3
0,5	1,1165	1,0769	1,0307	1,2176	1,1860	1,1342
0,8	1,0705	1,0341	0,9786	1,1954	1,1537	1,1157
1,0	1,0300	0,9944	0,9441	1,1708	1,1287	1,1015
1,3	0,9775	0,9219	0,8917	1,1459	1,1197	1,0697
2,0	0,8804	0,8266	0,8381	1,1032	1,0785	1,0382
3,0	0,7924	0,7793	0,7809	1,0728	1,0422	1,0063
4,0	0,7215	0,7143	0,7415	1,0383	1,0091	0,9817
5,0	0,6986	0,6660	0,7065	1,0501	1,0123	0,9694
6,0	0,6167	0,5742	0,6390	0,9922	0,9365	0,9319
7,0	0,5600	0,5428	0,5906	0,9515	0,9076	0,8934
8,0	0,5153	0,4703	0,5434	0,9198	0,8666	0,8611
9,0	0,4512	0,4187	0,5110	0,8769	0,8456	0,8312
10,0	0,4196	0,3745	0,4699	0,8553	0,8145	0,8146
11,0	0,3835	0,3364	0,4284	0,8257	0,7888	0,7856
12,0	0,3431	0,3026	0,4040	0,8011	0,7544	0,7642
13,0	0,3166	0,2614	0,3689	0,7645	0,7237	0,7367

Tabela B.11: Dados dos testes cinéticos com 2g de carvão.

Absorbância (%)						
Tempo (h)	Frascos com carvão			Branco		
	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 1	Teste 2	Teste 3
0,50	1,0557	1,0582	1,0897	1,2284	1,2130	1,2044
0,75	0,9654	0,9973	0,9659	1,1834	1,1634	1,1518
1,00	0,9037	0,8786	0,9367	1,1574	1,1267	1,1268
1,25	0,8341	0,8162	0,8513	1,1250	1,0962	1,0966
2,00	0,7671	0,7443	0,7781	1,0727	1,0633	1,0589
3,00	0,6809	0,6333	0,7148	1,0518	1,0322	1,0220
4,00	0,6165	0,5732	0,6563	1,0034	0,9727	0,9747
5,00	0,5563	0,4905	0,5902	0,9672	0,9424	0,9384
6,00	0,5005	0,4501	0,5361	0,9400	0,9128	0,9096
7,00	0,4554	0,3879	0,4804	0,9091	0,8720	0,8699
8,00	0,3961	0,3268	0,4312	0,8700	0,8470	0,8400
9,00	0,3538	0,2921	0,3792	0,8350	0,8102	0,8073
10,00	0,3138	0,2511	0,3366	0,8079	0,7813	0,7751
11,00	0,2785	0,2211	0,3065	0,7716	0,7398	0,7328
12,00	0,2589	0,1870	0,2858	0,7416	0,7272	0,7189
13,00	0,2193	0,1627	0,1841	0,7187	0,6955	0,6932
23,25	0,1049	0,0562	0,1108	0,6897	0,6635	0,6600
34,50	0,0652	0,0115	0,0566	0,6211	0,6063	0,6165

B.6 Curvas de ruptura

Na **Tabela B.12**, **Tabela B.13**, **Tabela B.14**, **Tabela B.15**, **Tabela B.16**, **Tabela B.17**, **Tabela B.18** e **Tabela B.19** são apresentados os dados dos experimentos da adsorção de tolueno em solução aquosa em leito fixo de carvão ativado granular realizados na PTA/TI. São apresentadas a absorbância da solução de efluente, e as temperaturas na entrada (topo) e saída da coluna.

Tabela B.12: Dados do experimento em leito fixo de carvão ativo - corrida 1.

Tempo (h)	Concentração do efluente (ppm)	Temperatura entrada (°C)	Temperatura saída (°C)	Tempo (h)	Concentração do efluente (ppm)	Temperatura entrada (°C)	Temperatura saída (°C)
0,5	0,4109	19,79	22,01	23,5	0,0000	21,44	22,86
1,0	0,2055	19,77	22,16	24,0	0,0000	21,65	23,12
1,5	0,2055	19,82	21,91	24,5	0,2055	21,80	23,20
2,0	0,2055	19,64	21,75	25,2	0,0000	21,62	22,89
2,5	0,2055	19,69	21,70	25,7	0,0000	21,52	22,71
3,0	0,2055	19,61	21,34	26,2	0,0000	21,39	22,71
3,5	0,2055	19,56	21,34	26,7	0,2055	21,06	22,35
4,0	0,2055	19,49	21,21	27,2	0,2055	20,95	22,29
4,5	0,2055	19,69	21,08	27,7	0,2055	20,64	22,01
5,0	0,4109	19,56	21,03	28,2	0,2055	20,52	21,75
5,5	0,4109	19,67	20,98	28,7	0,2055	20,39	21,86
6,0	0,4109	19,59	20,98	29,2	0,2055	20,21	21,44
6,5	0,4109	19,72	20,95	29,7	0,2055	20,05	21,55
7,0	0,2055	19,67	20,90	30,2	0,4109	19,95	21,29
7,5	0,2055	19,46	20,80	30,7	0,4109	19,87	21,24
8,0	0,4109	19,43	20,75	31,2	0,4109	19,79	21,19
8,5	0,4109	19,36	20,59	31,7	0,4109	19,74	21,31
9,0	0,4109	19,38	20,59	32,2	0,4109	19,77	21,03
9,5	0,4109	19,33	20,62	32,7	0,4109	19,74	21,11
10,0	0,4109	19,28	20,72	33,2	0,4109	19,72	21,16
10,5	0,4109	19,23	20,67	33,7	0,4109	19,77	20,98
11,0	0,4109	19,20	20,67	34,2	0,4109	19,72	20,90
11,5	0,4109	19,20	20,62	34,7	0,4109	19,56	21,11
12,0	0,4109	19,25	20,54	35,2	0,4109	19,69	21,19
12,5	0,4109	19,10	20,54	35,7	0,4109	19,64	20,98
13,0	0,2055	19,15	20,44	36,2	0,4109	19,74	20,95
13,5	0,4109	19,02	20,36	36,7	0,4109	19,56	20,95
14,0	0,2055	19,13	20,34	37,2	0,4109	19,43	20,64
14,5	0,2055	18,89	20,28	37,7	0,4109	19,10	20,34
15,0	0,4109	18,82	20,28	38,2	0,4109	18,89	20,21
15,5	0,4109	18,79	20,28	38,7	0,6164	18,69	20,05
16,0	0,4109	18,95	20,28	39,2	0,6164	18,61	19,92
16,5	0,4109	18,89	20,21	39,7	0,6164	18,53	19,72
17,0	0,4109	18,87	20,26	40,2	0,6164	18,41	19,82
17,5	0,4109	18,92	20,36	40,7	0,6164	18,59	19,87
18,0	0,4109	19,20	20,44	41,2	0,6164	18,77	20,13
18,5	0,4109	19,33	20,67	41,7	0,6164	18,95	20,28
19,0	0,2055	19,49	20,88	42,2	0,6164	19,33	20,59
19,5	0,2055	19,69	21,11	42,7	0,4109	19,36	20,77
20,0	0,2055	19,92	21,34	43,2	0,6164	19,49	21,08
20,5	0,2055	20,28	21,57	43,7	0,6164	19,82	21,24
21,0	0,2055	20,46	21,96	44,2	0,4109	20,10	21,39
21,5	0,2055	20,49	22,11	44,7	0,6164	20,18	21,78
22,0	0,2055	20,82	22,29	45,2	0,4109	20,57	22,09
22,5	0,2055	21,13	22,47	45,7	0,4109	20,82	22,11
23,0	0,0000	21,16	22,78	46,2	0,4109	21,11	22,65

Continuação da Tabela B.12.

Tempo (h)	Concentração do efluente (ppm)	Temperatura entrada (°C)	Temperatura saída (°C)	Tempo (h)	Concentração do efluente (ppm)	Temperatura entrada (°C)	Temperatura saída (°C)
46,7	0,4109	21,26	22,76	83,3	0,6164	20,82	22,24
47,2	0,2055	21,52	23,09	83,8	0,6164	20,70	21,93
47,7	0,2055	21,70	23,07	84,3	0,8219	20,54	21,83
48,2	0,2055	21,83	23,30	84,8	0,8219	20,41	21,68
48,7	0,2055	22,04	23,40	85,3	0,8219	20,54	21,73
49,2	0,2055	22,22	23,51	85,8	0,8219	20,31	21,65
49,8	0,4109	22,09	23,40	86,3	0,8219	20,34	21,68
50,3	0,4109	21,83	23,22	86,8	0,8219	20,41	21,73
50,8	0,4109	21,73	23,07	87,3	0,8219	20,44	21,75
51,3	0,6164	21,62	22,91	87,8	1,0274	20,36	21,57
51,8	0,6164	21,44	22,84	88,3	0,8219	20,13	21,34
52,3	0,6164	21,24	22,60	88,8	0,8219	19,95	21,26
65,5	1,0274	19,15	20,54	89,3	1,0274	20,13	21,57
66,0	1,0274	19,49	20,82	89,8	0,6164	20,46	22,19
66,5	1,0274	19,61	21,13	90,3	0,8219	21,29	22,60
67,0	1,0274	19,90	21,24	90,8	0,8219	21,21	22,45
67,5	1,0274	20,10	21,34	91,3	0,8219	21,16	22,45
68,0	0,8219	20,41	21,86	91,8	0,8219	21,24	22,40
68,5	0,8219	20,59	22,06	92,3	1,0274	21,08	22,53
69,0	0,8219	20,88	22,37	92,8	0,8219	21,24	22,47
69,5	0,8219	21,13	22,73	93,3	0,8219	21,08	22,37
70,0	0,8219	21,31	22,89	93,8	1,0274	20,98	22,32
70,5	0,6164	21,73	23,14	94,3	1,0274	20,88	22,16
71,0	0,6164	22,01	23,07	94,8	1,0274	20,90	22,09
71,5	1,2328	21,68	22,24	95,3	1,0274	20,49	21,96
72,0	0,2055	21,08	23,35	95,8	1,2328	20,54	21,91
72,5	0,2055	21,37	23,71	96,3	1,2328	20,49	21,75
73,8	0,2055	21,83	23,92	96,8	1,2328	20,31	21,47
74,3	0,2055	21,83	23,69	97,3	1,4383	20,08	21,29
74,8	0,2055	21,75	23,56	97,8	1,4383	19,82	21,11
75,3	0,2055	21,68	23,35	98,3	1,4383	19,77	20,93
75,8	0,4109	21,62	23,14	98,8	1,4383	19,59	20,82
76,3	0,4109	21,68	23,07	99,3	1,4383	19,59	20,70
76,8	0,4109	21,62	22,99	99,8	1,4383	19,36	20,67
77,3	0,6164	21,47	22,86	100,3	1,4383	19,43	20,52
77,8	0,6164	21,47	22,71	100,8	1,6438	19,28	20,54
78,3	0,6164	21,37	22,65	101,3	1,6438	19,18	20,34
78,8	0,6164	21,42	22,50	101,8	1,6438	19,10	20,31
79,3	0,6164	21,11	22,40	102,3	1,6438	18,84	20,13
79,8	0,6164	21,01	22,47	102,8	1,6438	18,74	20,08
80,3	0,6164	21,16	22,47	103,3	1,6438	18,95	20,26
80,8	0,6164	21,31	22,40	103,8	1,6438	19,13	20,39
81,3	0,6164	21,06	22,37	104,3	1,6438	19,31	20,62
81,8	0,6164	21,16	22,45	104,8	1,6438	19,43	20,85
82,3	0,6164	21,06	22,19	105,3	1,6438	19,56	20,77
82,8	0,6164	20,98	22,40	105,8	1,6438	19,59	21,21

Continuação da Tabela B.12.

Tempo (h)	Concentração do efluente (ppm)	Temperatura entrada (°C)	Temperatura saída (°C)	Tempo (h)	Concentração do efluente (ppm)	Temperatura entrada (°C)	Temperatura saída (°C)
106,3	1,6438	19,92	21,31	129,6	3,9040	19,87	21,08
106,8	1,8493	20,18	21,68	130,1	3,9040	19,97	21,42
107,3	1,8493	20,18	21,75	130,6	3,9040	20,28	21,60
107,8	1,8493	20,46	21,96	131,1	3,9040	20,49	21,78
108,3	1,8493	20,70	22,32	131,6	3,9040	20,75	22,04
108,8	1,8493	20,95	22,50	132,1	3,9040	21,01	22,40
109,3	1,6438	21,13	22,65	132,6	3,9040	21,26	22,76
109,8	1,6438	21,24	22,65	133,1	3,9040	21,78	22,99
110,3	1,6438	21,37	22,81	133,6	3,9040	21,86	23,22
110,8	1,8493	21,39	22,86	134,1	3,9040	21,91	23,45
111,6	1,8493	21,52	22,71	134,6	3,9040	22,11	23,45
112,1	1,8493	21,26	22,73	135,1	3,9040	22,16	23,58
112,6	1,8493	21,42	22,47	135,6	3,9040	22,24	23,40
113,1	2,0547	21,06	22,35	136,5	4,3150	21,93	23,12
113,6	2,0547	20,95	22,24	137,0	4,3150	21,73	23,20
114,1	2,2602	20,77	22,11	137,5	4,3150	21,75	23,02
114,6	2,2602	20,70	22,14	138,0	4,3150	21,62	22,84
115,1	2,2602	20,82	22,19	138,5	4,5204	21,44	22,81
115,6	2,4657	20,85	22,11	139,0	4,5204	21,39	22,50
116,1	2,4657	20,80	21,93	139,5	4,5204	21,29	22,50
116,6	2,4657	20,70	21,57	140,0	4,7259	21,13	22,16
117,1	2,4657	20,75	22,11	140,5	4,7259	21,11	22,40
117,6	2,4657	20,64	22,04	141,0	4,9314	20,95	22,24
118,1	2,4657	20,62	21,86	141,5	5,1369	20,93	22,06
118,6	2,6712	20,54	21,68	142,0	5,1369	20,59	21,83
119,1	2,8766	20,36	21,49	142,5	5,1369	20,49	21,68
119,6	2,8766	20,21	21,39	143,0	5,1369	20,41	21,60
120,1	2,8766	20,08	21,39	143,5	5,3423	20,10	21,47
120,6	2,8766	20,15	21,31	144,0	5,3423	20,00	21,24
121,1	2,8766	19,90	21,21	144,5	5,5478	19,90	21,24
121,6	2,8766	19,82	21,16	145,0	5,5478	19,90	21,16
122,1	3,0821	19,77	20,85	145,5	5,5478	19,92	21,21
122,6	3,0821	19,56	20,77	146,0	5,5478	19,79	20,98
123,1	3,2876	19,49	20,67	146,5	5,7533	19,61	20,82
123,6	3,0821	19,25	20,49	147,0	5,7533	19,46	20,80
124,1	3,2876	19,13	20,31	147,5	5,9588	19,38	20,59
124,6	3,4931	19,02	20,18	148,0	5,9588	19,31	20,36
125,1	3,4931	18,82	20,13	148,5	5,9588	19,25	20,28
125,6	3,6985	18,74	19,95	149,0	5,9588	19,25	20,26
126,1	3,6985	18,71	19,97	149,5	5,9588	19,15	20,41
126,6	3,6985	18,71	19,95	150,0	6,1642	19,23	20,54
127,1	3,6985	18,87	20,18	150,5	6,1642	19,28	20,49
127,6	3,6985	19,13	20,41	151,0	6,1642	19,20	20,57
128,1	3,6985	19,56	20,70	151,5	5,1369	18,59	18,64
128,6	3,6985	19,49	20,95	152,0	8,2190	18,77	20,41
129,1	3,6985	19,74	21,06	152,5	5,3423	18,38	20,41

Continuação da Tabela B.12.

Tempo (h)	Concentração do efluente (ppm)	Temperatura entrada (°C)	Temperatura saída (°C)	Tempo (h)	Concentração do efluente (ppm)	Temperatura entrada (°C)	Temperatura saída (°C)
153,0	5,3423	18,51	20,31	176,7	11,5066	19,95	21,34
153,5	5,5478	18,66	20,39	177,2	11,7120	20,21	21,52
154,0	5,9588	18,89	20,44	177,7	11,9175	20,54	21,93
154,5	5,9588	19,23	20,77	178,2	12,1230	20,82	22,19
155,0	5,9588	19,38	21,01	178,7	12,1230	20,98	22,29
155,5	6,1642	19,87	21,34	179,2	12,1230	21,19	22,60
156,0	6,1642	20,23	21,75	179,7	12,3285	21,42	22,99
156,5	6,3697	20,77	22,24	180,8	12,5339	22,11	23,61
157,0	6,3697	21,08	22,65	181,3	12,5339	22,32	23,84
157,5	6,5752	21,42	22,91	181,8	12,5339	22,58	23,89
158,0	6,5752	21,75	23,14	182,3	12,7394	22,71	24,10
158,5	6,5752	21,93	23,27	182,8	12,7394	22,71	24,28
159,0	6,5752	22,01	23,51	183,3	12,9449	22,81	24,20
159,5	6,7807	22,09	23,58	183,8	13,1504	22,84	24,10
160,0	6,7807	22,06	23,48	184,4	13,1504	22,76	24,05
160,8	6,9861	21,70	23,04	184,9	13,5613	22,53	23,87
161,3	6,9861	21,52	22,89	185,4	13,7668	22,50	23,69
161,8	7,3971	21,47	22,86	185,9	14,1777	22,35	23,66
162,3	7,6026	21,44	22,86	186,4	14,1777	22,19	23,61
162,8	7,6026	21,24	22,53	186,9	14,5887	22,11	23,56
163,3	8,0135	21,21	22,60	187,4	14,7942	22,14	23,51
163,8	8,0135	21,21	22,68	187,9	15,2051	22,22	23,56
164,3	8,0135	21,24	22,50	188,4	15,2051	22,22	23,45
164,8	8,2190	21,06	22,47	188,9	15,2051	22,06	23,43
165,3	8,2190	20,90	22,11	189,4	15,6161	22,01	23,38
165,8	8,2190	20,82	22,06	189,9	15,8215	22,01	23,30
166,3	8,6299	20,72	21,86	190,4	16,2325	21,93	23,32
166,8	8,6299	20,57	21,75	190,9	16,4380	21,86	23,14
167,3	8,8354	20,46	21,75	191,4	16,6434	21,73	23,07
167,8	8,8354	20,39	21,65	191,9	16,8489	21,49	22,84
168,3	9,2464	20,28	21,49	192,4	17,0544	21,39	22,65
168,8	9,0409	20,21	21,34	192,9	17,0544	21,19	22,50
169,3	9,4518	20,08	21,34	193,4	17,4653	21,03	22,24
169,8	9,6573	20,00	21,16	193,9	17,6708	20,95	22,24
170,3	9,6573	19,92	21,08	194,4	17,8763	20,88	22,04
170,8	9,8628	19,82	20,95	194,9	18,0818	20,77	22,11
171,3	10,0683	19,56	20,77	195,4	18,6982	20,82	22,04
171,8	10,0683	19,38	20,59	195,9	18,6982	20,64	21,96
172,3	10,4792	19,36	20,70	196,4	19,1091	20,64	21,80
172,8	10,4792	19,23	20,59	196,9	19,3146	20,54	21,80
173,3	10,6847	19,10	20,23	197,4	19,7256	20,52	21,83
173,8	10,8901	18,97	20,21	197,9	19,7256	20,54	21,96
174,3	11,0956	18,95	20,26	198,4	20,1365	20,57	22,06
174,8	11,0956	19,02	20,26	198,9	20,7529	20,85	22,27
175,3	11,3011	19,31	20,57	199,4	20,9584	21,16	22,29
176,2	11,3011	19,72	21,01	199,9	21,1639	21,16	22,71

Continuação da Tabela B.12.

Tempo (h)	Concentração do efluente (ppm)	Temperatura entrada (°C)	Temperatura saída (°C)	Tempo (h)	Concentração do efluente (ppm)	Temperatura entrada (°C)	Temperatura saída (°C)
200,4	21,7803	21,44	22,89	223,6	31,4376	18,79	20,15
200,9	22,1912	21,68	23,02	224,1	31,4376	18,71	19,87
201,6	22,3967	21,98	23,48	224,6	31,4376	18,51	19,82
202,1	22,6022	21,98	23,51	225,1	31,6431	18,35	19,64
202,6	22,8077	22,29	23,71	225,6	32,0540	18,33	19,61
203,1	23,2186	22,42	23,89	226,1	32,4650	18,20	19,74
203,6	23,4241	22,55	24,05	226,8	32,4650	17,61	18,77
204,1	23,4241	22,55	23,92	227,3	32,8759	17,61	18,97
204,6	23,8350	22,65	24,18	227,8	33,4923	17,99	19,43
205,1	24,0405	22,60	24,02	228,3	33,6978	17,97	19,28
205,6	24,2460	22,68	24,07	228,8	33,6978	17,97	19,33
206,1	24,4515	22,78	24,18	229,3	34,1088	17,76	19,49
206,6	24,6569	22,71	24,20	229,8	34,1088	18,20	19,41
207,1	24,8624	22,76	24,18	230,3	32,8759	17,10	18,48
207,6	24,8624	22,78	24,18	230,8	31,2321	17,07	18,46
208,1	25,0679	22,76	24,25	231,3	31,4376	17,20	18,74
208,6	25,4788	22,73	24,20	231,8	31,6431	17,30	18,87
209,1	25,4788	22,71	24,07	232,3	31,4376	17,53	18,95
209,6	25,6843	22,63	23,97	232,8	31,6431	17,58	19,07
210,1	25,6843	22,45	23,89	233,3	31,6431	17,89	19,33
210,6	25,8898	22,37	23,69	233,8	31,6431	18,07	19,72
211,1	26,0953	22,24	23,61	234,3	31,8486	18,38	20,03
211,6	26,3007	22,19	23,45	234,8	32,0540	19,00	20,57
212,1	26,5062	22,01	23,32	235,3	32,0540	19,18	20,98
212,6	26,9172	21,86	23,27	235,8	31,8486	19,49	21,19
213,1	27,1226	21,83	23,20	236,3	31,6431	19,85	21,47
213,6	27,1226	21,70	23,14	236,8	31,4376	19,95	21,65
214,1	27,3281	21,52	22,91	237,3	30,8212	20,08	21,78
214,6	27,7391	21,47	22,71	237,8	30,6157	20,13	21,68
215,1	27,9445	21,44	22,55	238,3	29,9993	20,03	21,73
215,6	27,9445	20,95	22,50	238,8	29,5883	20,08	21,68
216,1	28,1500	20,90	22,37	239,3	29,1774	19,95	21,57
216,6	28,3555	20,82	22,06	239,8	28,9719	19,90	21,52
217,1	28,7664	20,75	21,86	240,3	28,5610	19,72	21,31
217,6	28,9719	20,59	21,73	240,8	28,3555	19,61	21,13
218,1	28,9719	20,41	21,68	241,3	28,1500	19,46	20,98
218,6	29,3829	20,26	21,47	241,8	28,1500	19,31	20,90
219,1	29,3829	20,05	21,37	242,3	27,9445	19,31	20,88
219,6	29,7938	20,10	21,37	242,8	27,9445	19,41	20,77
220,1	29,9993	19,97	21,26	243,3	27,5336	19,23	20,77
220,6	30,2048	19,79	21,13	243,8	28,1500	19,31	20,82
221,1	30,2048	19,72	20,82	244,3	27,9445	19,28	20,67
221,6	30,6157	19,43	20,72	244,8	27,9445	19,18	20,57
222,1	31,2321	19,43	20,72	245,3	27,9445	18,89	20,49
222,6	31,2321	19,23	20,41	245,8	27,7391	18,84	20,36
223,1	31,2321	18,95	20,18	246,3	27,7391	18,69	20,18

Continuação da **Tabela B.12.**

Tempo (h)	Concentração do efluente (ppm)	Temperatura entrada (°C)	Temperatura saída (°C)	Tempo (h)	Concentração do efluente (ppm)	Temperatura entrada (°C)	Temperatura saída (°C)
246,8	27,9445	18,61	20,18	249,8	28,3555	17,99	19,56
247,3	27,7391	18,48	19,95	250,3	28,9719	17,99	19,36
247,8	28,3555	18,38	20,00	250,8	28,9719	17,79	19,46
248,3	27,9445	18,35	19,92	251,3	29,1774	17,76	19,28
248,8	28,3555	18,25	19,67	251,8	29,1774	17,87	19,33
249,3	28,3555	18,15	19,56	252,3	29,1774	17,79	19,20

Tabela B.13: Dados do experimento em leito fixo de carvão ativo - corrida 2.

Tempo (h)	Concentração do efluente (ppm)	Temperatura entrada (°C)	Temperatura saída (°C)	Tempo (h)	Concentração do efluente (ppm)	Temperatura entrada (°C)	Temperatura saída (°C)
0,5	0,0000	15,06	17,02	15,7	0,6164	18,20	19,43
1,0	0,4109	15,35	17,07	16,2	0,8219	18,17	19,46
1,5	0,6164	15,50	17,15	16,7	0,8219	17,99	19,31
2,0	0,6164	15,73	17,58	17,2	0,8219	17,94	19,15
2,5	0,6164	16,14	17,69	17,7	0,8219	17,84	19,23
3,0	0,6164	16,61	18,12	18,2	1,0274	17,69	19,05
3,5	0,6164	17,17	18,87	18,7	1,0274	17,46	18,79
4,0	0,6164	17,56	19,28	19,2	1,0274	17,35	18,61
4,5	0,6164	17,97	19,61	19,7	1,0274	17,22	18,48
5,0	0,6164	18,20	19,67	20,2	1,0274	17,04	18,33
5,5	0,6164	18,35	20,03	20,7	1,0274	16,86	18,23
6,0	0,6164	18,74	20,00	21,2	0,8219	16,79	18,28
6,5	0,6164	18,77	20,10	21,7	0,8219	16,84	18,17
7,0	0,6164	18,92	20,44	22,2	0,8219	16,99	18,23
7,7	0,6164	18,97	20,34	22,7	0,6164	17,15	18,69
8,2	0,6164	18,74	20,08	23,2	0,6164	17,48	18,82
8,7	0,6164	18,77	19,95	23,7	0,6164	17,76	19,25
9,2	0,6164	18,61	19,79	24,2	0,6164	17,99	19,38
9,7	0,6164	18,46	19,54	24,7	0,6164	18,30	19,59
10,2	0,6164	18,48	19,72	25,2	0,6164	18,35	19,90
10,7	0,8219	18,46	19,49	25,7	0,6164	18,61	20,08
11,2	0,8219	18,33	19,56	26,2	0,4109	18,95	20,41
11,7	0,8219	18,20	19,46	26,7	0,4109	19,25	20,67
12,2	0,8219	18,17	19,54	27,2	0,4109	19,43	20,90
12,7	0,8219	18,28	19,54	27,7	0,4109	19,69	21,31
13,2	0,8219	18,30	19,51	28,2	0,4109	20,18	21,68
13,7	0,6164	18,20	19,43	28,7	0,2055	20,46	22,01
14,2	0,8219	18,25	19,54	29,2	0,2055	20,80	22,27
14,7	0,8219	18,17	19,43	29,7	0,0000	21,06	22,47
15,2	0,8219	18,10	19,51	30,1	0,0000	21,08	22,58

Continuação da Tabela B.13.

Tempo (h)	Concentração do efluente (ppm)	Temperatura entrada (°C)	Temperatura saída (°C)	Tempo (h)	Concentração do efluente (ppm)	Temperatura entrada (°C)	Temperatura saída (°C)
30,6	0,0000	21,08	22,65	53,6	0,8219	20,67	22,09
31,1	0,2055	21,01	22,55	54,1	0,8219	20,77	22,27
31,6	0,2055	21,03	22,47	55,0	0,4109	20,77	22,09
32,1	0,4109	20,80	22,22	55,5	0,6164	20,72	22,09
32,6	0,4109	20,54	22,06	56,0	0,6164	20,52	21,86
33,1	0,4109	20,46	21,93	56,5	0,8219	20,36	21,73
33,6	0,4109	20,28	21,80	57,0	0,8219	20,28	21,60
34,1	0,6164	20,23	21,55	57,5	0,8219	19,95	21,08
34,6	0,6164	20,05	21,34	58,0	1,0274	19,95	21,34
35,1	0,6164	19,90	21,37	58,5	1,0274	19,97	21,24
35,6	0,6164	19,90	21,24	59,0	1,2328	19,85	21,34
36,1	0,6164	19,72	21,06	59,5	1,2328	19,85	21,19
36,6	0,8219	19,64	20,95	60,0	1,2328	19,85	21,26
37,1	0,8219	19,56	20,85	60,5	1,2328	19,90	21,19
37,6	0,8219	19,43	20,72	61,0	1,2328	19,61	20,98
38,1	0,8219	19,36	20,70	61,5	1,2328	19,67	21,06
38,6	1,0274	19,07	20,57	62,0	1,4383	19,69	20,95
39,1	1,0274	19,05	20,39	62,5	1,4383	19,43	20,85
39,6	1,0274	18,95	20,15	63,0	1,4383	19,28	20,82
40,1	1,0274	18,82	20,15	63,5	1,4383	19,33	20,77
40,6	1,0274	18,77	20,08	64,0	1,4383	19,41	20,82
41,1	1,0274	18,79	20,08	64,5	1,4383	19,36	20,90
41,6	1,0274	18,64	19,90	65,0	1,6438	19,43	20,93
42,1	1,2328	18,64	20,13	65,5	1,6438	19,61	20,85
42,6	1,2328	18,53	19,95	66,0	1,6438	19,56	21,03
43,1	1,2328	18,46	19,61	66,5	1,6438	19,49	20,88
43,6	1,2328	18,25	19,51	67,0	1,6438	19,36	20,62
44,1	1,2328	18,07	19,43	67,5	1,6438	19,36	20,59
44,6	1,2328	18,05	19,18	68,0	1,6438	19,25	20,70
45,1	1,2328	17,97	19,20	68,5	1,8493	19,15	20,44
45,6	1,2328	18,12	19,33	69,0	1,8493	19,15	20,54
46,1	1,2328	18,17	19,51	69,5	1,8493	19,20	20,70
46,6	1,2328	18,41	19,69	70,0	1,8493	19,28	20,70
47,1	1,2328	18,51	19,69	70,5	1,8493	19,41	20,75
47,6	1,0274	18,56	19,74	71,0	1,8493	19,51	20,93
48,1	1,0274	18,74	19,95	71,5	1,8493	19,77	21,21
48,6	1,0274	18,77	20,21	72,0	1,8493	20,00	21,49
49,1	1,0274	18,82	20,28	72,5	1,6438	20,26	21,78
49,6	0,8219	18,97	20,36	73,0	1,6438	20,41	21,80
50,1	0,8219	19,05	20,46	73,5	1,6438	20,62	22,09
50,6	0,8219	19,23	20,57	74,0	1,6438	20,75	22,19
51,1	0,8219	19,43	20,82	74,5	1,6438	20,90	22,40
51,6	0,8219	19,64	21,11	75,0	1,6438	21,26	22,78
52,1	0,8219	19,85	21,49	75,5	1,6438	21,75	23,25
52,6	0,8219	20,23	21,75	76,0	1,6438	21,93	23,48
53,1	0,8219	20,49	21,96	76,5	1,6438	22,19	23,76

Continuação da Tabela B.13.

Tempo (h)	Concentração do efluente (ppm)	Temperatura entrada (°C)	Temperatura saída (°C)	Tempo (h)	Concentração do efluente (ppm)	Temperatura entrada (°C)	Temperatura saída (°C)
77,3	1,4383	25,46	25,46	101,1	4,5204	22,68	24,54
77,8	0,8219	24,05	26,75	101,6	4,3150	22,81	24,48
78,8	0,6164	21,11	24,66	102,1	4,5204	22,91	24,77
79,3	1,8493	21,55	24,38	102,6	4,5204	22,84	24,59
79,8	1,8493	21,68	24,05	103,1	4,5204	22,78	24,74
80,3	2,0547	21,78	23,87	103,6	4,5204	22,84	24,59
80,8	2,0547	21,70	23,61	104,1	4,5204	22,73	24,36
81,3	2,2602	21,62	23,48	104,6	4,7259	22,53	24,25
81,8	2,2602	21,78	23,27	105,1	4,7259	22,53	24,30
82,3	2,6712	21,60	23,27	105,6	4,9314	22,47	24,10
82,8	2,8766	21,55	23,35	106,1	5,1369	22,40	24,12
83,3	2,8766	21,47	23,20	106,6	5,1369	22,32	24,05
83,8	2,8766	21,47	23,12	107,1	5,1369	22,27	24,02
84,3	3,0821	21,26	22,89	107,6	5,3423	22,35	23,99
84,8	3,0821	21,21	22,81	108,1	5,3423	22,24	24,05
85,3	3,2876	20,95	22,84	108,6	5,5478	22,09	23,66
85,8	3,2876	20,90	22,73	109,1	5,5478	21,93	23,48
86,3	3,2876	21,01	22,78	109,6	5,5478	21,80	23,38
86,8	3,4931	20,75	22,65	110,1	5,5478	21,68	23,20
87,3	3,6985	20,88	22,50	110,6	5,7533	21,44	23,04
87,8	3,6985	20,62	22,40	111,1	5,9588	21,31	22,91
88,3	3,6985	20,57	22,35	111,6	5,9588	21,11	22,65
88,8	3,6985	20,57	22,24	112,1	5,9588	20,72	22,37
89,3	3,9040	20,41	22,04	112,6	6,1642	20,62	22,40
89,8	4,1095	20,26	21,88	113,1	6,3697	20,52	22,04
90,3	4,1095	20,08	21,57	113,6	6,3697	20,26	21,83
90,8	4,1095	19,90	21,52	114,1	6,5752	20,00	21,65
91,3	4,3150	19,74	21,24	114,6	6,7807	19,90	21,44
91,8	4,3150	19,46	21,08	115,1	6,5752	19,74	21,31
92,3	4,3150	19,46	20,93	115,6	6,7807	19,59	21,13
92,8	4,5204	19,20	20,82	116,1	6,9861	19,56	21,01
93,3	4,5204	19,28	20,85	116,6	6,9861	19,41	20,98
93,8	4,5204	19,18	20,82	117,1	7,1916	19,28	20,82
94,3	4,3150	19,41	21,11	117,6	7,1916	19,18	20,75
94,8	4,3150	19,64	21,44	118,1	7,1916	19,31	20,90
95,3	4,3150	19,87	21,75	118,6	7,3971	19,43	21,24
95,8	4,5204	20,18	22,01	119,3	7,6026	19,85	21,62
96,3	4,5204	20,34	22,29	119,8	7,6026	20,13	21,91
96,8	4,5204	20,62	22,45	120,3	7,8080	20,26	22,11
97,3	4,5204	20,90	22,73	120,8	7,8080	20,44	22,29
97,8	4,5204	20,90	22,91	121,3	8,0135	20,72	22,47
98,3	4,5204	21,11	23,17	121,8	8,0135	20,95	22,60
98,8	4,5204	21,42	23,22	122,3	8,0135	20,98	22,91
99,3	4,5204	21,86	23,69	122,8	8,2190	21,29	23,09
99,8	4,5204	22,06	23,92	123,3	8,2190	21,37	23,27
100,6	4,5204	22,47	24,33	123,8	8,4245	21,73	23,69

Continuação da Tabela B.13.

Tempo (h)	Concentração do efluente (ppm)	Temperatura entrada (°C)	Temperatura saída (°C)	Tempo (h)	Concentração do efluente (ppm)	Temperatura entrada (°C)	Temperatura saída (°C)
124,3	8,4245	22,01	23,97	164,9	22,6022	21,06	22,71
124,8	8,6299	22,19	24,05	165,4	23,0131	20,95	22,81
125,3	8,8354	22,29	24,23	165,9	23,2186	21,03	22,91
125,8	8,8354	22,45	24,33	166,4	23,2186	21,24	23,12
126,3	8,8354	22,53	24,43	166,9	23,6296	21,55	23,53
126,8	9,0409	22,60	24,46	167,4	23,8350	21,86	23,74
144,9	14,1777	21,31	23,53	168,3	24,2460	22,24	24,25
145,4	14,1777	21,65	23,43	168,8	24,4515	22,42	24,51
145,9	14,5887	21,65	23,63	169,3	24,6569	22,68	24,64
146,4	14,9996	21,91	23,84	169,8	25,2734	22,84	24,92
146,9	15,2051	22,16	23,94	170,3	25,4788	23,17	24,97
147,4	15,4106	22,29	24,25	170,8	25,6843	23,14	25,18
147,9	15,6161	22,63	24,46	171,3	26,3007	23,45	25,57
148,4	15,8215	22,86	24,59	171,8	26,7117	23,69	25,49
148,9	16,0270	22,96	24,79	172,3	27,1226	23,69	25,72
149,4	16,2325	23,17	24,79	172,8	27,1226	23,94	25,85
149,9	16,4380	23,20	25,03	173,3	27,5336	24,15	26,03
150,4	16,4380	23,22	24,90	174,3	27,7391	24,15	26,01
150,9	16,8489	23,22	25,00	174,8	28,1500	24,28	26,16
151,4	17,0544	23,22	25,03	175,3	28,1500	24,20	26,13
151,9	17,0544	23,17	25,00	175,8	28,5610	24,18	26,16
152,4	17,2599	23,27	24,92	176,3	28,9719	24,15	25,90
152,9	17,4653	23,30	24,92	176,8	28,9719	24,07	25,85
153,4	17,4653	23,32	25,03	177,3	28,9719	23,97	25,77
153,9	17,8763	23,25	24,85	177,8	29,3829	23,84	25,57
154,4	18,0818	23,14	24,90	178,3	29,7938	23,66	25,49
154,9	18,2872	23,14	24,87	178,8	29,7938	23,61	25,28
155,4	18,4927	23,07	24,77	179,3	29,7938	23,48	25,23
155,9	18,6982	22,99	24,74	179,8	30,4102	23,22	25,13
156,4	18,9037	22,84	24,56	180,3	30,4102	23,22	24,92
156,9	18,9037	22,86	24,51	180,8	30,8212	23,09	24,79
157,4	19,3146	22,71	24,38	181,3	31,0267	22,91	24,82
157,9	19,7256	22,50	24,07	181,8	31,2321	22,81	24,54
158,4	19,9310	22,37	24,02	182,3	31,6431	22,71	24,66
158,9	20,1365	22,22	23,92	182,8	31,8486	22,73	24,56
159,4	20,5475	22,14	23,76	183,3	32,0540	22,58	24,51
159,9	20,7529	22,01	23,74	183,8	32,2595	22,50	24,33
160,4	20,9584	21,86	23,61	184,3	32,6704	22,37	24,18
160,9	20,9584	21,83	23,43	184,8	32,8759	22,27	24,05
161,4	21,3694	21,68	23,51	185,3	33,2869	22,19	24,05
161,9	21,5748	21,52	23,32	185,8	33,9033	22,09	24,15
162,4	21,7803	21,52	23,12	186,3	33,9033	22,19	24,10
162,9	21,7803	21,34	22,94	186,8	33,9033	22,09	24,05
163,4	21,7803	21,31	22,89	187,3	34,3142	22,04	24,02
163,9	21,9858	21,21	22,84	187,8	34,3142	21,96	23,97
164,4	22,1912	20,98	22,60	188,3	34,7252	22,01	24,05

Continuação da Tabela B.13.

Tempo (h)	Concentração do efluente (ppm)	Temperatura entrada (°C)	Temperatura saída (°C)	Tempo (h)	Concentração do efluente (ppm)	Temperatura entrada (°C)	Temperatura saída (°C)
188,8	34,7252	21,96	23,99	212,0	40,4785	21,98	24,15
189,3	35,1361	22,06	23,99	212,5	40,4785	22,04	23,99
189,8	35,3416	22,22	24,41	213,0	40,4785	22,09	24,12
190,3	35,7526	22,32	24,64	213,5	40,4785	21,98	24,07
190,8	36,1635	22,47	24,74	214,0	40,6840	22,09	24,25
191,3	36,5745	22,78	24,87	214,5	40,6840	22,11	24,41
191,8	36,7799	22,81	24,97	215,0	40,6840	22,09	24,20
192,3	36,9854	22,96	25,21	215,5	40,4785	22,09	24,36
193,0	37,8073	23,20	25,23	216,0	40,4785	22,24	24,36
193,5	37,8073	23,22	25,31	216,5	40,2730	22,24	24,33
194,0	38,0128	23,20	25,28	217,0	40,2730	22,29	24,38
194,5	38,2183	23,22	25,36	217,5	40,2730	22,40	24,54
195,0	38,4237	23,53	25,57	218,0	40,4785	22,32	24,66
195,5	38,6292	23,56	25,62	218,5	40,2730	22,45	24,56
196,0	38,8347	23,66	25,72	219,0	39,8621	22,22	24,30
196,5	39,0402	23,56	25,75	219,5	39,8621	22,22	24,41
197,0	39,0402	23,58	25,80	220,0	40,0675	22,14	24,33
197,5	39,0402	23,79	25,77	220,5	40,0675	22,27	24,46
198,0	39,4511	23,76	25,80	221,0	39,6566	22,37	24,54
198,5	39,4511	23,76	25,93	221,5	39,6566	22,37	24,64
199,0	39,4511	23,79	25,82	222,0	39,6566	22,35	24,59
199,5	39,4511	23,61	25,67	222,5	39,4511	22,37	24,54
200,0	39,4511	23,53	25,44	223,1	40,6840	22,32	24,46
200,5	39,6566	23,38	25,54	223,6	40,6840	22,16	24,43
201,0	39,4511	23,40	25,46	224,1	40,6840	22,22	24,36
201,5	39,8621	23,35	25,31	224,6	40,8894	22,29	24,48
202,0	39,8621	23,32	25,31	225,1	40,8894	22,27	24,59
202,5	39,6566	23,30	25,13	225,6	40,8894	22,19	24,43
203,0	39,8621	23,25	25,08	226,1	40,6840	22,06	24,36
203,5	40,0675	23,12	25,23	226,6	40,4785	22,04	24,23
204,0	40,0675	23,09	25,05	227,1	40,4785	22,01	24,12
204,5	40,0675	22,94	25,00	227,6	40,6840	21,93	24,28
205,0	40,0675	22,84	24,82	228,1	40,4785	21,93	24,23
205,5	40,0675	22,65	24,69	228,6	40,6840	22,09	24,23
206,0	40,0675	22,50	24,66	229,1	40,2730	21,96	24,25
206,5	40,0675	22,53	24,56	229,6	40,0675	21,78	23,87
207,0	40,2730	22,53	24,66	230,1	40,0675	21,68	23,89
207,5	40,2730	22,47	24,56	230,6	40,2730	21,68	23,99
208,0	40,2730	22,40	24,46	231,1	40,2730	21,68	23,89
208,5	40,2730	22,37	24,33	231,6	40,0675	21,68	23,66
209,0	40,2730	22,22	24,38	232,1	40,0675	21,57	23,66
209,5	40,2730	22,19	24,23	232,6	40,0675	21,52	23,63
210,0	40,0675	21,93	23,89	233,1	39,8621	21,52	23,71
210,5	40,0675	21,86	23,87	233,6	39,8621	21,42	23,40
211,0	40,2730	21,93	24,02	234,1	39,4511	21,24	23,35
211,5	40,2730	21,91	24,20	234,6	39,6566	21,34	23,48

Continuação da **Tabela B.13.**

Tempo (h)	Concentração do efluente (ppm)	Temperatura entrada (°C)	Temperatura saída (°C)	Tempo (h)	Concentração do efluente (ppm)	Temperatura entrada (°C)	Temperatura saída (°C)
235,1	39,6566	21,26	23,51	251,9	40,0675	22,40	24,59
235,6	39,6566	21,29	23,56	252,4	39,8621	22,37	24,48
236,1	39,8621	21,26	23,48	252,9	40,0675	22,37	24,51
236,6	39,8621	21,26	23,48	253,4	40,2730	22,37	24,46
237,1	39,8621	21,26	23,51	253,9	40,2730	22,24	24,36
237,6	39,8621	21,39	23,53	254,4	40,0675	22,04	24,15
238,1	39,8621	21,42	23,53	254,9	39,8621	21,98	24,18
238,6	39,8621	21,44	23,45	255,4	39,8621	21,91	23,99
239,1	39,8621	21,52	23,61	255,9	39,8621	21,93	24,15
239,6	39,8621	21,42	23,74	256,4	40,0675	21,93	24,10
240,1	39,6566	21,52	23,45	256,9	40,0675	21,93	24,28
240,6	39,6566	21,44	23,58	257,4	39,8621	21,91	23,97
241,1	39,2456	21,47	23,48	257,9	39,8621	21,91	24,15
241,6	39,4511	21,44	23,71	258,4	39,8621	21,80	23,99
242,1	39,4511	21,65	23,84	258,9	40,0675	21,80	23,97
242,6	39,2456	21,83	23,89	259,4	40,0675	21,80	23,94
243,1	39,2456	21,91	24,12	259,9	40,0675	21,80	24,05
243,6	39,4511	22,04	24,38	260,4	39,8621	21,88	24,10
244,1	40,2730	22,27	24,46	260,9	39,8621	22,01	24,18
244,6	40,8894	22,32	24,69	261,4	39,8621	22,09	24,33
245,1	40,6840	22,55	24,74	261,9	39,8621	22,11	24,38
245,6	40,6840	22,65	24,95	262,4	40,0675	22,22	24,41
246,1	40,6840	22,71	24,74	262,9	39,8621	22,29	24,48
246,6	40,4785	22,50	24,46	263,4	39,8621	22,37	24,54
247,4	40,4785	22,40	24,56	263,9	39,8621	22,37	24,54
247,9	40,4785	22,42	24,41	264,4	39,8621	22,45	24,48
248,4	40,2730	22,42	24,59	264,9	40,2730	22,42	24,74
248,9	40,2730	22,35	24,64	265,4	40,4785	22,60	24,87
249,4	40,2730	22,45	24,77	265,9	40,6840	22,63	24,87
249,9	40,2730	22,53	24,69	266,4	41,3004	22,76	24,97
250,4	40,2730	22,53	24,72	266,9	40,6840	22,71	24,82
250,9	40,2730	22,37	24,54	267,4	40,4785	22,89	25,00
251,4	40,0675	22,45	24,61	-	-	-	-

Tabela B.14: Dados do experimento em leito fixo de carvão ativo - corrida 3.

Tempo (h)	Concentração do efluente (ppm)	Temperatura entrada (°C)	Temperatura saída (°C)	Tempo (h)	Concentração do efluente (ppm)	Temperatura entrada (°C)	Temperatura saída (°C)
0,5	0,6164	24,85	27,47	4,0	0,2055	25,72	27,84
1,0	0,2055	25,26	27,68	4,5	0,2055	25,85	27,89
1,5	0,2055	25,62	27,99	5,0	0,2055	25,82	28,07
2,0	0,0000	25,85	28,04	5,5	0,4109	25,88	27,91
2,5	0,0000	25,95	27,96	6,0	0,4109	25,85	28,14
3,0	0,2055	25,85	27,96	6,5	0,4109	25,67	28,38
3,5	0,2055	25,90	28,04	7,0	0,4109	25,72	28,25

Continuação da Tabela B.14.

Tempo (h)	Concentração do efluente (ppm)	Temperatura entrada (°C)	Temperatura saída (°C)	Tempo (h)	Concentração do efluente (ppm)	Temperatura entrada (°C)	Temperatura saída (°C)
7,5	0,4109	25,72	28,20	30,7	3,2876	25,95	28,04
8,0	0,6164	25,28	28,22	31,2	3,2876	25,88	27,78
8,5	0,6164	25,57	28,27	31,7	3,4931	25,64	27,73
9,0	0,6164	25,28	28,17	32,2	3,4931	25,54	27,68
9,5	0,8219	25,15	27,84	32,7	3,6985	25,54	27,73
10,0	0,8219	25,15	27,94	33,2	3,9040	25,34	27,47
10,5	0,8219	25,13	27,73	33,7	3,9040	25,26	27,42
11,0	0,8219	25,18	27,71	34,2	3,9040	25,10	27,24
11,5	0,8219	25,44	27,89	34,7	4,1095	25,03	27,01
12,0	1,0274	25,59	27,68	35,2	4,3150	24,92	26,96
12,5	1,0274	25,54	27,55	35,7	4,5204	25,00	27,01
13,0	1,2328	25,44	27,37	36,2	4,5204	24,85	26,75
13,5	1,2328	25,23	27,19	36,7	4,5204	24,79	26,65
14,0	1,4383	25,21	27,45	37,2	4,7259	24,59	26,62
14,5	1,2328	25,18	27,32	37,7	4,9314	24,64	26,65
15,0	1,2328	25,15	27,27	38,2	4,9314	24,64	26,42
15,5	1,4383	25,10	27,19	38,7	4,9314	24,43	26,42
16,0	1,4383	24,59	26,65	39,2	5,3423	24,56	26,34
16,5	1,4383	25,05	26,88	39,7	5,3423	24,54	26,34
17,0	1,6438	25,00	26,73	40,2	5,3423	24,54	26,42
17,5	1,6438	24,72	26,52	40,7	5,5478	24,72	26,47
18,0	1,6438	24,66	26,52	41,2	5,5478	24,54	26,29
18,5	1,6438	24,77	26,57	41,7	5,7533	24,46	26,42
19,0	1,8493	24,56	26,52	42,2	5,7533	24,59	26,01
19,5	2,0547	24,51	26,55	42,7	5,9588	24,72	26,42
20,0	2,0547	24,66	26,52	43,2	5,9588	24,46	26,11
20,5	2,0547	24,95	26,29	43,7	6,1642	24,36	26,13
21,0	2,0547	24,97	26,62	44,2	6,1642	24,20	26,21
21,5	2,0547	24,97	26,91	44,7	6,3697	24,48	26,24
22,0	2,0547	24,95	26,70	45,2	6,5752	24,38	26,55
22,5	2,2602	25,05	26,83	48,3	6,7807	25,15	27,68
23,0	2,2602	25,15	26,98	48,8	6,9861	25,08	27,81
23,5	2,2602	25,21	27,09	49,3	7,1916	25,15	27,96
24,2	2,4657	25,59	27,53	49,8	7,3971	25,46	28,32
24,7	2,4657	25,44	27,53	50,3	7,6026	25,59	28,48
25,2	2,6712	25,59	27,58	50,8	7,6026	25,70	28,58
25,7	2,4657	25,64	27,65	51,3	7,8080	25,88	28,71
26,2	2,6712	25,64	27,68	51,8	8,2190	25,80	28,94
26,7	2,6712	25,67	27,76	52,3	8,6299	26,01	28,87
27,2	2,8766	25,75	27,91	52,8	8,8354	25,95	29,07
27,7	2,8766	25,93	28,20	53,3	9,4518	26,03	29,25
28,2	2,8766	25,82	28,14	53,8	9,8628	26,01	29,15
28,7	3,0821	26,01	28,09	54,3	10,2737	25,98	29,07
29,2	3,0821	25,93	28,20	54,8	10,6847	25,90	29,20
29,7	3,0821	26,03	28,09	55,3	10,8901	25,98	28,97
30,2	3,0821	25,93	28,02	55,8	11,0956	25,85	28,84

Continuação da Tabela B.14.

Tempo (h)	Concentração do efluente (ppm)	Temperatura entrada (°C)	Temperatura saída (°C)	Tempo (h)	Concentração do efluente (ppm)	Temperatura entrada (°C)	Temperatura saída (°C)
56,3	11,3011	25,75	28,71	79,6	22,1912	26,68	30,88
56,8	11,3011	25,88	28,76	80,1	21,7803	26,73	30,83
57,3	11,5066	25,64	28,66	80,6	22,3967	26,62	30,90
57,8	11,7120	25,70	28,66	81,1	21,9858	26,57	30,88
58,3	11,5066	25,70	28,58	81,6	22,8077	26,70	30,88
58,8	11,7120	25,52	28,45	82,1	23,4241	26,83	30,78
59,3	11,7120	25,70	28,40	82,6	23,8350	26,60	30,52
59,8	11,7120	25,64	28,51	83,1	24,0405	26,65	30,67
60,3	11,9175	25,62	28,45	83,6	24,2460	26,52	30,59
60,8	11,9175	25,28	28,14	84,1	25,0679	26,52	30,34
61,3	12,1230	25,52	28,40	84,6	24,8624	26,39	30,34
61,8	12,1230	25,49	28,38	85,1	25,2734	26,47	30,44
62,3	12,1230	25,54	28,38	85,6	25,6843	26,37	30,18
62,8	12,3285	25,36	28,25	86,1	25,6843	26,37	30,21
63,3	12,5339	25,21	28,25	86,6	25,6843	26,26	30,08
63,8	12,5339	25,08	27,99	87,1	26,5062	26,47	30,16
64,3	12,7394	25,23	28,04	87,6	26,3007	26,31	30,16
64,8	12,7394	25,21	27,89	88,1	26,3007	25,95	29,87
65,3	12,9449	25,13	27,81	88,6	26,5062	25,95	29,72
65,8	13,1504	25,23	27,73	89,1	26,7117	25,59	29,43
66,3	13,1504	25,13	27,65	89,6	27,1226	25,59	29,48
66,8	13,5613	25,03	27,68	90,1	27,7391	25,70	29,46
67,3	13,5613	25,10	27,63	90,6	27,5336	25,72	29,41
67,8	13,7668	24,97	27,47	91,1	27,7391	25,46	29,25
68,3	13,9723	24,97	27,55	91,6	27,9445	25,52	29,20
68,8	14,1777	25,03	27,68	92,1	28,3555	25,49	29,20
69,3	14,1777	25,23	27,84	92,6	28,9719	25,88	29,36
69,8	14,3832	25,44	28,02	93,1	28,9719	25,95	29,59
70,3	14,5887	25,44	28,22	93,6	29,3829	26,19	29,82
70,8	14,5887	25,57	28,40	94,1	29,7938	26,21	30,18
71,3	14,7942	24,59	28,14	94,6	30,2048	26,42	30,41
71,8	15,8215	25,03	27,47	95,1	30,6157	26,60	30,75
72,6	16,2325	25,57	28,99	95,6	30,6157	26,03	29,77
73,1	16,2325	25,75	29,38	96,2	32,2595	26,44	31,40
73,6	16,6434	25,88	29,66	96,7	32,8759	26,47	31,89
74,1	17,0544	26,11	29,90	97,2	33,6978	26,57	32,25
74,6	17,2599	26,21	30,21	97,7	34,5197	26,80	32,45
75,1	17,6708	26,26	30,23	98,2	35,3416	26,78	32,51
75,6	17,8763	26,62	30,65	98,7	35,7526	26,86	32,74
76,1	18,2872	26,70	30,72	99,2	36,3690	26,80	32,79
76,6	18,6982	26,57	30,80	99,7	36,7799	27,11	33,18
77,1	19,1091	26,60	31,03	100,2	37,1909	27,11	33,20
77,6	19,5201	26,62	31,03	100,7	37,8073	26,98	33,26
78,1	20,1365	26,70	31,16	101,2	38,2183	27,06	33,46
78,6	20,1365	26,70	31,03	101,7	38,6292	27,29	33,54
79,1	21,1639	26,65	31,03	102,2	38,6292	27,27	33,54

Continuação da Tabela B.14.

Tempo (h)	Concentração do efluente (ppm)	Temperatura entrada (°C)	Temperatura saída (°C)	Tempo (h)	Concentração do efluente (ppm)	Temperatura entrada (°C)	Temperatura saída (°C)
102,7	39,2456	27,16	33,49	126,1	36,3690	25,28	33,98
103,2	39,4511	27,22	33,39	126,6	35,9580	25,13	33,95
103,7	39,2456	27,11	33,39	127,1	35,7526	25,05	33,95
104,2	39,2456	26,96	33,00	127,6	35,7526	24,82	33,62
104,7	39,4511	26,98	33,05	128,1	35,7526	25,21	33,36
105,2	39,4511	26,96	33,05	128,6	35,7526	25,57	33,28
105,7	39,4511	26,91	32,76	129,1	35,7526	25,52	33,23
106,2	39,4511	26,98	32,71	129,6	35,7526	25,49	33,15
106,7	39,6566	26,70	32,66	130,1	35,1361	25,85	32,95
107,2	39,6566	26,70	32,64	130,6	34,9307	25,54	32,95
107,7	39,6566	26,80	32,45	131,1	34,7252	25,64	32,89
108,2	39,6566	26,68	32,27	131,6	34,7252	25,62	33,00
108,7	39,6566	26,83	32,40	132,1	34,3142	25,70	32,71
109,2	39,6566	27,04	32,33	132,6	34,1088	25,49	32,43
109,7	39,8621	26,75	32,14	133,1	34,1088	25,59	32,17
110,2	39,4511	26,55	32,02	133,6	34,1088	25,44	31,86
110,7	39,4511	26,57	31,91	134,1	34,3142	25,46	31,58
111,2	37,6018	26,62	31,83	134,6	34,1088	25,57	31,60
111,7	36,7799	26,60	31,76	135,1	34,1088	25,28	31,47
112,2	36,9854	26,68	31,68	135,6	33,6978	25,21	31,14
112,7	36,7799	26,60	31,60	136,1	33,6978	24,85	30,65
113,2	36,7799	26,42	31,52	136,6	33,4923	24,95	30,13
113,7	36,7799	26,42	31,47	137,1	33,4923	24,87	29,74
114,2	36,9854	26,62	31,47	137,6	33,2869	24,38	29,36
114,7	36,7799	26,73	31,29	138,1	33,0814	24,59	28,84
115,2	36,3690	26,47	31,55	138,6	32,6704	24,30	28,53
115,7	36,3690	26,55	31,58	139,1	32,6704	24,20	28,48
116,2	36,1635	26,75	31,55	139,6	32,8759	24,18	28,48
116,7	35,9580	27,01	31,40	140,1	32,8759	24,15	28,61
117,2	35,7526	26,98	31,58	140,6	32,6704	24,46	28,76
117,7	35,5471	27,16	31,68	141,1	32,6704	23,63	26,86
118,2	34,9307	27,09	31,76	141,6	35,3416	25,05	28,74
118,7	34,9307	26,88	31,89	142,3	32,0540	24,54	29,20
119,2	34,5197	27,37	31,83	142,8	32,0540	24,74	29,43
119,7	34,3142	27,42	31,99	143,3	32,2595	25,18	29,66
120,6	35,5471	26,34	32,38	143,8	32,6704	25,10	29,79
121,1	36,1635	26,44	32,38	144,3	32,6704	25,03	29,77
121,6	36,9854	26,29	32,66	144,8	33,0814	25,00	29,90
122,1	37,8073	24,95	32,95	145,3	33,4923	25,03	30,39
122,6	38,2183	25,23	33,28	145,8	34,1088	25,15	30,26
123,1	38,4237	25,08	33,49	146,3	35,1361	24,97	30,57
123,6	39,0402	25,46	33,88	146,8	35,5471	25,28	30,65
124,1	38,2183	25,36	33,75	147,3	35,7526	25,08	30,26
124,6	37,3964	25,59	33,82	147,8	35,9580	24,92	30,08
125,1	36,5745	25,85	34,06	148,3	35,7526	24,87	29,95
125,6	36,3690	25,93	33,98	148,8	35,7526	25,08	29,82

Continuação da Tabela B.14.

Tempo (h)	Concentração do efluente (ppm)	Temperatura entrada (°C)	Temperatura saída (°C)	Tempo (h)	Concentração do efluente (ppm)	Temperatura entrada (°C)	Temperatura saída (°C)
149,3	35,7526	24,85	29,61	158,3	37,1909	26,44	29,02
149,8	35,7526	24,64	29,33	158,8	37,1909	26,42	28,79
150,3	35,5471	24,54	29,05	159,3	37,1909	26,24	28,66
150,8	35,5471	24,97	29,07	159,8	37,1909	26,37	28,53
151,3	36,3690	26,13	29,48	160,3	36,5745	26,19	28,35
151,8	36,9854	26,55	29,90	160,8	36,5745	26,16	28,14
152,3	36,7799	26,80	29,61	161,3	36,3690	26,13	27,96
152,8	36,5745	26,96	29,61	161,8	36,3690	26,26	28,04
153,3	36,7799	27,06	29,61	162,3	36,1635	26,21	28,20
153,8	36,1635	27,09	29,66	162,8	35,7526	26,16	27,81
154,3	35,9580	27,06	29,64	163,3	35,3416	26,31	27,91
154,8	36,5745	26,68	29,38	163,8	35,1361	26,24	28,02
155,3	36,7799	26,55	29,05	164,3	34,7252	25,49	27,89
155,8	37,1909	26,42	28,99	164,8	33,6978	25,34	27,91
156,3	37,3964	26,39	28,66	165,3	32,8759	22,94	27,47
156,8	37,1909	26,44	28,56	165,8	31,2321	19,87	25,31
157,3	37,3964	26,52	29,02	166,3	31,4376	20,80	23,76
157,8	36,9854	26,49	29,12	166,8	30,8212	24,41	24,79

Tabela B.15: Dados do experimento em leito fixo de carvão ativo - corrida 4.

Tempo (h)	Concentração do efluente (ppm)	Temperatura entrada (°C)	Temperatura saída (°C)	Tempo (h)	Concentração do efluente (ppm)	Temperatura entrada (°C)	Temperatura saída (°C)
0,5	0,8219	21,37	21,08	10,5	1,4383	25,08	26,13
1,0	0,6164	25,49	21,42	11,0	1,4383	25,28	26,37
1,5	0,6164	25,82	22,09	11,5	1,4383	25,31	26,24
2,0	0,4109	27,96	24,18	12,0	1,4383	25,39	26,24
2,5	0,4109	30,39	25,77	12,5	1,6438	25,26	26,31
3,0	0,2055	31,11	26,24	13,0	1,6438	25,46	26,24
3,5	0,0000	31,37	26,73	13,5	1,8493	25,28	26,31
4,0	0,2055	31,63	26,86	14,0	1,8493	25,23	26,03
4,5	0,6164	26,11	26,55	14,5	1,8493	25,15	26,24
5,0	0,6164	25,90	26,57	15,0	2,0547	25,13	26,11
5,5	0,6164	25,57	26,88	15,5	1,8493	25,31	26,21
6,0	0,6164	25,39	26,60	16,0	2,0547	25,08	26,29
6,5	0,8219	25,28	26,55	16,5	2,0547	25,36	26,31
7,0	1,0274	25,34	26,60	17,0	2,0547	25,49	26,26
7,5	1,0274	25,23	26,70	17,5	2,2602	25,31	26,11
8,0	1,0274	25,13	26,62	18,0	2,2602	25,49	26,21
8,5	1,0274	25,31	26,70	18,5	2,2602	25,41	26,29
9,0	1,2328	25,10	26,55	19,0	2,2602	25,23	26,31
9,5	1,2328	25,44	26,47	19,5	2,2602	25,28	26,26
10,0	1,4383	25,21	26,37	20,0	2,4657	25,23	26,24

Continuação da Tabela B.15.

Tempo (h)	Concentração do efluente (ppm)	Temperatura entrada (°C)	Temperatura saída (°C)	Tempo (h)	Concentração do efluente (ppm)	Temperatura entrada (°C)	Temperatura saída (°C)
20,5	2,4657	25,21	26,19	49,0	7,3971	25,21	26,93
21,0	2,4657	25,31	26,11	49,5	7,6026	25,39	27,37
21,5	2,6712	25,46	26,26	50,0	7,6026	25,46	27,63
22,0	2,6712	25,39	26,29	50,5	7,8080	25,54	27,68
22,5	2,8766	25,31	26,24	51,0	8,0135	25,72	27,73
23,0	2,8766	25,46	26,34	51,5	8,2190	25,75	27,81
23,5	2,8766	25,49	26,42	52,0	8,4245	25,34	28,04
24,0	2,8766	25,54	26,42	52,5	8,8354	25,23	28,20
24,5	2,8766	25,67	26,80	53,0	9,0409	24,85	28,17
25,0	2,8766	25,80	26,83	53,5	9,2464	25,18	28,12
25,5	2,8766	25,67	26,93	54,0	9,6573	25,08	28,02
26,0	2,8766	25,57	26,86	54,5	10,0683	25,08	28,07
26,5	3,0821	25,67	26,83	55,0	10,2737	25,18	28,02
27,0	3,2876	25,64	26,96	55,5	10,4792	25,00	27,94
27,5	3,2876	25,39	26,93	56,0	10,4792	25,05	27,91
28,1	3,6985	25,13	26,83	56,5	10,6847	25,05	27,78
28,6	3,6985	24,97	26,96	57,0	11,0956	25,05	27,68
29,1	3,6985	25,05	27,09	57,6	11,5066	24,79	27,47
29,6	3,6985	25,03	27,19	58,1	11,3011	24,82	27,19
30,1	3,6985	25,00	27,16	58,6	11,5066	25,28	26,88
30,6	3,9040	25,13	27,01	59,1	11,5066	25,23	26,52
31,1	3,9040	25,44	27,11	59,6	11,7120	25,00	26,37
31,6	4,1095	25,54	27,01	60,1	11,7120	25,00	26,11
32,1	4,1095	25,54	26,98	60,6	11,9175	24,82	25,88
32,6	4,3150	25,44	27,14	61,1	12,1230	24,79	25,75
33,1	4,3150	25,41	27,16	61,6	12,3285	24,72	25,46
33,6	4,3150	25,36	27,11	62,1	12,5339	24,61	25,49
34,1	4,5204	25,34	27,19	62,6	12,5339	24,54	25,15
34,6	4,7259	25,49	27,06	63,1	12,9449	24,33	25,05
35,1	4,7259	25,39	26,70	63,6	12,9449	24,20	24,51
35,6	4,9314	25,13	26,47	64,1	13,1504	24,18	24,74
36,1	5,1369	25,05	26,16	64,6	13,3558	24,12	24,23
36,6	5,1369	25,21	26,29	65,1	13,5613	23,99	24,10
37,1	5,1369	24,82	26,08	65,6	13,7668	23,94	24,05
37,6	5,1369	24,90	26,13	66,1	13,9723	23,79	23,94
38,1	5,3423	24,59	26,24	66,6	14,1777	23,66	23,45
38,6	5,5478	24,74	26,29	67,1	14,5887	23,56	23,07
44,5	6,5752	24,85	26,08	67,6	14,5887	23,35	23,07
45,0	6,5752	24,64	25,70	68,1	14,9996	23,32	23,09
45,5	6,5752	25,13	25,88	68,6	17,2599	23,35	22,99
46,0	6,5752	25,26	25,85	69,1	16,2325	24,25	22,89
46,5	6,7807	25,36	25,88	69,6	16,2325	24,97	23,12
47,0	6,9861	25,08	25,90	70,1	16,2325	24,97	23,20
47,5	7,1916	25,15	26,11	70,6	16,6434	25,00	22,91
48,0	7,1916	25,08	26,31	71,1	17,0544	25,05	23,14
48,5	7,3971	25,21	26,49	71,6	17,2599	25,15	23,35

Continuação da Tabela B.15.

Tempo (h)	Concentração do efluente (ppm)	Temperatura entrada (°C)	Temperatura saída (°C)	Tempo (h)	Concentração do efluente (ppm)	Temperatura entrada (°C)	Temperatura saída (°C)
72,1	17,6708	25,28	23,76	95,2	40,0675	25,15	27,78
72,6	18,9037	25,44	23,92	95,7	40,4785	25,21	27,68
73,1	17,6708	25,52	24,25	96,2	41,0949	25,15	27,65
73,6	17,8763	25,49	25,10	96,7	41,3004	25,05	27,55
74,1	18,2872	25,36	25,46	97,2	41,7113	25,15	27,55
74,6	18,9037	24,87	25,85	97,7	42,1223	25,23	27,53
75,1	19,1091	25,08	26,11	98,2	42,7387	25,15	27,42
75,6	19,7256	25,18	26,44	98,7	42,9442	25,18	27,45
76,1	20,1365	25,39	26,57	99,2	42,9442	25,15	27,40
76,6	20,3420	25,54	26,70	99,7	43,3551	25,15	27,37
77,1	20,7529	25,46	26,80	100,2	43,5606	25,15	27,40
77,6	21,3694	25,34	26,93	100,7	43,9715	25,05	27,32
78,1	22,1912	25,44	26,93	101,2	43,9715	24,97	27,40
78,6	22,6022	25,31	27,01	101,7	43,9715	24,92	27,24
79,1	23,4241	25,44	27,04	102,2	44,1770	24,95	27,14
79,6	23,8350	25,26	27,16	102,7	44,3825	24,87	27,14
80,1	24,4515	25,28	27,14	103,2	44,5880	24,79	27,01
80,6	25,0679	25,18	27,04	103,7	44,5880	24,74	26,91
81,1	25,6843	25,03	26,88	104,2	44,5880	24,82	26,78
81,6	26,5062	24,95	26,70	104,7	44,7934	24,64	26,80
82,1	26,9172	25,03	26,55	105,2	44,7934	24,64	26,52
82,6	27,5336	24,85	26,21	105,7	44,7934	24,59	26,62
83,1	28,3555	24,69	26,06	106,2	44,7934	24,59	26,60
83,6	28,7664	24,72	25,82	106,7	44,7934	24,74	26,65
84,1	29,5883	24,64	25,88	107,2	44,7934	24,87	26,83
84,6	28,1500	24,38	25,85	107,7	44,7934	25,03	27,24
85,1	28,5610	24,41	25,59	108,2	44,5880	25,21	27,40
85,6	28,9719	24,43	25,41	108,7	44,3825	25,36	27,58
86,1	29,3829	24,82	25,85	109,2	44,3825	25,52	27,71
86,6	29,7938	24,87	25,85	109,7	44,3825	25,70	27,91
87,1	29,7938	25,26	26,62	110,2	43,7661	25,82	27,94
87,6	30,2048	25,21	26,96	110,7	43,5606	25,95	28,22
88,1	30,6157	25,64	27,09	111,6	43,1496	26,08	28,40
88,6	30,6157	25,75	27,53	112,1	42,9442	26,03	28,66
89,1	31,0267	25,98	27,78	112,6	41,9168	26,24	28,89
89,6	31,2321	25,52	28,12	113,1	41,9168	26,31	29,02
90,2	31,6431	25,36	28,17	113,6	42,3278	25,72	29,10
90,7	31,8486	25,44	28,38	114,1	42,3278	25,80	29,23
91,2	32,6704	25,67	28,51	114,6	42,5332	25,95	29,41
91,7	34,1088	25,28	28,74	115,1	42,5332	25,98	29,54
92,2	35,5471	25,26	28,53	115,6	42,5332	26,06	29,69
92,7	36,7799	25,18	28,58	116,1	42,7387	26,16	29,79
93,2	37,3964	25,59	28,43	116,6	42,5332	26,19	29,72
93,7	38,2183	25,36	28,07	117,1	42,3278	26,26	29,85
94,2	39,0402	25,26	27,84	117,6	42,5332	26,13	29,72
94,7	39,4511	25,18	27,78	118,1	42,5332	26,34	29,77

Continuação da Tabela B.15.

Tempo (h)	Concentração do efluente (ppm)	Temperatura entrada (°C)	Temperatura saída (°C)	Tempo (h)	Concentração do efluente (ppm)	Temperatura entrada (°C)	Temperatura saída (°C)
118,6	42,3278	26,24	29,87	145,2	43,7661	26,01	31,42
119,1	42,3278	26,11	29,82	145,7	43,5606	25,72	31,11
119,6	41,9168	26,11	29,66	146,2	42,9442	25,93	31,24
120,1	41,9168	26,06	29,79	146,7	43,1496	25,88	31,11
120,6	41,9168	25,98	29,69	147,2	43,3551	26,03	31,32
121,1	41,7113	26,11	29,69	147,7	42,9442	25,90	31,14
121,6	41,7113	26,13	29,66	148,2	42,3278	26,03	30,52
122,1	41,5059	26,13	29,59	148,7	42,1223	25,52	30,05
122,6	41,5059	26,06	29,48	149,2	42,3278	25,28	29,33
123,1	41,0949	26,08	29,64	149,7	42,1223	25,54	28,97
123,6	41,0949	25,85	29,51	150,2	42,1223	25,75	28,56
124,1	40,8894	25,93	29,41	150,7	41,9168	25,72	28,35
124,6	40,8894	25,85	29,20	151,2	42,5332	25,41	28,14
125,1	40,8894	25,93	29,10	151,7	41,7113	25,28	27,91
125,6	40,8894	25,82	29,10	152,2	41,7113	25,03	27,63
126,1	41,5059	25,64	28,92	152,7	41,3004	25,00	27,68
126,6	40,6840	25,70	28,99	153,2	41,0949	25,03	27,40
127,1	40,6840	25,57	28,79	153,7	41,0949	25,03	27,55
127,6	40,6840	25,44	28,81	154,2	40,8894	24,95	27,11
128,1	40,4785	25,41	28,81	154,7	40,6840	24,87	27,47
128,6	40,4785	25,39	28,76	155,2	40,2730	24,97	27,60
129,1	40,4785	25,34	28,43	155,7	39,4511	25,13	27,06
133,2	40,2730	25,44	28,66	156,2	39,4511	24,79	26,88
133,7	40,0675	25,34	28,38	156,7	39,0402	24,74	26,62
134,2	40,6840	25,44	28,56	157,2	39,0402	24,72	26,34
134,7	43,9715	25,70	28,74	157,7	39,0402	24,79	26,11
135,2	44,7934	24,38	29,12	158,2	38,8347	24,59	26,42
135,7	45,2044	24,72	29,12	158,7	38,2183	24,46	26,47
136,2	45,4099	25,67	30,34	159,2	39,0402	24,18	26,24
136,7	44,9989	25,82	30,65	159,7	38,8347	24,54	26,37
137,2	44,3825	25,98	30,80	160,2	38,4237	24,61	26,88
137,7	43,7661	26,13	30,93	160,7	38,0128	24,74	27,14
138,2	44,1770	26,19	31,11	161,2	37,8073	24,56	27,29
138,7	44,1770	26,31	31,45	161,7	37,3964	24,77	27,35
139,2	44,5880	26,52	31,45	162,2	36,9854	24,56	27,24
139,7	44,3825	27,04	31,55	162,7	36,7799	24,59	27,14
140,2	44,3825	26,96	31,42	163,2	36,1635	24,64	27,40
140,7	44,1770	26,88	31,58	163,7	35,9580	24,59	27,53
141,2	44,5880	26,60	31,40	164,2	35,7526	24,66	27,50
141,7	43,7661	26,47	31,42	164,7	35,3416	24,77	27,68
142,2	43,7661	25,85	31,50	165,2	35,3416	24,97	27,42
142,7	43,7661	25,70	31,24	165,7	34,7252	24,82	27,53
143,2	42,9442	26,06	31,32	181,4	40,4785	24,66	26,96
143,7	42,9442	25,72	31,29	181,9	42,5332	24,64	26,96
144,2	43,3551	25,82	31,37	182,4	44,1770	24,64	26,91
144,7	43,7661	25,77	31,47	182,9	44,9989	24,64	26,98

Continuação da Tabela B.15.

Tempo (h)	Concentração do efluente (ppm)	Temperatura entrada (°C)	Temperatura saída (°C)	Tempo (h)	Concentração do efluente (ppm)	Temperatura entrada (°C)	Temperatura saída (°C)
183,4	45,4099	24,61	27,27	206,4	41,7113	25,80	28,81
183,9	45,4099	24,61	27,11	206,9	41,3004	25,88	28,92
184,4	45,6153	24,61	27,16	207,4	41,3004	26,08	28,89
184,9	45,8208	24,51	27,24	207,9	41,3004	26,13	28,84
185,4	46,4372	24,74	26,93	208,4	40,8894	25,98	28,97
185,9	46,8482	24,69	27,11	208,9	41,0949	26,24	28,99
186,4	46,8482	24,23	27,16	209,4	40,8894	26,26	28,84
186,9	46,6427	24,85	27,11	209,9	41,9168	26,19	29,02
187,4	46,4372	24,82	26,98	210,4	41,3004	26,11	29,02
187,9	46,4372	26,62	26,21	210,9	41,3004	26,01	28,84
188,4	46,8482	27,53	24,90	211,4	41,3004	26,01	28,87
188,9	46,6427	28,02	25,03	211,9	41,0949	26,01	28,84
189,4	46,4372	28,99	25,13	212,4	40,8894	26,11	28,79
189,9	46,6427	29,69	25,05	212,9	40,8894	26,31	28,66
190,4	46,6427	29,54	24,90	213,4	40,6840	26,13	28,84
190,9	46,8482	29,48	25,15	213,9	40,6840	26,24	28,84
191,4	46,4372	29,54	25,15	214,4	40,8894	26,26	28,35
191,9	46,6427	29,66	25,10	214,9	41,3004	26,16	28,30
192,4	46,6427	30,00	24,66	215,4	41,3004	25,88	28,58
192,9	46,6427	29,20	24,97	215,9	40,6840	25,93	28,69
193,4	46,6427	29,48	25,15	216,4	42,3278	26,19	28,74
193,9	46,8482	29,20	25,15	216,9	41,3004	26,21	28,81
194,4	47,0537	28,97	25,28	217,4	41,3004	26,21	28,66
194,9	47,2591	29,72	25,31	217,9	41,3004	25,18	28,51
195,4	46,6427	29,25	25,28	218,4	41,3004	24,90	28,48
195,9	46,8482	29,56	25,46	218,9	41,7113	24,85	28,56
196,4	46,6427	28,71	25,31	219,4	41,7113	24,79	28,45
196,9	46,4372	23,94	27,71	219,9	41,5059	24,97	28,48
197,4	46,0263	24,36	27,76	220,4	41,5059	24,90	28,45
197,9	45,8208	24,69	27,47	220,9	41,3004	24,97	28,56
198,4	45,8208	25,23	28,07	221,4	40,8894	25,26	28,17
198,9	45,4099	25,67	28,14	221,9	40,8894	24,82	27,55
199,4	45,6153	25,67	28,22	222,4	40,8894	25,03	27,53
199,9	45,4099	24,41	28,09	222,9	40,6840	25,00	27,42
200,4	45,2044	24,15	28,38	223,4	40,6840	25,13	27,27
200,9	44,9989	24,61	28,38	223,9	40,6840	24,92	26,73
201,4	44,5880	24,87	28,84	224,4	40,6840	25,03	26,88
201,9	44,7934	24,90	29,10	224,9	40,6840	23,76	26,21
202,4	43,5606	24,97	29,25	225,4	40,2730	23,84	26,47
202,9	44,1770	25,00	29,28	225,9	40,2730	24,28	26,70
203,4	44,3825	25,03	29,02	226,4	40,0675	24,74	26,42
203,9	43,7661	24,92	29,12	226,9	39,8621	24,82	26,55
204,4	43,5606	25,39	29,18	227,4	39,6566	24,92	26,55
204,9	43,1496	25,57	29,10	227,9	39,2456	25,05	26,68
205,4	42,5332	25,62	28,99	228,4	39,2456	25,13	26,86
205,9	42,1223	25,70	28,79	228,9	39,2456	25,18	26,91

Continuação da **Tabela B.15.**

Tempo (h)	Concentração do efluente (ppm)	Temperatura entrada (°C)	Temperatura saída (°C)	Tempo (h)	Concentração do efluente (ppm)	Temperatura entrada (°C)	Temperatura saída (°C)
229,4	39,2456	25,23	27,11	244,4	36,7799	25,39	26,49
229,9	39,4511	25,08	26,91	244,9	36,5745	25,21	26,60
230,4	38,4237	25,70	26,96	245,4	35,3416	25,44	26,75
230,9	38,4237	25,67	26,98	245,9	35,3416	25,64	27,29
231,4	38,2183	25,64	26,83	246,4	35,5471	25,15	27,53
231,9	38,2183	25,52	26,83	246,9	35,7526	25,41	27,81
232,4	37,8073	25,46	26,75	247,4	35,5471	25,13	28,12
232,9	37,8073	25,44	26,73	247,9	35,7526	25,15	28,14
233,4	37,8073	25,46	26,62	248,4	35,7526	25,46	28,35
233,9	37,8073	25,28	26,57	248,9	35,7526	25,49	28,45
234,4	37,1909	25,21	26,19	249,4	35,3416	25,44	28,51
234,9	37,1909	25,23	26,26	249,9	35,3416	25,59	28,63
235,4	36,9854	25,13	26,08	250,4	35,1361	25,44	28,53
235,9	36,7799	24,90	25,98	250,9	35,7526	25,21	28,63
236,4	36,9854	24,90	25,80	251,4	37,3964	25,21	28,58
236,9	37,3964	24,79	25,85	251,9	37,6018	25,21	28,32
237,4	37,8073	24,87	25,72	252,4	37,8073	25,44	28,32
237,9	37,3964	24,87	25,72	252,9	38,0128	25,41	28,25
238,4	37,3964	24,64	25,52	253,4	38,4237	25,34	28,14
238,9	37,3964	24,90	25,39	253,9	38,2183	25,28	27,94
239,4	37,1909	24,77	25,34	254,4	38,4237	25,28	27,81
239,9	37,1909	24,72	25,36	254,9	38,2183	25,10	27,68
240,4	37,1909	24,69	25,21	255,4	38,2183	25,26	27,73
240,9	36,9854	24,69	25,26	255,9	38,0128	25,10	27,58
241,4	37,3964	24,82	25,34	256,4	38,0128	25,13	27,50
241,9	37,1909	25,03	25,57	256,9	37,8073	25,05	27,42
242,4	36,9854	25,82	25,88	257,4	36,9854	24,87	27,45
242,9	37,1909	25,34	26,03	257,9	36,9854	25,05	27,47
243,4	36,7799	25,28	26,16	258,4	36,9854	24,87	27,40
243,9	36,7799	25,34	26,21	258,9	36,7799	24,97	27,24

Tabela B.16: Dados do experimento em leito fixo de carvão ativo - corrida 5.

Tempo (h)	Concentração do efluente (ppm)	Temperatura entrada (°C)	Temperatura saída (°C)	Tempo (h)	Concentração do efluente (ppm)	Temperatura entrada (°C)	Temperatura saída (°C)
0,5	1,4383	24,43	25,00	5,8	0,6164	25,70	26,93
1,0	0,2055	26,06	25,88	6,3	0,4109	25,70	27,04
1,5	0,0000	26,29	26,19	6,8	0,6164	25,72	27,04
2,0	0,0000	26,13	26,55	7,3	0,6164	25,67	27,11
2,5	0,2055	26,42	26,88	7,8	0,6164	25,49	26,93
3,0	0,4109	25,98	27,16	8,3	0,6164	25,36	26,98
3,5	0,0000	26,16	27,01	8,8	0,8219	25,31	26,62
4,0	0,2055	29,77	25,85	9,3	0,8219	25,28	26,60
4,5	0,2055	30,16	25,57	9,8	0,8219	24,90	26,42
5,3	0,4109	25,75	27,09	10,3	0,8219	25,05	26,37

Continuação da Tabela B.16.

Tempo (h)	Concentração do efluente (ppm)	Temperatura entrada (°C)	Temperatura saída (°C)	Tempo (h)	Concentração do efluente (ppm)	Temperatura entrada (°C)	Temperatura saída (°C)
10,8	0,8219	25,00	26,49	33,8	5,9588	25,57	28,20
11,3	1,0274	25,08	26,42	34,3	5,9588	25,44	28,17
11,8	1,0274	24,90	26,37	34,8	6,3697	25,52	28,09
12,3	1,2328	24,79	26,13	35,3	6,3697	25,70	27,91
12,8	1,2328	24,46	26,06	35,8	6,3697	25,70	27,89
13,3	1,2328	24,59	25,95	36,3	6,3697	25,26	27,73
13,8	1,4383	24,59	25,72	36,8	6,5752	25,26	27,40
14,3	1,4383	24,33	25,57	37,3	6,5752	25,05	27,42
14,8	1,6438	24,07	25,52	37,8	6,3697	24,95	27,29
15,3	1,6438	23,97	25,39	38,3	6,5752	24,79	27,04
15,8	1,6438	24,05	25,28	38,8	6,5752	24,77	26,96
16,3	1,4383	23,94	25,15	39,3	6,7807	24,82	26,86
16,8	1,6438	23,92	24,87	39,8	6,9861	24,66	26,75
17,3	1,6438	23,69	24,92	40,3	7,1916	24,51	26,60
17,8	1,6438	23,71	24,90	40,8	7,3971	24,41	26,42
18,3	1,8493	23,66	24,90	41,3	7,3971	24,25	26,26
18,8	1,8493	23,87	24,72	41,8	7,6026	24,23	26,44
19,3	2,2602	24,02	24,95	42,3	7,8080	24,51	26,42
19,8	2,2602	23,56	24,43	42,8	7,8080	24,69	26,75
20,3	2,2602	24,23	24,95	43,3	7,8080	24,97	27,01
20,8	2,2602	24,74	25,41	43,8	8,0135	25,08	27,37
21,3	2,2602	25,08	25,82	44,3	8,2190	25,46	27,65
21,8	2,4657	25,28	26,21	44,8	8,4245	25,72	27,89
22,3	2,4657	25,34	26,19	45,3	8,6299	25,95	28,27
22,8	2,4657	25,57	26,68	45,8	8,8354	26,13	28,51
23,3	2,4657	25,70	27,06	46,3	9,0409	26,37	28,79
23,8	2,6712	25,64	27,45	46,8	9,2464	26,49	29,05
24,3	2,8766	25,44	27,65	47,3	9,4518	26,91	29,41
24,8	2,8766	25,72	27,81	47,8	9,4518	26,96	29,72
25,3	2,8766	25,93	28,09	48,3	9,6573	27,14	30,13
25,8	2,8766	26,16	28,40	48,8	9,6573	27,35	30,05
26,3	2,8766	26,13	28,66	49,3	9,8628	27,35	30,21
26,8	2,8766	26,55	29,02	49,8	10,0683	27,40	30,72
27,3	2,8766	26,37	28,92	50,3	10,2737	27,19	30,67
27,8	2,8766	26,65	29,07	50,8	10,6847	27,29	30,85
28,3	3,0821	26,57	29,36	51,3	10,4792	27,53	31,16
28,8	3,0821	26,70	29,38	51,8	11,0956	26,68	31,09
29,3	3,2876	26,75	29,38	52,3	11,3011	26,80	31,21
29,8	3,2876	26,83	29,33	52,8	11,7120	26,65	31,16
30,3	4,3150	26,70	29,54	53,5	11,7120	26,70	31,14
30,8	4,5204	26,44	29,28	54,0	12,1230	26,65	31,01
31,3	4,9314	26,44	29,20	54,5	12,3285	26,42	30,72
31,8	5,1369	26,21	28,87	55,0	12,5339	26,26	30,70
32,3	5,5478	26,08	28,71	55,5	12,9449	26,26	30,39
32,8	5,7533	25,85	28,48	56,0	13,3558	25,90	30,13
33,3	5,9588	25,70	28,38	56,5	13,3558	25,54	30,08

Continuação da Tabela B.16.

Tempo (h)	Concentração do efluente (ppm)	Temperatura entrada (°C)	Temperatura saída (°C)	Tempo (h)	Concentração do efluente (ppm)	Temperatura entrada (°C)	Temperatura saída (°C)
57,0	13,7668	25,57	29,85	80,0	25,6843	24,85	31,24
57,5	13,9723	25,57	29,90	80,5	25,8898	24,66	30,85
58,0	14,3832	25,57	29,64	81,0	26,5062	24,59	30,75
58,5	14,5887	25,54	29,66	81,5	26,5062	24,33	30,34
59,0	14,7942	25,44	29,85	82,0	26,7117	24,30	29,97
59,5	14,9996	25,41	29,61	82,5	27,1226	24,25	29,79
60,0	15,2051	25,39	29,36	83,0	27,3281	23,76	29,64
60,5	15,6161	25,49	29,46	83,5	27,7391	23,71	29,72
61,0	15,6161	24,20	29,41	84,0	28,1500	23,94	29,72
61,5	15,8215	23,61	29,38	84,5	28,5610	24,05	29,95
62,0	16,2325	23,79	29,20	85,0	28,5610	23,97	30,28
62,5	16,4380	23,40	29,02	85,5	28,7664	23,81	30,13
63,0	16,8489	23,48	29,07	86,0	28,5610	23,94	29,79
63,5	16,6434	23,66	28,92	86,5	28,9719	23,58	29,56
64,0	17,0544	23,74	28,92	87,0	29,1774	23,66	29,36
64,5	17,4653	23,48	28,87	87,5	29,3829	23,61	29,54
65,0	17,6708	23,38	28,66	88,0	29,5883	23,53	29,61
65,5	17,6708	23,32	28,58	88,5	29,7938	23,51	29,74
66,0	17,8763	23,35	28,79	89,0	29,9993	23,69	29,43
66,5	18,0818	23,69	29,07	89,5	29,9993	23,74	29,30
67,0	18,2872	24,10	29,20	90,0	30,4102	23,58	29,02
67,5	18,4927	24,48	29,56	90,5	30,4102	23,40	28,94
68,0	18,6982	24,43	29,46	91,0	30,6157	23,48	29,12
68,5	19,1091	24,20	29,61	91,5	31,2321	23,53	28,92
69,0	19,9310	24,12	29,79	92,1	32,8759	23,20	28,69
69,5	20,3420	24,10	30,08	92,6	33,2869	23,07	28,81
70,0	20,7529	24,05	30,18	93,1	33,6978	23,02	28,89
70,5	20,9584	24,61	30,47	93,6	34,3142	23,07	28,71
71,0	20,7529	24,41	30,80	94,1	34,7252	23,02	28,76
71,5	21,3694	24,64	30,90	94,6	35,1361	23,35	29,07
72,0	21,5748	24,30	31,19	95,1	35,5471	23,07	28,94
72,5	21,7803	24,64	31,29	95,6	35,7526	23,40	29,43
73,0	21,9858	24,85	31,40	96,1	36,1635	23,38	29,33
73,5	22,3967	24,79	31,60	96,6	36,5745	23,45	29,77
74,0	22,8077	24,92	31,68	97,1	36,7799	23,79	29,74
74,5	23,0131	25,23	31,76	97,6	37,1909	23,56	29,77
75,0	23,4241	24,97	31,78	98,1	37,3964	23,69	30,00
75,5	23,6296	25,26	31,63	98,6	37,8073	23,66	30,13
76,0	23,8350	25,13	31,89	99,1	37,8073	23,69	30,08
76,5	24,2460	25,28	31,86	99,6	38,2183	24,20	30,39
77,0	24,4515	25,15	31,76	100,1	38,6292	24,46	30,47
77,5	24,4515	25,03	31,86	100,6	38,6292	24,59	30,03
78,0	25,0679	25,13	32,27	101,1	38,8347	24,38	30,21
78,5	25,2734	25,03	31,86	101,6	38,8347	23,81	30,05
79,0	25,4788	24,66	31,50	102,1	39,4511	23,51	29,79
79,5	25,4788	24,92	31,32	102,6	40,0675	23,35	29,48

Continuação da Tabela B.16.

Tempo (h)	Concentração do efluente (ppm)	Temperatura entrada (°C)	Temperatura saída (°C)	Tempo (h)	Concentração do efluente (ppm)	Temperatura entrada (°C)	Temperatura saída (°C)
103,1	40,4785	23,25	29,48	126,2	48,2865	26,01	31,01
103,6	40,6840	23,22	29,48	126,7	47,6701	25,80	30,39
104,1	41,3004	23,48	29,66	127,2	47,6701	25,82	30,39
104,6	41,5059	23,32	29,33	127,7	47,4646	25,75	30,34
105,1	42,1223	23,17	29,12	128,2	47,2591	25,67	30,21
105,6	42,3278	23,14	29,18	128,7	46,8482	25,72	30,23
106,1	42,5332	23,07	29,07	129,2	46,8482	25,54	29,97
106,6	42,9442	22,89	29,07	129,7	46,6427	25,10	29,95
107,1	42,9442	22,78	28,84	130,2	46,8482	24,77	30,26
107,6	43,1496	22,73	28,87	130,7	46,6427	24,48	29,95
108,1	43,3551	22,81	28,79	131,2	46,4372	24,18	29,95
108,6	43,5606	22,78	28,69	131,7	46,6427	24,23	29,92
109,1	43,7661	22,63	28,56	132,2	46,6427	24,25	30,03
109,6	43,9715	22,60	28,48	132,7	46,6427	24,46	29,69
110,1	44,3825	22,65	28,48	133,2	46,6427	24,28	29,51
110,6	44,3825	22,63	28,35	133,7	46,2318	23,92	29,64
111,1	44,7934	22,40	28,32	139,1	46,2318	22,86	28,20
111,6	44,9989	22,40	28,32	139,6	47,2591	23,63	29,30
112,1	44,9989	22,58	27,94	140,1	47,8756	24,51	30,03
112,6	44,9989	22,32	27,91	140,6	48,2865	24,59	30,18
113,1	44,7934	22,37	28,17	141,1	48,2865	24,46	30,31
113,6	45,4099	22,53	28,22	141,6	48,9029	24,61	30,62
114,1	45,4099	22,50	28,17	142,1	48,9029	24,77	30,88
114,6	45,2044	22,45	28,12	142,6	49,5194	24,79	30,88
115,1	45,6153	22,63	28,48	143,1	49,7248	24,69	31,09
115,6	45,2044	22,96	28,79	143,6	50,3413	24,95	31,27
116,1	45,6153	23,09	28,99	144,1	49,9303	24,85	31,58
116,7	46,4372	23,22	29,20	144,6	50,3413	24,92	31,55
117,2	46,6427	23,38	29,36	145,1	50,3413	24,92	31,68
117,7	46,8482	23,45	29,30	145,6	50,5467	25,15	31,89
118,2	47,2591	23,56	29,61	146,1	51,1632	25,64	32,09
118,7	47,2591	23,35	29,87	146,6	50,7522	26,03	32,12
119,2	47,4646	24,07	30,21	147,1	51,1632	26,03	32,12
119,7	47,6701	24,18	30,34	147,6	50,9577	26,03	32,43
120,2	48,0810	24,20	30,31	148,1	50,7522	26,29	32,51
120,7	47,8756	24,69	30,59	148,6	50,5467	26,34	32,58
121,2	48,0810	25,34	30,80	149,1	50,3413	25,36	32,17
121,7	48,0810	25,72	30,85	149,7	50,7522	25,39	32,38
122,2	48,2865	26,03	31,03	150,2	51,1632	25,54	32,74
122,7	48,0810	26,11	31,29	150,7	51,1632	25,44	32,66
123,2	48,4920	26,21	31,34	151,2	51,3686	25,62	32,40
123,7	48,2865	25,70	31,34	151,7	51,3686	25,44	32,38
124,2	48,2865	25,64	31,45	152,2	51,3686	25,41	32,43
124,7	48,4920	25,59	31,40	152,7	51,1632	25,41	32,40
125,2	48,2865	25,36	31,19	153,2	51,5741	25,46	32,33
125,7	48,4920	25,90	31,03	153,7	51,3686	25,46	32,17

Continuação da Tabela B.16.

Tempo (h)	Concentração do efluente (ppm)	Temperatura entrada (°C)	Temperatura saída (°C)	Tempo (h)	Concentração do efluente (ppm)	Temperatura entrada (°C)	Temperatura saída (°C)
154,2	51,3686	25,46	32,22	171,7	48,6975	25,49	31,01
154,7	51,5741	25,44	32,04	172,2	48,2865	25,36	31,34
155,2	51,3686	25,44	32,14	172,7	48,4920	25,44	31,40
155,7	51,3686	25,36	32,14	173,2	47,8756	25,31	31,55
156,2	51,5741	25,41	32,02	173,7	48,0810	25,39	31,32
156,7	51,3686	25,41	31,96	174,2	48,0810	25,13	30,93
157,2	51,3686	25,18	31,99	174,7	48,0810	25,26	30,98
157,7	51,3686	25,18	31,76	175,2	48,0810	25,21	31,27
158,2	51,1632	25,26	31,86	175,7	47,4646	25,26	31,32
158,7	51,1632	25,18	31,86	176,2	47,6701	25,23	31,16
159,2	51,1632	25,23	31,86	176,7	47,6701	25,00	31,06
159,7	50,7522	25,15	31,89	177,2	47,4646	25,13	31,19
160,2	50,9577	25,05	31,63	177,7	47,2591	25,03	31,14
160,7	50,5467	25,18	31,63	178,2	47,6701	24,92	31,09
161,2	50,3413	25,26	31,73	178,7	47,2591	24,87	30,80
161,7	50,3413	25,15	31,83	179,2	47,0537	24,97	30,80
162,2	49,7248	24,41	30,88	179,7	46,8482	24,85	30,59
162,7	49,7248	24,07	30,78	180,2	47,0537	24,64	30,70
163,2	49,7248	24,23	31,03	180,7	46,6427	24,64	30,57
164,2	49,7248	24,30	31,19	181,2	46,6427	24,66	30,49
164,7	49,5194	24,56	31,40	181,7	46,6427	24,72	30,39
165,2	49,9303	24,64	31,58	182,2	46,4372	24,48	30,36
165,7	49,7248	24,64	31,76	182,7	46,2318	24,51	30,28
166,2	49,9303	25,64	32,17	183,2	46,4372	24,46	30,18
166,7	49,9303	25,85	32,84	183,7	46,0263	24,46	30,18
167,2	49,5194	25,95	32,71	184,2	45,8208	24,33	30,34
167,7	49,3139	25,93	32,82	184,7	45,6153	24,36	30,21
168,2	49,3139	25,90	32,53	185,2	45,6153	24,46	30,10
168,7	49,5194	25,77	32,66	185,7	45,8208	24,41	30,05
169,2	49,5194	26,11	32,58	186,2	45,2044	24,46	29,82
169,7	48,4920	26,13	32,22	186,7	45,8208	24,41	30,10
170,2	48,4920	25,82	31,29	187,2	46,2318	24,43	30,21
170,7	48,2865	25,46	30,78	187,7	46,2318	24,74	30,36
171,2	48,4920	25,39	30,88				

Tabela B.17: Dados do experimento em leito fixo de carvão ativo - corrida 6.

Tempo (h)	Concentração do efluente (ppm)	Temperatura entrada (°C)	Temperatura saída (°C)	Tempo (h)	Concentração do efluente (ppm)	Temperatura entrada (°C)	Temperatura saída (°C)
0,5	0,0000	25,75	28,66	3,5	0,0000	31,01	30,34
1,0	0,4109	28,51	29,43	4,0	0,0000	31,14	30,57
1,5	0,2055	30,05	29,61	4,5	0,0000	31,40	30,67
2,0	0,2055	30,44	29,92	5,0	0,0000	31,40	30,67
2,5	0,0000	30,75	30,21	5,5	0,0000	31,19	30,62
3,0	0,0000	30,85	30,31	6,0	0,0000	31,09	30,57

Continuação da Tabela B.17.

Tempo (h)	Concentração do efluente (ppm)	Temperatura entrada (°C)	Temperatura saída (°C)	Tempo (h)	Concentração do efluente (ppm)	Temperatura entrada (°C)	Temperatura saída (°C)
6,5	0,2055	31,14	30,52	29,8	7,1916	24,82	29,64
7,1	0,4109	31,14	30,28	30,5	7,3971	26,47	30,57
7,6	0,4109	30,83	30,28	31,0	7,3971	26,37	30,62
8,1	0,6164	31,11	30,05	31,5	7,8080	26,26	30,34
8,8	0,8219	24,12	29,48	32,0	8,0135	26,08	30,18
9,3	1,4383	25,10	29,61	32,5	8,2190	25,72	29,69
9,8	1,8493	25,41	29,54	33,0	8,2190	25,59	29,66
10,3	2,2602	25,05	29,38	33,5	8,4245	25,62	29,64
10,8	2,4657	25,26	29,10	34,0	8,8354	25,59	29,51
11,3	2,8766	24,92	28,92	34,5	8,8354	25,62	29,43
11,8	3,0821	25,13	28,89	35,0	9,0409	25,72	28,99
12,3	3,2876	25,18	28,76	35,5	9,2464	25,44	29,25
12,8	3,4931	25,10	28,87	36,0	9,4518	25,46	28,97
13,3	3,6985	24,72	28,71	36,5	9,6573	25,41	28,69
13,8	3,6985	24,79	28,63	37,0	9,8628	25,15	28,45
14,3	3,9040	24,72	28,45	37,5	10,0683	25,23	28,51
14,8	4,1095	24,72	28,35	38,0	10,2737	25,03	28,17
15,3	4,1095	24,51	28,40	38,5	10,4792	24,90	27,78
15,8	4,1095	24,59	28,22	39,0	10,6847	24,69	27,73
16,3	4,5204	24,51	28,27	39,5	11,0956	24,64	27,16
16,8	4,5204	24,48	28,32	40,0	11,0956	24,46	27,40
17,3	4,7259	24,43	28,14	40,5	11,3011	24,51	26,73
17,8	4,9314	24,38	27,96	41,0	11,3011	24,33	26,49
18,3	4,9314	24,33	27,86	41,5	11,5066	23,97	26,44
18,8	5,1369	24,43	28,02	42,0	11,7120	23,97	26,57
19,3	5,1369	24,66	27,96	42,5	11,9175	23,87	26,29
19,8	5,1369	24,90	28,14	43,0	11,9175	23,87	26,44
20,3	5,1369	24,46	27,47	43,5	11,9175	24,05	26,34
20,8	5,3423	24,30	27,42	44,0	12,3285	24,02	26,34
21,3	5,3423	24,66	27,68	44,5	12,7394	24,38	26,47
21,8	5,5478	25,90	28,79	45,0	12,9449	24,36	26,68
22,3	5,5478	26,13	29,36	45,5	13,1504	24,74	26,68
22,8	5,3423	26,16	29,64	46,0	13,3558	24,48	26,75
23,3	5,5478	25,93	29,82	46,5	13,5613	24,64	26,70
23,8	5,7533	24,85	29,77	47,0	13,5613	24,77	26,96
24,3	5,7533	25,21	30,00	47,5	13,7668	25,15	27,16
24,8	5,9588	25,67	30,44	48,0	13,9723	25,23	27,14
25,3	5,9588	25,90	30,59	48,5	14,1777	25,23	27,47
25,8	6,1642	25,64	30,72	49,0	14,3832	25,18	27,45
26,3	6,3697	25,13	30,34	49,5	14,5887	25,00	27,68
26,8	6,5752	24,64	30,08	50,0	14,9996	25,15	27,76
27,3	6,3697	25,03	30,23	50,5	14,9996	25,18	27,86
27,8	6,5752	25,72	30,72	51,0	14,9996	25,10	27,71
28,3	6,7807	25,88	30,67	51,5	15,4106	25,34	27,89
28,8	6,7807	25,75	30,52	52,0	15,6161	25,13	27,81
29,3	6,7807	25,77	30,47	52,5	15,8215	25,15	27,81

Continuação da Tabela B.17.

Tempo (h)	Concentração do efluente (ppm)	Temperatura entrada (°C)	Temperatura saída (°C)	Tempo (h)	Concentração do efluente (ppm)	Temperatura entrada (°C)	Temperatura saída (°C)
53,0	16,0270	24,95	27,60	76,1	29,7938	26,24	28,45
53,5	16,0270	24,82	27,53	76,6	29,9993	26,19	28,51
54,0	16,2325	24,87	27,42	77,1	30,2048	26,13	28,43
54,5	16,4380	24,30	27,32	77,6	30,6157	26,13	28,35
55,0	17,0544	24,48	27,45	78,1	30,6157	26,13	28,22
55,5	17,4653	24,36	27,35	78,6	30,6157	26,01	27,91
56,0	17,8763	24,12	27,01	79,1	30,6157	25,85	28,20
56,5	18,2872	24,12	27,01	79,6	30,8212	25,80	28,35
57,0	18,6982	24,20	27,09	80,1	31,6431	25,82	28,09
57,5	18,9037	24,85	26,98	80,6	32,0540	25,57	28,02
58,1	19,1091	25,13	26,98	81,1	31,6431	25,52	27,86
58,6	19,3146	25,03	26,78	81,6	32,8759	25,46	27,89
59,1	19,5201	24,79	26,65	82,1	33,2869	25,34	27,65
59,6	19,9310	24,79	26,47	82,6	33,6978	25,28	27,58
60,1	20,1365	24,85	26,31	83,1	34,1088	25,26	27,55
60,6	20,5475	24,54	26,11	83,6	34,5197	25,03	27,42
61,1	20,7529	24,46	26,16	84,1	34,7252	24,95	27,24
61,6	20,9584	24,54	26,08	84,6	35,1361	24,95	27,40
62,1	21,1639	24,30	25,95	85,1	35,7526	25,03	27,45
62,6	21,5748	24,36	25,98	85,6	36,1635	24,92	27,22
63,1	21,7803	24,12	25,90	86,1	36,1635	24,92	27,11
63,6	22,1912	24,15	26,01	86,6	36,5745	24,87	27,06
64,1	22,6022	24,33	25,82	87,1	36,7799	24,82	26,96
64,6	22,8077	24,10	25,72	87,6	37,3964	24,87	26,96
65,1	23,0131	24,23	25,75	88,1	37,3964	24,66	26,96
65,6	23,2186	24,36	25,85	88,6	37,8073	24,64	26,75
66,1	23,6296	23,92	25,54	89,1	38,4237	24,56	26,83
66,6	23,8350	23,97	25,28	89,6	38,6292	24,51	26,88
67,1	24,0405	23,92	25,15	90,1	38,8347	24,56	26,80
67,6	24,2460	23,74	24,87	90,6	39,2456	24,30	26,83
68,1	24,4515	24,07	24,59	91,1	39,6566	24,59	26,78
68,6	24,8624	24,23	24,82	91,6	39,8621	24,77	27,06
69,1	24,8624	24,46	24,95	92,1	41,5059	25,03	27,11
69,6	25,0679	24,97	25,44	92,6	41,7113	23,81	26,13
70,1	25,2734	25,31	25,70	93,1	42,1223	24,28	26,26
70,6	25,2734	25,31	25,62	93,6	42,7387	25,41	27,47
71,1	26,0953	25,10	25,62	94,1	43,1496	25,57	27,99
71,6	26,5062	25,15	25,62	94,6	43,1496	25,85	28,17
72,1	26,7117	24,77	26,06	95,1	43,1496	25,82	28,38
72,6	27,1226	25,41	26,16	95,6	43,3551	25,85	28,51
73,1	27,5336	25,36	26,55	96,1	43,7661	26,13	28,84
73,6	27,9445	25,44	27,32	96,6	44,1770	26,29	28,84
74,1	28,3555	25,70	27,55	97,1	44,1770	26,31	29,36
74,6	28,5610	25,80	27,86	97,6	44,1770	26,65	29,48
75,1	28,9719	26,01	28,09	98,1	43,7661	26,11	29,72
75,6	29,3829	26,24	28,38	98,6	44,1770	26,29	29,85

Continuação da Tabela B.17.

Tempo (h)	Concentração do efluente (ppm)	Temperatura entrada (°C)	Temperatura saída (°C)	Tempo (h)	Concentração do efluente (ppm)	Temperatura entrada (°C)	Temperatura saída (°C)
99,1	44,3825	26,34	30,10	122,1	51,9851	25,82	31,16
99,6	44,7934	26,44	30,10	122,6	52,3960	26,01	31,29
100,1	45,4099	26,29	30,41	123,1	51,7796	25,75	31,47
100,6	44,7934	26,26	30,39	123,6	52,3960	25,80	31,73
101,1	44,9989	26,29	30,49	124,1	52,1905	26,03	31,99
101,6	45,2044	26,16	30,59	124,6	51,9851	26,06	32,17
102,1	45,2044	26,21	30,34	125,1	52,1905	26,16	32,07
102,6	45,8208	25,64	30,23	125,6	52,3960	26,13	32,17
103,1	46,2318	25,31	30,05	126,1	51,5741	25,80	32,25
103,6	46,2318	25,34	29,90	126,6	51,5741	25,67	32,20
104,1	46,6427	25,28	29,90	127,1	51,1632	25,52	32,04
104,6	47,0537	25,21	29,48	127,6	51,1632	25,44	31,73
105,1	47,0537	25,18	29,46	128,1	50,9577	25,28	31,60
105,6	47,4646	25,13	29,64	128,6	50,9577	24,56	30,26
106,1	47,4646	24,95	29,36	129,1	50,1358	23,99	29,77
106,6	47,6701	24,87	29,07	130,1	50,3413	23,84	29,77
107,1	47,8756	24,85	29,23	130,6	49,9303	23,32	29,48
107,6	48,2865	24,61	28,99	131,1	50,1358	23,48	29,61
108,1	48,4920	24,74	29,18	131,6	49,9303	23,66	29,30
108,6	48,4920	24,61	29,10	132,1	49,7248	23,69	29,38
109,1	48,6975	24,64	28,99	132,6	50,1358	23,20	29,25
109,6	48,6975	24,92	28,89	133,1	49,7248	23,20	29,15
110,1	48,9029	24,59	28,94	133,6	49,7248	23,14	29,20
110,6	48,9029	24,54	28,81	134,1	49,7248	22,91	29,10
111,1	48,9029	24,48	28,63	134,6	49,3139	22,94	28,99
111,6	49,1084	24,46	28,51	135,1	49,3139	22,86	28,81
112,1	49,1084	24,30	28,43	135,6	49,1084	22,86	28,94
112,6	49,1084	24,18	28,30	136,1	49,1084	22,86	28,81
113,1	49,1084	24,07	28,02	136,6	49,1084	22,76	28,74
113,6	49,1084	23,94	28,07	137,1	48,9029	22,81	28,56
114,1	48,6975	23,94	27,84	137,6	48,6975	22,60	28,25
114,6	49,1084	23,97	27,91	138,1	48,6975	22,68	28,43
115,1	49,1084	23,94	27,94	138,6	48,6975	22,55	28,35
115,6	49,1084	24,20	28,27	139,1	48,4920	22,58	28,58
116,1	49,5194	24,43	28,45	139,6	48,2865	22,71	28,45
116,6	49,9303	24,69	28,71	140,1	48,2865	22,94	28,74
117,1	50,7522	24,87	29,18	140,6	47,8756	22,89	29,07
117,6	51,1632	25,15	29,38	141,1	47,8756	23,12	29,12
118,1	51,1632	25,28	29,56	141,6	47,4646	23,20	29,30
118,6	51,5741	25,28	29,74	142,1	47,4646	23,48	29,48
119,1	51,7796	25,41	29,87	142,6	49,3139	25,13	30,67
119,6	51,9851	25,62	29,97	143,1	49,7248	26,03	30,93
120,1	52,6015	25,77	30,59	143,6	50,3413	25,64	31,06
120,6	52,3960	25,98	30,78	144,1	50,5467	26,03	31,16
121,1	52,6015	26,08	30,80	144,6	50,7522	26,16	31,14
121,6	51,7796	25,80	30,88	145,1	50,7522	26,11	31,03

Continuação da Tabela B.17.

Tempo (h)	Concentração do efluente (ppm)	Temperatura entrada (°C)	Temperatura saída (°C)	Tempo (h)	Concentração do efluente (ppm)	Temperatura entrada (°C)	Temperatura saída (°C)
145,6	51,1632	25,88	31,16	156,1	53,6288	25,23	30,05
146,1	50,9577	25,88	30,98	156,6	53,4234	24,61	29,20
146,6	51,5741	25,23	30,96	157,1	53,2179	24,69	28,61
147,1	51,1632	25,36	30,85	157,6	53,4234	24,82	28,51
147,6	51,3686	25,62	30,88	158,1	53,4234	25,08	28,07
148,1	51,3686	25,52	30,88	158,6	53,0124	25,21	27,89
148,6	51,7796	25,57	30,88	159,1	53,2179	25,15	27,81
149,1	51,7796	25,44	30,83	159,6	53,0124	25,18	27,89
149,6	51,5741	25,36	30,72	160,1	53,2179	24,79	27,68
150,1	51,7796	25,49	30,78	160,6	53,4234	25,00	27,96
150,6	52,1905	25,54	30,47	161,1	53,2179	25,00	27,84
151,1	53,0124	25,57	30,72	161,6	53,2179	24,97	27,68
151,6	53,4234	25,62	30,70	162,1	52,8070	24,90	27,73
152,1	53,4234	25,46	30,78	162,6	52,6015	24,85	27,55
152,6	53,2179	25,64	30,67	163,1	52,3960	24,79	27,50
153,1	53,6288	25,57	30,65	163,6	52,3960	24,69	27,29
153,6	53,6288	25,46	30,57	164,1	50,9577	24,64	27,14
154,1	53,4234	25,46	30,52	164,6	50,9577	24,72	27,27
154,6	53,4234	25,46	30,39	165,1	50,3413	24,69	27,47
155,1	53,4234	25,21	30,10	165,6	49,7248	24,79	27,35
155,6	53,4234	25,52	30,21	166,1	50,3413	24,90	27,42

Tabela B.18: Dados do experimento em leito fixo de carvão ativo - corrida 7.

Tempo (h)	Concentração do efluente (ppm)	Temperatura entrada (°C)	Temperatura saída (°C)	Tempo (h)	Concentração do efluente (ppm)	Temperatura entrada (°C)	Temperatura saída (°C)
0,5	0,0000	22,94	24,05	8,0	2,4657	25,46	26,73
1,0	0,8219	22,89	24,20	8,5	2,4657	25,44	26,80
1,5	1,6438	23,14	24,33	9,0	2,6712	25,41	26,62
2,0	1,0274	26,80	26,96	9,5	2,8766	25,10	26,47
2,5	0,0000	28,51	28,32	10,0	3,0821	25,21	26,26
3,0	1,2328	25,08	28,45	10,5	3,0821	25,03	26,19
3,5	2,2602	24,79	28,61	11,0	3,4931	25,13	26,01
4,0	2,4657	24,87	28,40	11,5	3,6985	25,00	25,85
4,5	2,6712	24,97	28,48	12,0	3,9040	24,74	25,57
5,0	2,6712	25,05	28,20	12,5	4,1095	24,79	25,52
5,5	2,8766	24,79	27,99	13,0	4,3150	24,82	25,34
6,0	3,0821	24,59	27,42	13,5	4,3150	24,72	25,03
6,5	2,4657	25,23	27,35	14,0	4,5204	24,59	24,74
7,0	2,4657	25,85	27,32	14,5	4,7259	24,41	24,74
7,5	2,0547	25,49	26,83	15,0	5,1369	24,20	24,51

Continuação da Tabela B.18.

Tempo (h)	Concentração do efluente (ppm)	Temperatura entrada (°C)	Temperatura saída (°C)	Tempo (h)	Concentração do efluente (ppm)	Temperatura entrada (°C)	Temperatura saída (°C)
15,5	5,1369	24,10	24,51	38,3	20,7529	25,67	25,57
16,0	5,5478	24,12	24,46	38,8	20,9584	25,72	25,23
16,5	5,5478	24,12	24,43	39,3	21,1639	25,90	25,23
17,0	5,5478	23,94	24,38	39,8	21,3694	25,54	25,21
17,5	5,9588	23,81	24,12	40,3	21,5748	25,44	25,15
18,0	6,1642	23,79	24,05	40,8	21,7803	25,46	25,03
18,5	6,1642	23,71	24,05	41,3	21,7803	25,31	24,77
19,0	6,5752	23,61	24,05	41,8	21,7803	25,23	24,82
19,5	6,7807	23,71	24,18	42,3	20,3420	25,26	24,18
20,0	6,9861	24,33	24,33	50,8	23,4241	27,99	23,02
20,5	5,1369	26,01	23,51	51,3	24,0405	21,49	25,70
21,0	6,9861	25,03	24,74	51,8	24,8624	24,69	23,25
21,5	7,6026	25,15	25,00	52,3	26,0953	23,09	24,54
22,0	8,2190	24,85	25,00	52,8	26,9172	26,21	26,11
22,5	8,6299	25,10	25,31	53,3	27,5336	24,69	26,62
23,0	8,8354	25,13	25,54	53,8	28,3555	25,90	26,70
23,5	9,2464	25,26	25,49	54,3	29,3829	26,24	27,11
24,0	9,6573	25,34	25,82	54,8	29,7938	26,65	27,27
24,5	10,2737	24,77	25,80	55,3	30,8212	26,06	27,27
25,0	10,6847	25,08	26,13	55,8	31,0267	26,11	27,68
25,3	12,3285	25,15	27,14	56,3	31,8486	26,65	28,27
25,8	12,5339	25,15	27,32	56,8	32,2595	26,01	28,53
26,3	12,9449	25,13	27,40	57,3	32,6704	20,13	27,91
26,8	13,5613	25,08	27,58	57,8	33,4923	20,77	27,50
27,3	13,9723	24,92	27,81	58,3	34,3142	26,08	28,02
27,8	14,3832	25,05	28,02	58,8	35,7526	26,42	28,81
28,3	14,7942	25,21	27,78	59,3	37,3964	25,41	28,92
28,8	15,2051	25,10	27,65	59,8	37,3964	25,44	28,97
29,3	15,2051	25,34	27,50	60,3	37,3964	25,28	28,69
29,8	15,6161	25,26	27,29	60,8	37,8073	25,15	28,69
30,3	16,2325	25,08	26,98	61,3	38,2183	25,57	28,79
30,8	16,4380	24,90	26,83	61,8	38,4237	25,52	28,51
31,3	15,8215	26,42	26,75	62,3	38,6292	25,21	28,38
31,8	16,4380	26,31	26,55	62,8	38,8347	25,28	28,35
32,3	16,6434	26,21	26,42	63,3	39,0402	25,13	28,17
32,8	17,2599	26,21	26,26	63,8	39,2456	24,79	28,02
33,3	17,4653	26,26	26,24	64,3	39,6566	25,05	27,81
33,8	17,6708	26,06	26,29	64,8	39,6566	25,15	27,81
34,3	18,0818	25,90	26,16	65,3	39,6566	25,15	27,91
34,8	18,2872	26,11	26,29	65,8	40,2730	24,20	27,35
35,3	18,6982	26,08	26,01	66,3	40,4785	24,87	27,78
35,8	18,9037	25,98	25,98	66,8	40,6840	26,19	27,68
36,3	19,5201	25,98	25,75	67,3	39,4511	25,93	27,53
36,8	19,7256	26,13	25,75	67,8	39,4511	25,82	27,37
37,3	19,9310	26,01	25,54	68,3	39,8621	25,93	27,58
37,8	20,3420	25,93	25,59	68,8	40,4785	25,75	27,32

Tabela B.19: Dados do experimento em leito fixo de carvão ativo - corrida 8.

Tempo (h)	Concentração do efluente (ppm)	Temperatura entrada (°C)	Temperatura saída (°C)	Tempo (h)	Concentração do efluente (ppm)	Temperatura entrada (°C)	Temperatura saída (°C)
0,5	0,0000	18,25	19,41	23,7	6,9861	21,60	22,22
1,0	0,0000	18,92	19,95	24,2	6,9861	21,65	22,37
1,5	0,4109	19,02	20,28	24,7	6,9861	21,98	22,60
2,0	0,6164	19,38	20,49	25,2	7,3971	22,22	22,63
2,5	0,6164	19,67	20,72	25,7	7,3971	22,37	22,94
3,0	1,0274	19,92	20,85	26,2	7,3971	22,58	23,22
3,5	1,0274	20,15	21,13	26,7	7,6026	22,78	23,40
4,0	1,2328	20,49	21,31	27,2	7,6026	22,99	23,74
4,5	1,4383	20,70	21,62	27,7	7,6026	23,32	23,92
5,0	1,4383	21,01	21,73	28,2	8,4245	23,51	24,23
5,5	1,6438	21,06	21,93	28,7	8,6299	23,79	24,41
6,0	1,6438	21,34	22,06	29,2	8,8354	24,05	24,66
6,5	1,6438	21,55	22,22	29,7	9,0409	24,20	24,82
7,0	1,8493	21,70	22,35	30,2	9,0409	24,48	24,95
7,5	2,0547	21,78	22,40	30,7	9,2464	24,41	25,15
8,0	2,0547	21,65	22,29	31,2	9,6573	24,46	25,03
8,5	2,4657	21,75	22,29	31,7	9,6573	24,25	25,08
9,0	2,6712	21,73	22,45	32,2	10,8901	24,25	24,74
9,7	2,6712	21,78	22,40	32,8	11,9175	24,28	25,10
10,2	2,8766	21,80	22,40	33,3	12,1230	24,33	24,87
10,7	3,0821	21,80	22,37	33,8	12,7394	24,28	24,95
11,2	3,4931	21,68	22,37	34,3	13,1504	24,38	24,95
11,7	3,4931	21,73	22,35	34,8	13,5613	24,18	24,87
12,2	3,6985	21,70	22,27	35,3	14,1777	24,20	24,82
12,7	3,6985	21,68	22,27	35,8	14,5887	24,07	24,79
13,2	3,9040	21,65	22,16	36,3	14,9996	24,12	24,64
13,7	4,3150	21,39	22,14	36,8	15,4106	23,97	24,72
14,2	4,3150	21,42	22,06	37,3	15,8215	23,84	24,54
14,7	4,5204	21,42	21,91	37,8	16,4380	23,79	24,30
15,2	4,7259	21,24	21,93	38,3	16,8489	23,61	24,25
15,7	4,7259	21,26	21,91	38,8	17,0544	23,51	24,20
16,2	5,1369	21,13	21,86	39,3	17,6708	23,22	23,94
16,7	5,3423	21,21	21,83	39,8	18,0818	23,25	23,74
17,2	5,3423	21,13	21,80	40,3	18,6982	23,14	23,81
17,7	5,5478	21,03	21,65	40,8	19,1091	23,17	23,81
18,2	5,5478	21,01	21,73	41,3	19,3146	23,04	23,58
18,7	5,7533	20,90	21,60	41,8	19,9310	22,96	23,61
19,2	5,9588	21,03	21,65	42,3	20,3420	23,12	23,81
19,7	5,9588	21,01	21,55	42,8	20,5475	23,12	23,79
20,2	6,3697	20,88	21,49	43,3	20,9584	23,20	23,84
20,7	6,5752	20,82	21,37	43,8	21,3694	23,17	23,89
21,2	6,5752	20,70	21,31	44,3	21,5748	23,22	23,81
21,7	6,7807	20,77	21,44	44,8	21,7803	23,20	23,79
22,2	6,7807	20,98	21,49	45,3	22,3967	23,17	23,76
22,7	6,7807	21,19	21,80	45,8	22,6022	23,22	23,92
23,2	6,7807	21,42	21,93	46,3	22,6022	23,43	24,05

Continuação da Tabela B.19.

Tempo (h)	Concentração do efluente (ppm)	Temperatura entrada (°C)	Temperatura saída (°C)	Tempo (h)	Concentração do efluente (ppm)	Temperatura entrada (°C)	Temperatura saída (°C)
46,8	24,4515	23,48	24,12	62,4	42,9442	24,95	25,70
47,3	25,8898	23,58	24,15	62,9	43,7661	24,90	25,57
47,8	26,7117	23,51	24,15	63,4	43,9715	24,82	25,46
48,3	27,3281	23,63	24,33	63,9	44,5880	24,74	25,41
48,8	28,1500	23,92	24,46	64,4	44,9989	24,69	25,26
49,3	28,5610	24,02	24,59	64,9	44,9989	24,51	25,10
49,8	29,3829	24,20	24,74	65,4	45,2044	23,94	24,54
50,3	29,7938	24,20	24,90	65,9	45,4099	23,53	23,89
50,8	30,6157	24,38	25,08	66,4	45,8208	23,17	23,76
51,3	31,0267	24,74	25,39	66,9	46,0263	22,91	23,43
51,8	31,2321	25,00	25,64	67,4	46,4372	22,65	23,25
52,3	31,6431	25,23	25,93	67,9	46,8482	22,50	23,07
52,8	32,0540	25,44	26,06	68,4	47,0537	22,73	23,12
53,3	32,6704	25,52	26,19	68,9	47,2591	22,45	23,02
53,8	32,8759	25,59	26,26	69,4	47,0537	22,19	22,71
54,3	33,4923	25,59	26,34	69,9	47,4646	22,09	22,58
54,8	33,9033	25,57	26,29	70,4	47,4646	21,96	22,65
55,3	34,3142	25,57	26,13	70,9	49,3139	21,86	22,40
55,8	34,9307	25,49	26,08	71,4	50,3413	21,83	22,32
56,3	35,3416	25,49	26,03	71,9	51,7796	21,83	22,32
56,9	36,5745	25,70	26,26	72,4	51,9851	21,55	21,88
57,4	37,3964	25,41	26,31	72,9	52,6015	21,24	21,86
57,9	38,0128	25,52	26,06	73,4	53,4234	21,52	21,93
58,4	38,6292	25,46	26,21	73,9	52,1905	21,39	21,88
58,9	39,0402	25,39	26,11	74,4	52,6015	21,31	21,96
59,4	39,8621	25,41	26,08	74,9	52,6015	21,29	21,88
59,9	40,6840	25,26	26,01	75,4	52,3960	21,21	21,70
60,4	41,0949	25,10	25,77	75,9	52,1905	20,80	21,16
60,9	41,5059	25,03	25,72	76,4	52,1905	20,72	21,19
61,4	42,1223	25,03	25,62	76,9	52,1905	20,52	21,03
61,9	42,5332	25,00	25,72	77,4	51,9851	20,18	20,72