



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE

CENTRO DE TECNOLOGIA – CT

CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA – CCET

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE  
PETRÓLEO - PPGCEP



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

# MODELAGEM ANALÍTICA E EXPERIMENTAL DA FILTRAÇÃO EM MEIOS POROSOS.

Paulo Henrique de Lima Barros

**Orientador:** Prof. Dr. Adriano dos Santos

**Natal / RN, Dezembro de 2008**

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

MODELAGEM ANALÍTICA E  
EXPERIMENTAL DA FILTRAÇÃO EM  
MEIOS POROSOS.

Paulo Henrique de Lima Barros

**Natal / RN, Dezembro de 2008**

Divisão de Serviços Técnicos

Catálogo da Publicação na Fonte. UFRN / Biblioteca Central Zila Mamede

Barros, Paulo Henrique de Lima Barros.

Modelagem analítica e experimental da filtração em meios porosos / Paulo Henrique de Lima Barros. – Natal, RN, 2008.

94 f.

Orientador: Adriano dos Santos.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Ciências Exatas e da Terra. Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Petróleo.

1. Filtração (Petróleo) – Dissertação. 2. Exclusão pelo tamanho – Dissertação. 3. Modelagem estatística – Dissertação. 4. Distribuição de tamanho de poros e partículas – Dissertação. 5. Dano à formação – Dissertação. I. Santos, Adriano dos. II. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. III. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 622.276(043.3)

**Paulo Henrique de Lima Barros**

**Modelagem Analítica e Experimental da Filtração em Meios Porosos.**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Petróleo PPGCEP, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Petróleo.

Aprovado em \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de 2008.

---

Prof. Dr. Adriano dos Santos  
Orientador – UFRN

---

Prof. Dr. Wilson da Mata  
Membro Interno - UFRN

---

Prof. Dr. Antônio Luiz Serra de Souza  
Membro Externo – CENPES / PETROBRAS

BARROS, Paulo Henrique de Lima – Modelagem Analítica e Experimental da Filtração em Meios Porosos. Dissertação de Mestrado, UFRN, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Petróleo. Área de Concentração: Engenharia e Geologia de Reservatórios e de Exploração de Petróleo e Gás Natural (ERE), Natal-RN, Brasil.

**Orientador:** Prof. Dr. Adriano dos Santos

## RESUMO

---

A filtração profunda de suspensões particuladas ocorre em muitos processos industriais e ambientais, como filtração de água e contaminação do solo. Na indústria petrolífera, a filtração profunda ocorre próximo ao poço injetor durante a injeção de água, causando redução de injetividade. Este processo também ocorre durante a perfuração de poços de petróleo, o controle da produção de areia, o descarte de água produzida em aquíferos, etc. A captura de partículas no meio poroso pode ser causada por diferentes mecanismos físicos (exclusão pelo tamanho, forças elétricas, gravidade, etc.). Neste trabalho, um modelo estatístico para a filtração em meios porosos é proposto e soluções analíticas para as concentrações de partículas em suspensão e retidas são obtidas. O modelo, que incorpora a probabilidade de captura de partículas, foi comparado com o modelo clássico permitindo uma interpretação física dos coeficientes de filtração. As soluções analíticas encontradas para o modelo proposto foram comparadas com a modelagem clássica, mostrando que quanto maior a probabilidade de captura de partículas durante o transporte em meios porosos, maior é a discrepância entre a modelagem clássica e o modelo proposto.

---

**Palavras-Chaves:** Filtração; exclusão pelo tamanho; modelagem estatística; distribuições de tamanho de poros e de partículas; dano à formação.

## **ABSTRACT**

---

Deep bed filtration occurs in several industrial and environmental processes like water filtration and soil contamination. In petroleum industry, deep bed filtration occurs near to injection wells during water injection, causing injectivity reduction. It also takes place during well drilling, sand production control, produced water disposal in aquifers, etc. The particle capture in porous media can be caused by different physical mechanisms (size exclusion, electrical forces, bridging, gravity, etc). A statistical model for filtration in porous media is proposed and analytical solutions for suspended and retained particles are derived. The model, which incorporates particle retention probability, is compared with the classical deep bed filtration model allowing a physical interpretation of the filtration coefficients. Comparison of the obtained analytical solutions for the proposed model with the classical model solutions allows concluding that the larger the particle capture probability, the larger the discrepancy between the proposed and the classical models.

---

**Keywords:** Filtration, straining, statistical model, particle and pore radii distributions, formation damage.

“Sou apenas um caminhante  
Que perdeu o medo de se perder  
Estou seguro de que sou imperfeito  
Podem me chamar de louco  
Podem zombar das minhas idéias  
Não importa!  
O que importa é que sou um caminhante  
Que vende sonhos aos passantes  
Não tenho bússola nem agenda  
Não tenho nada, mas tenho tudo  
Sou apenas um caminhante  
À procura de mim mesmo”.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao Senhor, pois até aqui Ele tem me ajudado, e certamente Sua bondade e misericórdia me acompanham todos os dias da minha vida.

Agradeço a minha esposa Éveni Mayara por sua paciência, dedicação e carinho, tudo que fiz, faço e vou fazer é pensando em lhe oferecer o melhor de mim.

Agradeço aos meus familiares pelo apoio incondicional e incentivo.

O meu muito obrigado à igreja do Senhor por suas orações. Sei que posso contar com muitos daqueles que chamo de “irmãos”.

Agradeço ao Prof. Adriano dos Santos, meu orientador e exemplo de professor; agradeço pela sua paciência, persistência e conselhos.

Aos amigos de PPGCEP meus agradecimentos pelos momentos de estudo e descontração.

Aos professores e funcionários de PPGCEP meus agradecimentos.

Às amigas: Neuma, Camila, Ingrid, Shirley, Olga, Rita, Joubert, Djanine e Indira pela força e cobertura em momentos críticos.

Em especial meu agradecimento à Petrobras pela bolsa de estudo e ao CNPq pelo apoio financeiro (projeto no. 485381 / 2007-9).

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>VII</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>X</b>
<b>NOMENCLATURA</b> .....	<b>XI</b>
<b>1. INTRODUÇÃO GERAL</b> .....	<b>2</b>
<b>2. ASPECTOS TEÓRICOS</b> .....	<b>6</b>
2.1 - Escoamento em meios porosos.....	<b>6</b>
2.2 - Fluido.....	<b>7</b>
2.2.1 - Porosidade e permeabilidade.....	<b>8</b>
2.3 - Mecanismos de retenção durante o transporte de suspensões particuladas em meios porosos.....	<b>10</b>
2.3.1 - Adsorção ( <i>attachment</i> ).....	<b>12</b>
2.3.2 - Exclusão pelo tamanho.....	<b>13</b>
2.3.3 - Relevância dos mecanismos de retenção.....	<b>15</b>
2.4 - Determinação da distribuição do tamanho dos poros através das curvas de pressão capilar.....	<b>17</b>
2.4.1 - Determinação das distribuições de poros a partir das curvas de saturação versus pressão capilar.....	<b>19</b>
<b>3. ESTADO DA ARTE</b> .....	<b>24</b>
3.1 - Modelo clássico para filtração profunda.....	<b>24</b>
3.2 - Modelo estocástico.....	<b>29</b>
3.3 - Modelos de rede.....	<b>30</b>
<b>4. MODELAGEM ESTATÍSTICA</b> .....	<b>33</b>
4.1 - Modelo proposto para filtração profunda.....	<b>33</b>
4.1.1 - Determinação experimental de $\lambda$ e $\lambda^*$ para o modelo proposto (solução do problema inverso).....	<b>38</b>
<b>5. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>43</b>
5.1 - Experimentos de injeção de suspensões particuladas em meios porosos.....	<b>43</b>
5.2 - Determinação experimental dos parâmetros do modelo proposto.....	<b>44</b>
5.2.1 - Experimento 01.....	<b>44</b>
5.2.2 - Experimento 02.....	<b>49</b>
<b>6. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>53</b>
6.1 - Porosimetria dos meios porosos estudados.....	<b>53</b>
6.2 - Comparação do modelo clássico com o modelo proposto.....	<b>56</b>
6.2.1 - Experimento 01.....	<b>56</b>
6.2.2 - Experimento 02.....	<b>70</b>
<b>7. CONCLUSÕES</b> .....	<b>84</b>
<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>86</b>
<b>TRABALHOS PUBLICADOS</b> .....	<b>87</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>88</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.1.</b> Esquema de injeção de água. ....	2
<b>Figura 1.2.</b> Representação da retenção de partículas e formação do reboco externo durante a filtração. ....	3
<b>Figura 2.1.</b> Mecanismos de retenção de partículas no meio poroso (Sallum, 2006).....	11
<b>Figura 2.2.</b> Esboço de distribuições de tamanho de poros (com o mesmo diâmetro médio) e distribuição de tamanho de partículas injetadas. ....	14
<b>Figura 2.3.</b> Variação de permeabilidade com a vazão (Ochi et al. (1998)).....	16
<b>Figura 2.4.</b> Distribuição de tamanho de partículas efluentes em função da velocidade de injeção (Ahfir et al., 2007). ....	17
<b>Figura 2.5.</b> Esquema da porosimetria com mercúrio.....	18
<b>Figura 2.6.</b> Comparação da distribuição de tamanhos de poros por porosimetria de mercúrio com a distribuição de tamanhos de poros por meios ópticos (Dullien, 1979). 22	
<b>Figura 3.1.</b> Esquema mostrando partículas em suspensão ( $c$ ) e capturadas ( $\sigma$ ) durante o transporte de suspensões em meios porosos.....	25
<b>Figura 3.2.</b> Ilustração do experimento para a determinação da curva de <i>breakthrough</i> .27	
<b>Figura 3.3.</b> Concentração de partículas retidas ao longo de uma amostra de rocha.....	27
<b>Figura 4.1.</b> Esquema mostrando o deslocamento $\Delta$ de uma partícula no meio poroso. Aqui estão representadas as probabilidades de uma partícula ser capturada ( $q$ ) ou de continuar em suspensão ( $p$ ). (Santos, 2008).....	33
<b>Figura 4.2.</b> Ilustração do transporte de suspensões em meios porosos (Santos, 2008). 35	
<b>Figura 4.3.</b> Esquema mostrando a determinação dos parâmetros $T^*$ , $\alpha$ e $c_{eff}/c_0$ . (Barros e Santos, 2008). ....	40
<b>Figura 5.1.</b> Partículas de 3 $\mu$ m retidas no meio poroso 70110 (Bradford et al., 2005). . 45	
<b>Figura 5.2.</b> Aparato experimental do procedimento empregado para o estudo do transporte de partículas suspensas no meio poroso. ....	46
<b>Figura 6.1.</b> Gráficos da pressão capilar em $cm$ de $H_2O$ , $P_c(S)$ , para os meios porosos 2030, 3550, MIX e 70110 (Bradford et al., 2001).....	54
<b>Figura 6.2.</b> Curvas de distribuição de tamanhos de poros para os meios porosos 2030, 3550, MIX e 70110.....	55

<b>Figura 6.3.</b> Ordem da diferença entre o modelo estatístico e o modelo clássico para previsão de partículas retidas.....	<b>58</b>
<b>Figura 6.4.</b> (a) Curva de <i>breakthrough</i> e concentração de partículas retidas e previsão do modelo clássico e do modelo estatístico para partículas de diâmetro (b) 0,45µm, (c) 1,0µm, (d) 2,0µm e (e) 3,2µm ao longo do meio poroso 2030. ....	<b>59</b>
<b>Figura 6.5.</b> (a) Curva de <i>breakthrough</i> e concentração de partículas retidas e previsão do modelo clássico e do modelo estatístico para partículas de diâmetro (b) 0,45µm, (c) 1,0µm, (d) 2,0µm e (e) 3,2µm ao longo do meio poroso 3550. ....	<b>61</b>
<b>Figura 6.6.</b> (a) Curva de <i>breakthrough</i> e concentração de partículas retidas e previsão do modelo clássico e do modelo estatístico para partículas de diâmetro (b) 0,45µm, (c) 1,0µm, (d) 2,0µm e (e) 3,2µm ao longo do meio poroso MIX. ....	<b>62</b>
<b>Figura 6.7.</b> (a) Curva de <i>breakthrough</i> e concentração de partículas retidas e previsão do modelo clássico e do modelo estatístico para partículas de diâmetro (b) 0,45µm, (c) 1,0µm, (d) 2,0µm, (e) 3,0µm e (f) 3,2µm ao longo do meio poroso 70110.....	<b>64</b>
<b>Figura 6.8.</b> (a) Curva de <i>breakthrough</i> e concentração de partículas retidas e previsão do modelo clássico e do modelo estatístico para partículas de diâmetro (b) 0,45µm, (c) 1,0µm, (d) 2,0µm e (e) 3,2µm ao longo do meio poroso GB.....	<b>65</b>
<b>Figura 6.9.</b> (a) Curva de <i>breakthrough</i> e concentração de partículas retidas e previsão do modelo clássico e do modelo estatístico para partículas de diâmetro de 1,0µm (b) força iônica e velocidade baixa (c) força iônica alta e velocidade baixa (d) força iônica alta e velocidade alta, ao longo do meio poroso 70110.....	<b>67</b>
<b>Figura 6.10.</b> (a) Curva de <i>breakthrough</i> , concentração de partículas retidas e previsão do modelo clássico e do modelo estatístico para partículas de diâmetro 1,0µm e relação de concentração de referência (b) 2cr, (c) 1cr, (d) 0,5 cr e (d) 0,25 cr ao longo do meio poroso 3550. ....	<b>72</b>
<b>Figura 6.11.</b> (a) Curva de <i>breakthrough</i> , concentração de partículas retidas e previsão do modelo clássico e do modelo estatístico para partículas de diâmetro 3,2µm e relação de concentração de referência (b) 2cr, (c) 1cr, (d) 0,5 cr e (e) 0,25 cr ao longo do meio poroso 3550. ....	<b>74</b>
<b>Figura 6.12.</b> (a) Curva de <i>breakthrough</i> , concentração de partículas retidas e previsão do modelo clássico e do modelo estatístico para partículas de diâmetro 1,0µm e relação de concentração de referência (b) 2cr, (c) 1cr e (d) 0,25 cr ao longo do meio poroso MIX. ....	<b>75</b>
<b>Figura 6.13.</b> (a) Curva de <i>breakthrough</i> , concentração de partículas retidas e previsão do modelo clássico e do modelo estatístico para partículas de diâmetro 3,2µm e relação de concentração de referência (b) 2cr, (c) 1cr, (d) 0,5 cr e (e) 0,25 cr ao longo do meio poroso MIX. ....	<b>77</b>

**Figura 6.14.** (a) Curva de *breakthrough*, concentração de partículas retidas e previsão do modelo clássico e do modelo estatístico para partículas de diâmetro  $1,0\mu\text{m}$  e relação de concentração de referência (b)  $2cr$ , (c)  $0,25cr$  ao longo do meio poroso 70110. . **78**

**Figura 6.15.** (a) Curva de *breakthrough*, concentração de partículas retidas e previsão do modelo clássico e do modelo estatístico para partículas de diâmetro  $3,2\mu\text{m}$  e relação de concentração de referência (b)  $2cr$ , (c)  $1cr$ , (d)  $0,5 cr$  e (e)  $0,25 cr$  ao longo do meio poroso 70110. .... **79**

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 2.1.</b> Valores de porosidade para vários materiais (Costa, 2001).....	<b>8</b>
<b>Tabela 2.2.</b> Critérios para ocorrência de exclusão pelo tamanho em função de $dp/dg$ ..	<b>14</b>
<b>Tabela 2.3.</b> Relação entre os tamanhos dos poros e das gargantas.....	<b>15</b>
<b>Tabela 5.1.</b> Propriedade dos meios porosos .....	<b>46</b>
<b>Tabela 5.2.</b> Dimensões da amostra e propriedades do solo e da partícula.....	<b>47</b>
<b>Tabela 5.3.</b> Porosidade ( $\phi$ ), velocidade de Darcy ( $U$ ) e tempo total de injeção ( $T^*$ ). ...	<b>48</b>
<b>Tabela 5.4.</b> Porosidade ( $\phi$ ), velocidade de Darcy ( $U$ ) e tempo total de injeção ( $T^*$ ) para $d_s$ de $1,0\mu\text{m}$ . .....	<b>49</b>
<b>Tabela 5.5.</b> Dimensões do tubo e propriedades do solo e da partícula.....	<b>50</b>
<b>Tabela 5.6.</b> Porosidade ( $\phi$ ), velocidade de Darcy ( $U$ ) e tempo total de injeção ( $T^*$ ). ...	<b>51</b>
<b>Tabela 6.1.</b> Valores para $a$ , $b$ e $c$ . .....	<b>54</b>
<b>Tabela 6.2.</b> Valores de $\lambda$ e $\lambda^*$ , $q$ e $\Delta$ .....	<b>68</b>
<b>Tabela 6.3.</b> Parâmetros determinados a partir do tratamento dos dados experimentais utilizando a modelagem estatística. ....	<b>69</b>
<b>Tabela 6.4.</b> Valores de $\lambda$ e $\lambda^*$ , $q$ e $\Delta$ para os dados de Bradford et al., (2006b) .....	<b>70</b>
<b>Tabela 6.5.</b> Parâmetros determinados a partir do tratamento dos dados experimentais utilizando a modelagem estatística. ....	<b>70</b>
<b>Tabela 6.6.</b> Valores de $\lambda$ e $\lambda^*$ , $p$ e $\Delta$ .....	<b>81</b>
<b>Tabela 6.7.</b> Parâmetros determinados a partir do tratamento dos dados experimentais utilizando a modelagem estatística. ....	<b>82</b>

## NOMENCLATURA

$A$	área transversal da amostra ( $m^2$ )
$c_{eff}$	concentração efluente ( $N^o/m^3$ )
$c_o$	concentração de injeção de partículas ( $N^o/m^3$ )
$c$	concentração de partículas em suspensão ( $N^o/m^3$ )
$cr$	concentração de referência ( $N^o/m^3$ )
$d_{50}$	diâmetro médio (m)
$d_s$	diâmetro da partícula em suspensão (m)
$f(r_p)$	função distribuição de tamanhos de poros (1/m)
$k$	permeabilidade ( $m^2$ )
$L$	comprimento da amostra (m)
$N$	número de partículas. ( $N^o$ )
$P_c$	pressão capilar (Pa)
$p.v.i.$	volume poroso injetado ( <i>pore volume injected</i> )
$p$	probabilidade de uma partícula estar livre (-)
$q$	probabilidade de retenção da partícula (-),
$Q_w$	vazão de injeção ( $m^3/s$ )
$r_p$	raio dos poros (m)
$SE_{cla}$	erro padrão do modelo clássico (-)
$SE_{est}$	erro padrão do modelo estatístico (-)
$S_w$	saturação da água (-)
$T$	tempo adimensional (-)
$T^*$	tempo total de injeção (p.v.i)
$t$	tempo de injeção da suspensão (s)
$t_r$	tempo de injeção de referência (s)
$U$	velocidade de Darcy (m/s)
$v_p$	velocidade da partícula (m/s)
$V_w$	volume injetado ( $m^3$ )
$X$	coordenada adimensional (-)
$\alpha$	velocidade adimensional (-)
$\beta$	coeficiente de dano a formação (-)

$\Delta$	distância entre “sítios de retenção” (m)
$\phi$	porosidade (-)
$\lambda_c$	coeficiente de filtração para o modelo clássico (1/m)
$\lambda$	coeficientes de filtração para o modelo estatístico (1/m)
$\lambda^*$	coeficientes de filtração modificado (1/m)
$\mu$	viscosidade (Pa.s)
$\theta$	angulo de contato (graus)
$\rho$	densidade específica (Kg/m <sup>3</sup> )
$\sigma$	concentração de partículas retidas (N <sup>o</sup> /m <sup>3</sup> )
$\tau_{xy}$	tensão de cisalhamento (N/m <sup>2</sup> )
$\tau$	tempo necessário para que uma partícula tenha um deslocamento $\Delta$ (s)

---

# Capítulo 1

## Introdução Geral

---

## 1. Introdução Geral

A modelagem do transporte de suspensões em meios porosos tem aplicações em vários processos ambientais e industriais. Dentre esses processos, destacam-se a propagação de contaminantes no subsolo, a injeção de grandes volumes de água do mar em reservatórios de petróleo, o armazenamento geológico da água produzida durante a extração do petróleo, bem como sua reinjeção, a filtração de água, e a contaminação de aquíferos.

Durante a extração de petróleo em campos marítimos (*offshore*) é comum injetar água do mar em reservatórios. O esquema mostrado na Figura 1.1 apresenta a injeção de água em campos de petróleo.

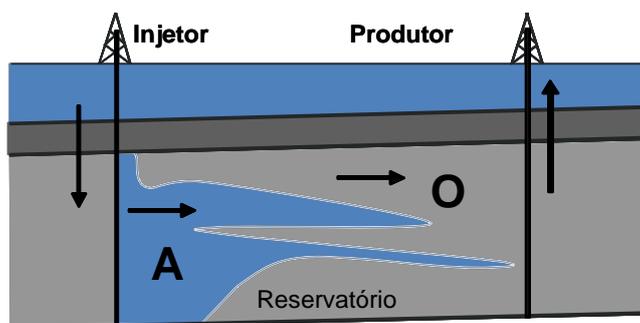


Figura 1.1. Esquema de injeção de água.

De acordo com Shecaira (2002), a injeção de água é a principal tecnologia aplicada em campos marítimos, sendo empregada em aproximadamente 74% do petróleo produzido no Brasil. Segundo a estimativa de Shecaira (2002), aproximadamente 500 milhões de litros de água do mar seriam injetados diariamente em campos brasileiros no ano de 2006.

Para ser descartada no mar, a água produzida (com partículas sólidas e líquidas em suspensão) deve atingir as especificações exigidas por leis ambientais. Devido ao alto custo envolvido no tratamento da água produzida, esta é muitas vezes reinjetada ou descartada em aquíferos. Neste caso, é essencial analisar o risco de contaminação do subsolo, prevendo como e para onde as partículas em suspensão se propagarão.

Além de manter a pressão no reservatório, a água injetada desloca o petróleo em direção aos poços produtores, sendo posteriormente produzida em conjunto com o petróleo.

Um fenômeno bastante comum na indústria do Petróleo é a perda de injetividade; ou seja, a redução da permeabilidade na vizinhança do poço injetor devido à retenção de partículas em suspensão durante a injeção/reinjeção de água em reservatórios.

Durante a injeção de água em reservatórios de petróleo, por exemplo, a permeabilidade e a injetividade diminuem devido à obstrução de poros da rocha por partículas retidas, isso pode ser observado na Figura 1.2.

Quanto maior o dano à formação (perda de injetividade), maior será a pressão requerida para injetar uma dada vazão de água.

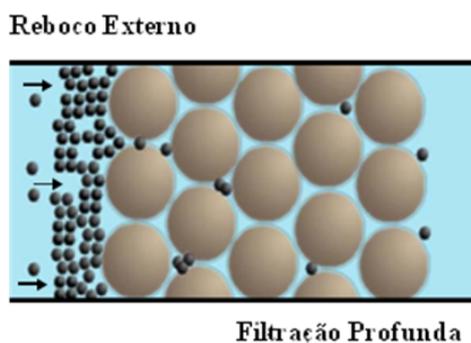


Figura 1.2. Representação da retenção de partículas e formação do reboco externo durante a filtração.

De forma geral, quanto maior a concentração de partículas retidas, menor a permeabilidade local. Vários autores (Herzig et al., 1970, Sharma et al., 2000, Pang & Sharma, 1997) propuseram fórmulas empíricas para representar a dependência entre a permeabilidade local ( $k$ ) e a concentração de partículas retidas ( $\sigma$ ).

A modelagem clássica do transporte em meios porosos, em conjunto com a lei de Darcy modificada (permeabilidade variável) tem sido amplamente aplicada no estudo da perda de injetividade. A modelagem clássica do transporte em meios porosos foi utilizada para ajustar, simultaneamente, dados experimentais de concentração de partículas em suspensão na saída do meio poroso e perfis de concentração de partículas retidas ao longo do mesmo. A modelagem mostrou grande discrepância em relação aos dados experimentais (Bradford et al., 2002, Tufenkji et al., 2004, Johnson et al., 2007).

Portanto, a utilização do modelo clássico pode resultar em graves erros na previsão do transporte de suspensões, influenciando profundamente as previsões de perda de injetividade.

Vários modelos, incluindo diferentes mecanismos de transporte no meio poroso, foram desenvolvidos com o intuito de resolver as discrepâncias entre a modelagem clássica e os testes experimentais (Sharma & Yortsos, 1987; Tufenkji et al., 2004; Santos et al. 2005, 2008, Shapiro et al. 2007).

Os modelos estocásticos, que incorporam informações microscópicas do meio poroso e das partículas em suspensão, permitem a integração do sistema de equações estocásticas e a obtenção de modelos efetivos que diferem significativamente do modelo clássico.

Neste estudo, desenvolvemos um modelo estatístico que incorpora características microscópicas dos meios porosos. A partir do modelo proposto, foram determinadas as concentrações médias de partículas capturadas e em suspensão.

As soluções analíticas encontradas para o modelo proposto foram comparadas com a modelagem clássica, mostrando que quanto mais intenso o processo de captura de partículas durante o transporte em meios porosos, maior é a discrepância entre a modelagem clássica e o modelo proposto. Por outro lado, foi constatado que a solução analítica do modelo proposto tende para a solução analítica do modelo clássico quando a probabilidade de captura de partículas tende para zero. Ou seja, o modelo clássico é um caso particular do modelo proposto.

Além disso, ao contrário da modelagem clássica, a modelagem proposta permite uma interpretação física precisa dos parâmetros envolvidos. Tais parâmetros foram correlacionados com o coeficiente de filtração (presente no modelo clássico), mostrando que o coeficiente de filtração depende de características do meio poroso e das partículas em suspensão.

Finalmente, a modelagem estatística proposta para o transporte de suspensões apresentou um melhor ajuste dos dados experimentais disponíveis na literatura (Tufenkji et al., 2004; Bradford et al., 2002, 2005, 2006a e 2006b).

---

# Capítulo 2

## Aspectos Teóricos

---

## **2. Aspectos teóricos**

Muitos fatores, como porosidade, permeabilidade, saturação, tipo do fluido, diâmetro das partículas injetadas, diâmetro dos grãos que compõe o meio poroso, geometria dos grãos, etc., afetam o transporte de fluidos e a retenção de partículas no meio poroso.

No presente trabalho é apresentado um modelo probabilístico para prever a retenção de partículas no meio poroso. Essa retenção pode ocorrer por vários mecanismos de retenção, como por exemplo, adsorção, exclusão pelo tamanho, forças elétricas e sedimentação.

No modelo proposto neste trabalho foi considerado que o mecanismo de exclusão pelo tamanho (retenção em poros menores do que as partículas) é dominante.

A retenção por exclusão pelo tamanho ocorre, em geral, nas gargantas de poros. Siqueira (2000) observou que as gargantas de poro são aproximadamente 10 vezes menores do que os poros.

### **2.1 - Escoamento em meios porosos**

Dentre as diversas informações a serem obtidas a respeito de uma acumulação de petróleo após a sua descoberta, a quantidade de hidrocarbonetos que se pode retirar dessa jazida e o tempo em que essa produção se efetuará são, sem qualquer dúvida das mais importantes.

Rosa et al. (2006) comentam que a partir de equações básicas do estudo do fluxo em meios porosos podem ser desenvolvidos modelos matemáticos com os quais se procura obter informações relacionadas com o aspecto físico do reservatório, como por exemplo, dimensões, formas, variações de propriedades etc. Podem ser obtidos também dados sobre o comportamento atual e futuro em termos de pressão, vazões de produção etc. A complexidade desses modelos depende dos diversos aspectos que se deseja considerar no estudo do fluxo através do meio poroso e do grau de simplificação que se deseja imprimir ao trabalho.

Para estudar o escoamento de fluidos em meios porosos, é necessário inicialmente especificar-se os conceitos dos dois materiais envolvidos no problema:

fluidos e meios porosos. Pode-se definir um meio poroso como um meio sólido que contém poros. Poros são espaços “vazios”, que podem ser distribuídos de diversas maneiras no meio. De acordo com essa descrição, são exemplos de meios porosos: leitos, rochas porosas, agregados fibrosos como tecidos e filtros, e partículas catalíticas contendo micro-poros extremamente pequenos (entre 0,1µm e 100 µm para arenitos).

Além disso, os meios porosos podem ser classificados como tendo seus poros interconectados ou não. No caso de poros interconectados, a parte sólida do meio poroso representa a fase dispersa. Por exemplo, meios porosos granulares e fibrosos apresentam poros interconectados. Também, os meios porosos podem ser naturais, como rochas e o solo, ou sintéticos, como leitos fluidizados e filtros industriais. Finalmente, outra classificação se baseia na distribuição espacial dos poros, ou dos grãos ou fibras, que podem estar distribuídos ordenadamente ou de maneira randômica, esta última abrangendo a grande maioria dos meios porosos naturais.

## **2.2 - Fluido**

Um fluido, por definição, é uma substância que se deforma continuamente sob ação de qualquer força tangencial. Nesta definição, não é levada em conta a estrutura molecular do fluido, que é composto de diversas moléculas em movimento. Os fluidos nos quais a taxa de deformação é diretamente proporcional à tensão de cisalhamento são conhecidos como newtonianos (a água é um exemplo de fluido newtoniano). A constante de proporcionalidade recebe o nome de viscosidade absoluta, ou dinâmica,  $\mu$ . Portanto, a lei de Newton é dada, para o escoamento unidimensional, pela Equação (2.1)

$$\tau_{xy} = \mu \frac{du}{dy} \quad (2.1)$$

onde  $\tau_{xy}$  é a tensão de cisalhamento e  $du/dy$  representa a taxa de deformação.

O modelo de fluido ideal (fluido invíscido) supõe viscosidade nula. Os escoamentos onde se desprezam os efeitos da viscosidade são denominados não-viscosos. Apesar de não haver fluidos sem viscosidade, em muitos casos a hipótese da inexistência das forças viscosas simplifica a análise e, ao mesmo tempo, leva a resultados práticos significativos. Em outros casos onde a camada-limite desempenha

papel fundamental, os escoamentos viscosos, de grande importância na mecânica dos fluidos (Fox & McDonald, 1995), devem ser considerados. Os regimes de escoamentos viscosos são classificados em laminar ou turbulento, tendo por base a sua estrutura. No regime laminar, a estrutura do escoamento é caracterizada pelo movimento suave em camadas.

### 2.2.1 - Porosidade e permeabilidade

A porosidade é uma das mais importantes propriedades das rochas em engenharia de petróleo, já que ela mede a capacidade de armazenamento de fluidos. Rosa et al. (2006) definem a porosidade como sendo a relação entre o volume de vazios de uma rocha e o volume total da mesma. A porosidade absoluta corresponde ao volume total de vazios, enquanto a porosidade efetiva se refere apenas aos poros conectados entre si. Os reservatórios normalmente apresentam variações horizontais e verticais de porosidade. A quantidade, tamanho, geometria e grau de conectividade dos poros controlam diretamente a produtividade do reservatório.

Costa (2001) apresenta os valores de porosidade dos materiais mais encontrados em trabalhos de campo.

Tabela 2.1. Valores de porosidade para vários materiais (Costa, 2001).

<b>Material</b>	<b>Porosidade (%)</b>
Argila comum	45 - 55
Silte	40 - 50
Mistura de areia média a grossa	35 - 40
Areia média uniforme	30 - 40
Areia fina a média	30 - 35
Pedregulho	30 - 40
Pedregulho e areia	20 - 35
Arenito	10 - 20
Xisto	1 - 10
Calcário	1 - 10

A porosidade primária (ou deposicional) é formada durante a deposição dos sedimentos, podendo ser inter - ou intragranular. Este tipo de porosidade tende a

diminuir com o soterramento, pelo efeito da compactação mecânica e da diagênese. Já a porosidade secundária forma-se após a deposição, geralmente como resultado da dissolução de minerais. A porosidade primária é mais comum em arenitos, enquanto a secundária ocorre com mais frequência nas rochas carbonáticas.

As fraturas podem aumentar consideravelmente o volume de vazios das rochas. Em reservatórios areníticos e carbonáticos as fraturas podem contribuir para o aumento da conectividade dos poros, enquanto nos folhetos, rochas ígneas e metamórficas as mesmas respondem por quase toda porosidade.

A permeabilidade de um meio poroso é uma medida de sua capacidade de se deixar atravessar por fluidos. Em outras palavras, a permeabilidade é uma medida da condutividade de fluidos de um material, sendo expressa em *Darcys* (D) ou milidarcys (mD) e raramente é a mesma em todas as direções numa rocha sedimentar, sendo geralmente maior na horizontal do que na vertical.

Uma rocha tem 1D de permeabilidade quando transmite um fluido de 1cP (centipoise) de viscosidade com uma vazão de  $1\text{cm}^3/\text{s}$ , através de uma seção de  $1\text{cm}^2$  e sob um gradiente de pressão de  $1\text{atm}/\text{cm}$ .

Segundo Rosa et al. (2006) a permeabilidade em arenitos não consolidados pode atingir valores muito altos, na faixa de 1 a 10 *Darcy*. Por outro lado, em arenitos consolidados, geralmente situados em grandes profundidades os valores de permeabilidade podem ser tão baixos quanto 1 mD. Reservatórios com permeabilidades tão baixas provavelmente não seriam portadores de hidrocarbonetos líquidos e, mesmo que o fossem, a sua exploração não seria economicamente viável devido a dificuldade de fluxo nesse tipo de meio poroso. No entanto, poderiam ser portadores de gás, já que este fluido possui maior facilidade de fluxo do que o óleo, devido à sua baixa viscosidade. De fato, é comum a produção econômica de reservatórios de gás de baixíssima permeabilidade.

Assim, enquanto um reservatório pode produzir gás com apenas alguns milidarcys, para a produção de óleo são necessários pelo menos dezenas de milidarcys. Quando mais de um fluido divide o espaço poroso (como é o caso dos reservatórios com água, óleo e/ou gás), cada fluido apresenta uma permeabilidade relativa, que varia em função da sua saturação. Ou seja, a permeabilidade é máxima (permeabilidade absoluta,  $K_a$ ) quando um fluido ocupa 100% dos poros, e decresce (permeabilidade relativa) à medida que este fluido divide o espaço poroso com outro fluido. É necessária uma saturação mínima para que um fluido consiga fluir. No caso do óleo, uma saturação

mínima em torno de 10 – 30% é necessária para que o mesmo possa fluir (permeabilidade relativa >0).

### **2.3 - Mecanismos de retenção durante o transporte de suspensões particuladas em meios porosos**

Uma prática comumente adotada na indústria do petróleo é a injeção de água em reservatórios. Os objetivos dessa prática são: deslocar o óleo em direção aos poços produtores e manter a pressão do reservatório, evitando dessa forma a queda na produção de óleo.

A água injetada contém partículas sólidas (matéria orgânica e mineral em suspensão provenientes da água do mar e/ou produzida) que podem ser capturadas pela rocha. Esse processo, conhecido como filtração profunda, pode causar dano à formação e um decaimento drástico da permeabilidade do meio poroso.

Com o decorrer do tempo ocorre uma queda de injetividade nos poços injetores, por causa da diminuição da permeabilidade da formação ao redor do poço. A queda de injetividade provoca um grande problema na indústria de petróleo, pois torna-se necessário aumentar os gastos através de intervenções como acidificação, ou da implantação de mais poços injetores para que a injetividade do reservatório não decresça, ou diminuir a produção de óleo e conseqüentemente os lucros.

Tendo isso em vista conclui-se que a modelagem do processo de filtração durante o transporte de partículas através do meio poroso é de grande importância científica e industrial. Muitas aplicações podem ser identificadas em áreas como a engenharia de petróleo, química e ambiental. Alguns exemplos são: injeção de água em reservatórios de petróleo, filtração de água e o transporte de poluentes, vírus, bactérias, entre outros, no subsolo.

A captura de partículas no meio poroso pode ocorrer por várias formas (Figura 2.1):

a) Difusão: ocorre, devido ao aumento da difusão molecular, um aumento da probabilidade de partículas brownianas (ou moleculares) serem capturadas.

b) Exclusão pelo tamanho: ocorre quando uma partícula encontra uma garganta de poro pequena.

c) Formação de pontes (bridging): ocasionado pelo acúmulo de várias partículas nas gargantas dos poros formando uma estrutura semelhante a uma ponte.

d) Deposição: devido às forças gravitacional e elétrica, as partículas podem ser desviadas da trajetória sugerida pelas linhas de fluxo e depositadas no interior do meio poroso.

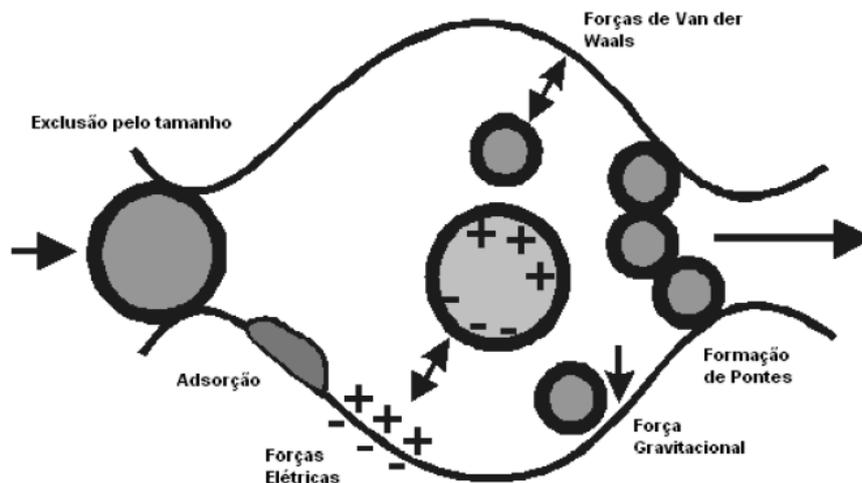


Figura 2.1 Mecanismos de retenção de partículas no meio poroso (Sallum, 2006)

O grau de importância de cada uma dessas maneiras de deposição é altamente variável, por dependerem do tipo de reservatório e da composição química e física da água injetada. Alguns exemplos desses fatores são: forças de interação entre meio poroso, fluidos e partículas sólidas em suspensão (Sharma e Yortsos, 1987a) ou oleosas suspensas, o tamanho das partículas e o tamanho das gargantas dos poros (Herzig et al, 1970, Sharma e Yortsos, 1987a), etc. Desta forma, a modelagem da retenção de partículas será diferente para diferentes valores dos parâmetros envolvidos em cada sistema.

Para um meio poroso onde a garganta dos poros seja muito maior do que o tamanho das partículas suspensas injetadas, por exemplo, o efeito de exclusão pelo tamanho exercerá um papel secundário na captura das partículas (Herzig et al, 1970).

Em um processo de filtração, parâmetros como a velocidade, a concentração de partículas, a distribuição do tamanho de partículas, a distribuição de tamanho de poros, as energias de interação (partículas - partículas e partículas - poros) e a composição do fluido e das partículas injetadas, podem determinar o(s) mecanismo(s) de retenção de partículas mais efetivo(s) (Herzig et al., 1970, Imdakm e Sahimi, 1987, Sharma e Yortsos, 1987a, Chauveteau et al., 1988).

Desta forma, a modelagem da retenção de partículas será diferente para diferentes valores dos parâmetros relevantes em cada processo. Para velocidade alta, por exemplo, os efeitos da difusão molecular e da deposição tornam-se menos efetivos (Chauveteau et al., 1998).

A base dos trabalhos clássicos (Iwasaki, 1937) no estudo do fluxo em meios porosos está na utilização de um modelo fenomenológico para prever a captura de partículas, onde os vários mecanismos de deposição das partículas não são diferenciados no processo de entupimento do meio poroso.

O trabalho acima mencionado não exibe boa concordância com os testes laboratoriais (Bradford, 2002, 2005, 2006a, 2006b, Tufenkji, 2004, Johnson et al., 2007, Barros & Santos, 2008) e não faz distinção entre os diversos mecanismos atuantes em um processo de filtração. Além disso, o modelo clássico falha, por exemplo, ao não conseguir ajustar os testes laboratoriais que mostram tempos de chegada da suspensão de partículas na saída (*breakthrough*) do testemunho diferentes de um volume poroso injetado.

A literatura mostra casos onde esse tempo de chegada varia de 0,5 até 100 volumes porosos injetados.

### **2.3.1 - Adsorção (*attachment*)**

Adsorção (*attachment*) é um conhecido mecanismo de deposição de partículas que envolve retenção de partículas por forças elétricas, gravitacionais, formação de pontes ou bridging (Yao et al, 1971) e posterior liberação de partículas retidas (*detachment*) das mesmas devido as forças de colisão e/ou do torque gerado pelas partículas suspensas no fluido injetado (Cushing and Lawler, 1998; Li et al., 2005).

Alguns autores (Harvey and Garabedian, 1991; Corapcioglu and Choi, 1996; Bolster et al., 1999; Schijven and Hassanizadeh, 2000) apresentam equações para o transporte de partículas em meios porosos envolvendo adsorção (*attachment*) e liberação de partículas retidas (*detachment*).

Nos dados experimentais tratados nesse trabalho (Bradford et al., 2002, 2005, 2006a e 2006b) o mecanismo dominante de retenção de partículas no meio poroso foi o de exclusão pelo tamanho (*straining*), mas em alguns resultados obtidos pode-se observar a provável existência de outro mecanismo de retenção. Essa ocorrência será discutida no Capítulo 6, quando será apresentado os resultados dos experimentos analisados.

### 2.3.2 - Exclusão pelo tamanho

Vários autores (Tufenkji et al., 2004; Herzig et al., 1970; Bradford et al., 2004; Matthess & Pekdeger, 1985; Siqueira, 2000; Santos & Bedrikovetsky, 2006 e 2008; Sharma & Yortsos, 1987; Shapiro, 2007) estudaram a importância da exclusão pelo tamanho e concluíram que as principais variáveis que afetam esse mecanismo de captura são a distribuição de tamanho de poros (gargantas), as ligações entre poros, a geometria dos grãos do meio poroso e a distribuição de tamanho das partículas injetadas.

De acordo com Tufenkji et al. (2004) e Sakthivadivel (1969), o mecanismo de exclusão pelo tamanho pode ser importante mesmo em meios porosos onde o diâmetro médio dos poros é bem maior do que o diâmetro das partículas. Ambos afirmam que isto ocorre devido a não-uniformidade da geometria (angularidade) dos grãos que constituem o meio poroso.

Vários autores desenvolveram critérios para medir a influência do mecanismo de exclusão durante o transporte de suspensões em meios porosos. Tais critérios dependem do diâmetro médio dos grãos ( $d_g$ ) e o diâmetro efetivo das partículas ( $d_p$ ). De acordo com estes autores, o mecanismo de exclusão pelo tamanho é relevante quando  $d_p/d_g$  é maior do que os valores apresentados na Tabela 2.2

Herzig et al. (1970) propuseram um critério considerando um meio poroso formado por esferas, onde as gargantas são formadas pelo menor espaçamento entre as esferas. Outros autores (Sakthivadivel, 1969; Bradford et al., 2003 e 2004; Matthes & Pekdeger, 1985) desenvolveram critérios a partir de experimentos laboratoriais de injeção de suspensões em meios porosos reais.

Nos dados experimentais (Bradford et al. 2002, 2005, 2006a e 2006b) estudados no presente trabalho, os valores para  $d_p/d_g$  variaram entre 0,003 e 0,017. Segundo Bradford et al. (2002), o mecanismo de exclusão pelo tamanho foi o principal mecanismo de retenção de partículas.

Dullien (1979) sugere que o mecanismo de exclusão pelo tamanho ocorre quando o tamanho das partículas em suspensão é maior do que  $1\mu\text{m}$ .

Além disso, os critérios mostrados na Tabela 2.2 (Matthess & Pekdeger, 1985 e Sakthivadivel et al., 1969) indicam a ocorrência de exclusão pelo tamanho.

Tabela 2.2. Critérios para ocorrência de exclusão pelo tamanho em função de  $d_p/d_g$ 

Autor	$d_p/d_g$
Bradford et al. (2004)	0,005
Matthess e Pekdeger (1985)	0,18
Sakthivadivel (1969)	0,05 (até 0,002 dependendo da geometria dos grãos)
Herzig et al. (1970)	0,154
Dullien (1979)	$d_p > 1\mu\text{m}$

Tendo em vista que a distribuição de poros é função da distribuição de grãos e que a influência do mecanismo de exclusão pelo tamanho depende fortemente das distribuições de tamanho de poros (gargantas) e de partículas (Bradford et al. 2002, 2003; Sharma & Yortsos, 1987; Santos et al., 2006, 2008 e Shapiro et al. 2007), é importante analisar os critérios para exclusão pelo tamanho em função da distribuição de tamanho de poros e de partículas.

A Figura 2.2 mostra que as distribuições de tamanho de poros A e B apresentam o mesmo diâmetro médio. Entretanto, ocorre exclusão pelo tamanho somente no caso de haver gargantas de poros menores do que as partículas; ou seja, no caso da distribuição de poros B. Portanto, não é adequado utilizar somente os diâmetros médios para a construção de critérios para exclusão pelo tamanho. Deve-se, ao invés disso, estabelecer critérios que envolvam as distribuições de tamanho de poros e de partículas injetadas.

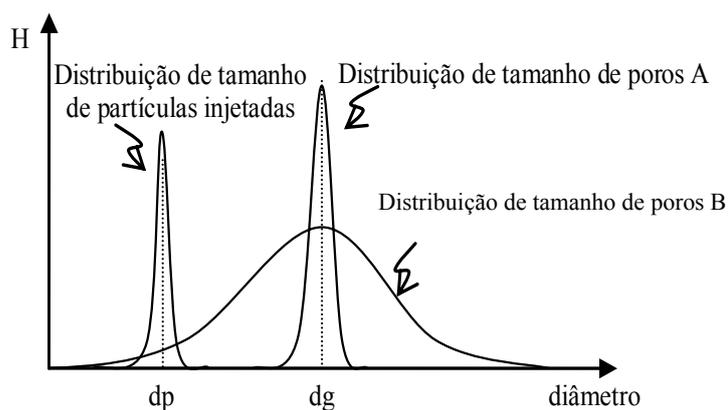


Figura 2.2. Esboço de distribuições de tamanho de poros (com o mesmo diâmetro médio) e distribuição de tamanho de partículas injetadas.

Outro ponto importante para o estudo e para a determinação dos critérios para exclusão pelo tamanho é a relação entre os tamanhos dos poros e das gargantas. A exclusão pelo tamanho ocorre, em sua grande maioria, nas gargantas e não nos poros. Vários autores (ver Tabela 2.3) estudaram a relação entre os tamanhos das gargantas e dos poros e encontraram que as gargantas podem ser entre 4 e 10 vezes menores do que os poros de uma rocha.

Tabela 2.3. Relação entre os tamanhos dos poros e das gargantas

<b>Autor</b>	<b><math>\Phi_{\text{poro}}/\Phi_{\text{garganta}}</math></b>
Sigueira, A.G., (2000)	10
Radlinski, A.P., (2004)	3,5
Quan Chen, (2003)	5
Laudone, G.M., (2007)	10

A distribuição de tamanhos de gargantas, que pode ser determinada através da curva de pressão capilar obtida no ensaio de injeção de mercúrio (discutido na secção 2.4), deve ser considerada nos critérios para ocorrência da exclusão pelo tamanho, bem como na modelagem do mecanismo de exclusão pelo tamanho.

### **2.3.3 - Relevância dos mecanismos de retenção**

O estudo dos mecanismos de retenção é de extrema importância para a determinação do modelo a ser adotado para a previsão de retenção de partículas no meio poroso.

Johnson et al. (2007) comentam que as discrepâncias entre os dados experimentais e o modelo clássico para filtração profunda deve-se ao fato do modelo clássico não traduzir fielmente os mecanismos de retenção envolvidos no transporte de suspensões em meios porosos.

As partículas capturadas no meio poroso diminuem a permeabilidade causando dano à formação. Ochi et al. (1998) mostram como a permeabilidade é influenciada pela velocidade de propagação da suspensão através de meios porosos (ver Figura 2.3).

Ochi et al. (1998) descrevem resultados de um conjunto de experiências de injeção de fluido com partículas suspensas com uma variedade de soluções de NaCl. A

concentração de NaCl foi aumentada aos poucos para se investigar a influência na queda da permeabilidade.

Neste mesmo experimento foi investigado a influência do mecanismo de retenção de partículas por exclusão pelo tamanho (*straining*) e verificou-se que esse mecanismo é mais relevante para a queda de permeabilidade do que os efeitos da salinidade (forças elétricas).

Na Figura 2.3 Ochi et al. (1998) mostram que o aumento da vazão de injeção (aumento da velocidade) causa um aumento da permeabilidade. Esse comportamento é explicado pela liberação de partículas retidas (*detachment*) devido ao aumento da força de arraste (que aumenta com a velocidade).

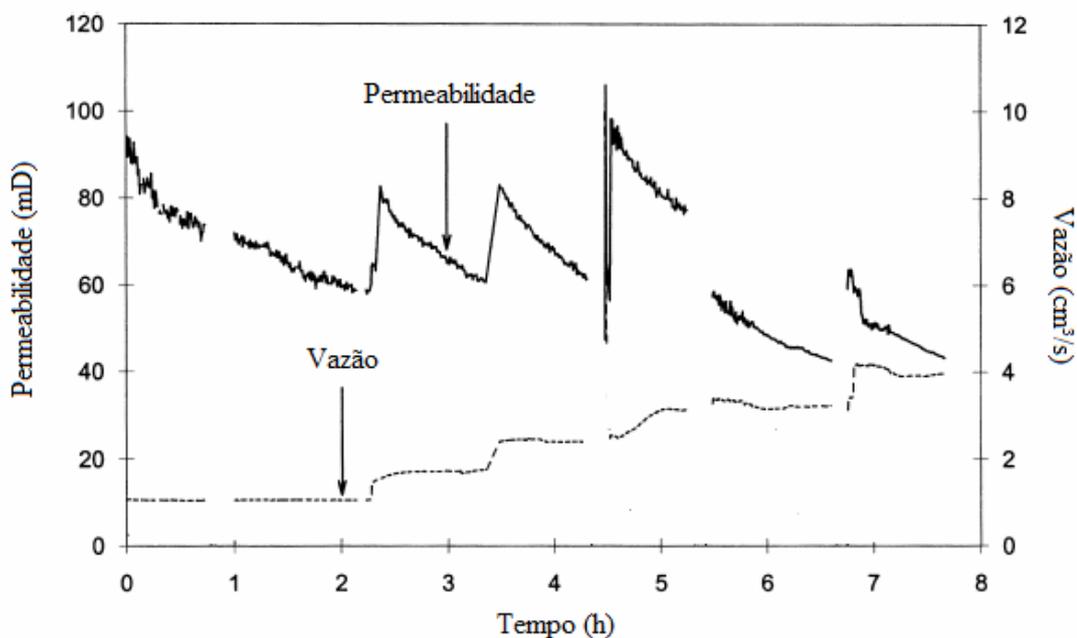


Figura 2.3. Variação de permeabilidade com a vazão (Ochi et al. (1998)).

Ahfir et al. (2007) realizaram experimentos de transporte e retenção de partículas de 14 $\mu$ m. Os experimentos foram realizados com diferentes taxas de injeção da suspensão particulada.

A distribuição de tamanho das partículas suspensas, o tipo de meio poroso e as taxas de injeção foram as principais variáveis estudadas por Ahfir et al. (2007) para investigar os mecanismos que governam o transporte de partículas.

Ahfir et al. (2007) demonstraram que a velocidade da “frente de concentração de partículas” é maior do que a velocidade da “frente de água”. Também foi observada

uma diminuição da taxa de deposição de partículas com o aumento da velocidade (ver Figura 2.4).

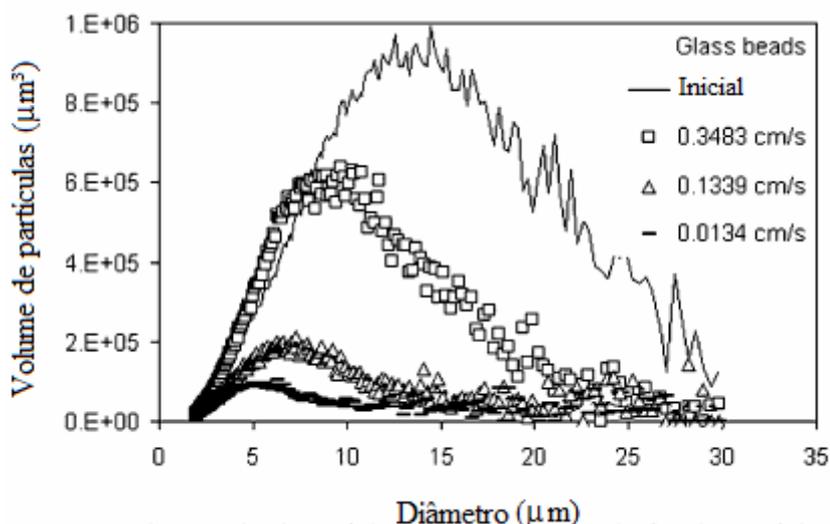


Figura 2.4. Distribuição de tamanho de partículas efluentes em função da velocidade de injeção (Ahfir et al., 2007).

A Figura 2.4 mostra que a diminuição da velocidade de injeção resulta em maior retenção de partículas no meio poroso. Além disso, quanto maior o diâmetro das partículas em suspensão mais partículas são retidas no meio poroso, sugerindo que o mecanismo de exclusão pelo tamanho tem um papel importante na retenção de partículas.

## 2.4 - Determinação da distribuição do tamanho dos poros através das curvas de pressão capilar

Os métodos de laboratório para medir a relação da pressão capilar em função da saturação,  $P_c = P_c(S)$ , onde  $S$  é a saturação da fase molhante (em nosso caso, água) e  $P_c$  é a pressão capilar, podem ser divididos em dois grupos principais:

- (1) Métodos estáticos: baseados no estabelecimento de estados sucessivos de equilíbrio hidrostático;
- (2) Métodos dinâmicos: baseados no estabelecimento de estados sucessivos de fluxo constante.

A porosimetria por injeção de mercúrio tem sido extensivamente utilizada como uma técnica experimental para se caracterizar vários aspectos (distribuição do tamanho de poros, distribuição do tamanho de gargantas, determinação da pressão capilar, etc.) dos materiais porosos.

Proposta em 1921 por Washburn, que sugeriu ser possível se obter a distribuição de diâmetros de poros a partir dos dados de pressão-volume obtidos no experimento de penetração do mercúrio em uma amostra de meio poroso.

A técnica se baseia no fato de que o mercúrio se comporta como um fluido não-molhante em relação à maior parte das substâncias. Por conseqüência, não penetra espontaneamente em pequenos poros ou fissuras destes materiais a menos que se aplique uma pressão sobre ele.

Se uma amostra de um sólido poroso é confinada num recipiente dotado de um tubo graduado, sendo feito o vácuo sobre a mesma e sendo preenchido o recipiente e o tubo com mercúrio, ao se aumentar a pressão sobre o líquido este penetrará nos poros da amostra reduzindo seu nível no tubo graduado.

Registrando-se a redução do nível de mercúrio no tubo graduado e, juntamente com a pressão aplicada, uma curva porosimétrica é obtida informando que volume de poros do material foi penetrado pelo mercúrio a uma dada pressão, a Figura 2.5 ilustra o processo de porosimetria.

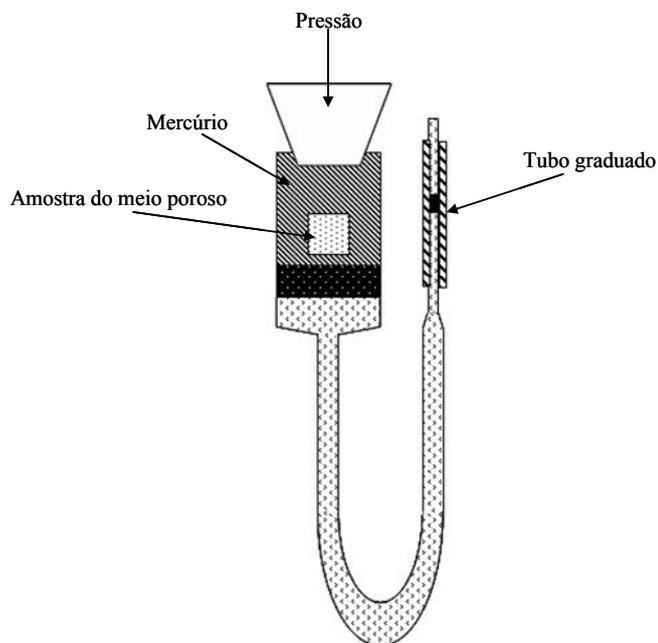


Figura 2.5. Esquema da porosimetria com mercúrio.

Em equipamentos comerciais podem ser investigados poros bem pequenos, na ordem de 0,06  $\mu\text{m}$  de diâmetro, que correspondem a uma pressão de 212 MPa (2000 atm).

A curva de pressão capilar x saturação,  $P_c(S)$ , é obtida ponto a ponto, através do deslocamento do mercúrio no tubo graduado após pequenos incrementos da pressão e da espera do equilíbrio no tubo. Algumas curvas de  $P_c(S)$  são apresentadas na seção seguinte.

Outro modo de se obter a distribuição de tamanho de poros é através da análise de imagens de lâminas (microscopia das superfícies de amostras seccionadas). Esse processo consiste em retirar lâminas do meio poroso e analisá-las no microscópio, observando os espaços vazios e os grãos que compõem o meio poroso.

Um método mais recente para a análise do meio poroso é a tomografia computadorizada (TC), onde uma amostra é analisada e a sua estrutura porosa é reconstruída através de computação gráfica.

A tomografia de raios X foi originalmente desenvolvida para uso médico, mas encontrou aplicações na indústria do petróleo. A tomografia industrial possibilita a visualização e a análise não destrutiva da estrutura interna dos corpos-de-prova. A importância da tomografia computadorizada está na capacidade de distinguir quantitativamente pequenas diferenças na atenuação da radiação no corpo examinado, de modo que esta diferença pode ser relacionada às diferenças de densidades físicas no corpo.

Os raios X são gerados por um tubo, que em um tomógrafo de quarta geração gira em torno do objeto, sendo que os raios X não atenuados são medidos por detectores colocados em direção oposta a esse tubo e convertidos para uma linguagem computacional. O computador então processa os dados para reconstruir as imagens.

#### **2.4.1 - Determinação das distribuições de poros a partir das curvas de saturação versus pressão capilar**

Dullien, (1979) mostra que a distribuição do tamanho de poros pode ser obtida através da curva de pressão capilar (Ritter and Drake, 1945). Sendo  $dV$  o volume dos poros com raio entre  $r_p$  e  $r_p + dr_p$ , segue que:

$$dV = f(r_p)dr_p \quad (2.2)$$

Aqui  $f(r_p)$  é uma função de distribuição (função densidade de probabilidade) dos raios dos poros. Usando a Equação (2.2) e considerando que o poro pode ser representado por um tubo capilar de raio  $r_p$ , a pressão capilar é dada por:

$$P_c(r_p) = -\frac{2\sigma \cos(\theta)}{r_p} \quad (2.3)$$

Além disso, a saturação de mercúrio em função dos raios dos poros é dada pela equação:

$$S(r_p) = \int_{r_p}^{\infty} f(r'_p) dr'_p \quad (2.4)$$

derivando ambos os lados da Equação (2.4) em relação a  $r_p$ , obtêm-se:

$$\frac{dS}{dr_p} = f(r_p) \quad (2.5)$$

Note (Equação (2.5)) que a saturação pode ser escrita em função do raio do poro  $r_p$ ; por outro lado as curvas obtidas na porosimetria de mercúrio representam a variação da saturação em função da pressão capilar. Como queremos determinar a função de distribuição de poros, é necessário escrever a pressão capilar em função do raio do poro (ver Equação (2.3)). Sendo assim, pode-se escrever:

$$\frac{dS}{dP_c} = \frac{dS}{dr_p} \cdot \frac{dr_p}{dP_c} \quad (2.6)$$

Da Equação (2.3), obtêm-se:

$$\frac{dr_p}{dP_c} = \frac{2\sigma \cos(\theta)}{P_c^2} \quad (2.7)$$

e  $dS/dP_c$  é determinado a partir das curvas de pressão capilar x saturação,  $S(P_c)$ . Portanto, é possível determinar a função de distribuição dos tamanhos dos poros combinando as Equações (2.3), (2.5), (2.6) e (2.7):

$$f(r_p) = - \frac{2\sigma \cos(\theta)}{r_p^2} \frac{dS(P_c)}{dP_c} \Big|_{P_c(r_p)} \quad (2.8)$$

Com a Equação (2.8) será possível calcular a distribuição dos tamanhos de poros para os meios porosos analisados através das curvas de saturação em função da pressão capilar  $S(P_c)$ .

A relação entre os tamanhos das partículas injetadas, o tamanho dos poros dos meios porosos e os mecanismos de retenção atuantes será discutido no Capítulo 6.

Seguindo a metodologia proposta por Dullien (1979), é possível construir as curvas de distribuição do tamanho dos poros partindo das curvas de pressão capilar. Um problema em se construir os gráficos da distribuição dos tamanhos de poros e/ou gargantas partindo das curvas de pressão capilar é que elas não dão quaisquer informações sobre o tamanho dos poros e das gargantas separadamente.

A informação contida nas curvas de pressão capilar x saturação é a distribuição de tamanho de espaços vazios, não fazendo distinção entre tamanho de poros e tamanho de gargantas.

Um exemplo da distorção da distribuição do tamanho de poros calculada pelas curvas de pressão capilar é apresentada na Figura 2.6, aqui a curva de distribuição de tamanho de poros calculada pela intrusão de mercúrio e comparada com a distribuição de tamanho de poros obtida por meios ópticos (lâminas).

É bom salientar que no método de análise de imagens através de lâminas é calculado o número total de vazios, e não necessariamente os tamanhos das gargantas e dos poros. Segundo Dullien (1979), o método de análise de imagens fornece uma distribuição de tamanho de diâmetros das gargantas bem menores do que os obtidos através das curvas de pressão capilar versus saturação. A Figura 2.6 mostra uma comparação entre as distribuições de tamanho de poros obtidos através porosimetria de mercúrio e da análise de lâminas.

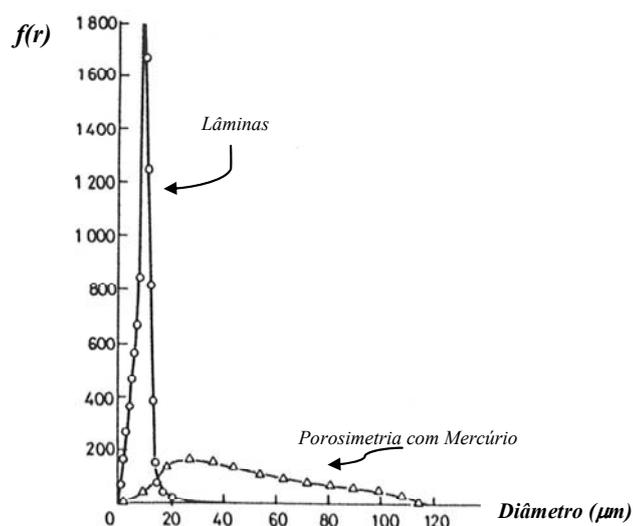


Figura 2.6. Comparação da distribuição de tamanhos de poros por porosimetria de mercúrio com a distribuição de tamanhos de poros por meios ópticos (Dullien, 1979).

É aparente na Figura 2.6 que a porosimetria de mercúrio não detecta a presença de poros maiores e atribui seu volume aos poros de entrada (gargantas). Apesar das distorções resultantes da atribuição dos volumes errados para os diâmetros dos poros, as informações contidas nas curvas de pressão capilar são muito importantes, pois as resistências oferecidas nas gargantas dos poros são importantes para o estudo do transporte de suspensões em meios porosos.

---

# Capítulo 3

## Estado da Arte

---

### 3. Estado da arte

O modelo matemático para transporte de colóide em meio poroso contém a função filtração,  $\lambda_c$ , a qual pode ser determinada pela concentração na saída.

Se a função filtração já é conhecida, a solução permite estimar o perfil de retenção de partículas. Recentemente apareceram vários estudos laboratoriais onde o perfil de retenção foi medido junto com a curva de *breakthrough*, sendo possível a verificação do modelo matemático pela comparação entre os perfis medidos e o modelo de perfil de retenção.

Neste capítulo será apresentado um modelo matemático para obtenção da função filtração  $\lambda$ , a probabilidade  $(1-p)$  das partículas serem capturadas entre dois “sítios de retenção” separados de uma distância  $\Delta$ , e a solução analítica para os modelos clássico e proposto para o estudo do transporte de suspensões em meios porosos.

#### 3.1 - Modelo clássico para filtração profunda

Durante o fluxo no meio poroso, as partículas suspensas são gradualmente retidas, reduzindo a permeabilidade do meio. Esse fenômeno é chamado filtração profunda com dano à formação

O sistema de equações clássico que descreve o processo de filtração profunda consiste das equações de balanço de massa das partículas, da cinética de captura de partículas e da lei de Darcy (Iwasaki, 1937; Herzig et al., 1970).

$$\begin{aligned} \phi \cdot \frac{\partial c(x,t)}{\partial t} + U(t) \cdot \frac{\partial c(x,t)}{\partial x} &= \phi \frac{\partial \sigma(x,t)}{\partial t} \\ \frac{\partial \sigma(x,t)}{\partial t} &= \lambda_c(\sigma) \cdot \frac{U(t)}{\phi} \cdot c(x,t) \end{aligned} \quad (3.1)$$

onde  $\lambda_c(\sigma)$  é o coeficiente de filtração adimensional para o modelo clássico que está relacionado à probabilidade de uma partícula ser capturada durante o fluxo através de uma amostra de comprimento  $L$ ;  $x$  e  $t$  são a coordenada e o tempo dimensionais, respectivamente; pode se interpretar o coeficiente de filtração como sendo o inverso da

penetração média das partículas;  $\phi$  é a porosidade;  $U(t)$  é a velocidade de Darcy (vazão por unidade de área da seção transversal ao fluxo);  $c(x,t)$  é a concentração de partículas em suspensão (número de partículas em suspensão por unidade de volume poroso);  $\sigma(x,t)$  é a concentração de partículas capturadas (número de partículas retidas por unidade de volume poroso da amostra), conforme ilustrado na Figura 3.1 . A função de dano à formação  $k(\sigma)$  relaciona a queda de permeabilidade com a retenção de partículas.

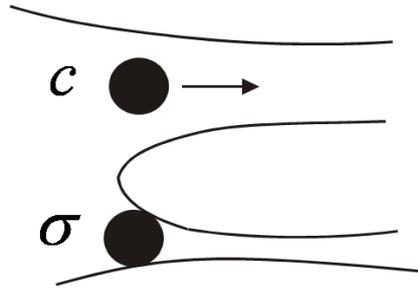


Figura 3.1. Esquema mostrando partículas em suspensão ( $c$ ) e capturadas ( $\sigma$ ) durante o transporte de suspensões em meios porosos.

Considerando que inicialmente não há partículas no interior do meio poroso e que a concentração de partículas na fase de injeção é constante ( $c_0$ ), temos:

$$\begin{cases} x = 0; c(0, t) = c_0 \\ t = 0; c(x, 0) = 0; \sigma(x, 0) = 0 \end{cases} \quad (3.2)$$

Considerando o coeficiente de filtração constante ( $\lambda_c(\sigma) = \lambda_c$ ) em conjunto com as condições iniciais e de contorno (Equação (3.2)), a solução analítica para o modelo clássico (Equação (3.1)) é dada por:

$$c(x, t) = \begin{cases} c_0 e^{-\lambda_c x}; x \leq \frac{U}{\phi} t \\ 0; x > \frac{U}{\phi} t \end{cases} \quad (3.3)$$

$$\sigma(x,t) = \begin{cases} \lambda_c c_o \left( \frac{U}{\phi} t - x \right) e^{-\lambda_c x}; x \leq \frac{U}{\phi} t \\ 0; x > \frac{U}{\phi} t \end{cases} \quad (3.4)$$

É bom salientar que esse modelo inclui somente um parâmetro ( $\lambda_c$ ), que deve ajustar simultaneamente as concentrações de partículas em suspensão e retidas ao longo do meio poroso.

Tufenkji et al. (2004) verificaram que a modelagem descrita acima mostrou grande discrepância em relação aos dados experimentais quando o mecanismo de exclusão pelo tamanho é dominante. Além disso, Tufenkji et al. (2004) mostraram que, quando existem forças repulsivas entre as partículas em suspensão e o meio poroso, a modelagem clássica também não ajusta bem os dados experimentais; Outro fator a ser considerado é que o modelo clássico não leva em consideração as distribuições de tamanho de partículas e de poros.

Sendo  $T$  (pvi) e  $X$  o tempo e a coordenada adimensionais, respectivamente, é possível reescrever as Equações (3.3) e (3.4) da seguinte forma:

$$c(X,T) = \begin{cases} c_o e^{-\lambda LX}; X \leq T \\ 0; X > T \end{cases} \quad (3.5)$$

$$\sigma(X,T) = \begin{cases} \lambda L c_o (T - X) e^{-\lambda LX}; X \leq T \\ 0; X > T \end{cases} \quad (3.6)$$

onde:

$$T = \frac{Ut}{L\phi}; \quad X = \frac{x}{L} \quad (3.7)$$

De forma geral, quanto maior a concentração de partículas retidas, menor a permeabilidade local. Na engenharia de petróleo, por exemplo, é bastante comum utilizar:

$$k(\sigma) = \frac{k_0}{1 + \beta\sigma} \quad (3.8)$$

onde  $k(\sigma)/k_0$  é conhecida como função de dano à formação,  $k_0$  é a permeabilidade inicial e  $\beta$  é conhecido como coeficiente de dano à formação.

### 3.1.1 - Determinação experimental de $\lambda_c$ para o modelo clássico (solução do problema inverso)

As Figuras 3.2 e 3.3 ilustram os procedimentos para a determinação da curva de *breakthrough* e da concentração de partículas retidas ao longo do meio poroso. Para a medida da concentração de partículas retidas em função da distância “x” em relação à face de entrada, a amostra é seccionada em várias partes, conforme ilustrado na Figura 3.3.

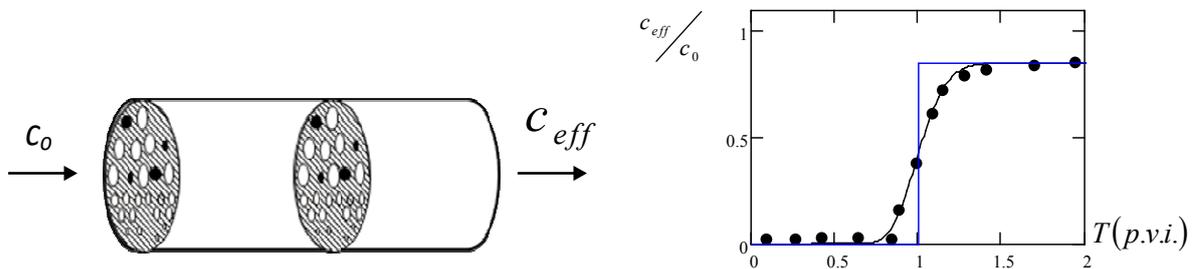


Figura 3.2. Ilustração do experimento para a determinação da curva de *breakthrough*.

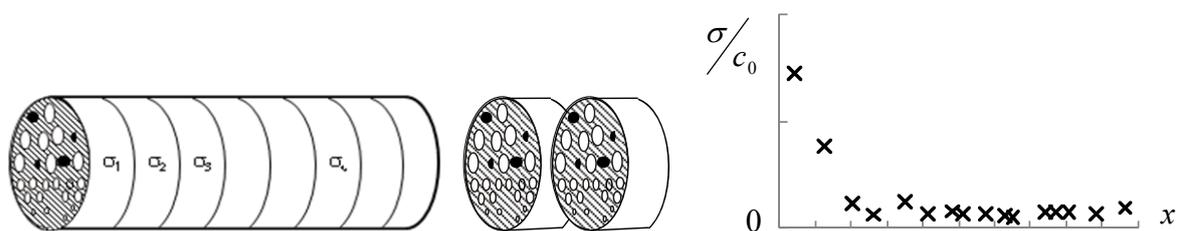


Figura 3.3. Concentração de partículas retidas ao longo de uma amostra de rocha.

É bom lembrar que a exclusão das partículas pelo tamanho ocorre em sua grande maioria das vezes nas gargantas do meio poroso. Através das curvas de pressão capilar

x saturação é possível determinar as distribuições de tamanhos de gargantas no meio poroso, conforme será discutido no capítulo seguinte.

A Equação (3.5) mostra que a frente de deslocamento da concentração de partículas se move com velocidade adimensional igual a um ( $X/T = 1$ ); ou seja, a velocidade média das partículas ( $v_p$ ) é igual à velocidade média da água ( $U/\phi$ ). A Equação (3.5) permite ainda o cálculo do coeficiente de filtração,  $\lambda_c$ , para a modelagem clássica.

O valor numérico do coeficiente de filtração,  $\lambda_c$ , é determinado experimentalmente através da Equação (3.9) dada a seguir.

$$\lambda_c = -\frac{1}{L} \cdot \ln\left(\frac{c_{eff}}{c_o}\right) \quad (3.9)$$

O valor referente a  $c_{eff}/c_o$  é determinado pelas curvas de *breakthrough* apresentadas por Bradford et al (2002, 2005, 2006 e 2006b).

Vários autores (Herzig et al., 1970, Bedrikovetsky et al., 2002, 2004) discutiram diferentes formas para o coeficiente de filtração em função da concentração de partículas capturadas e propuseram soluções analíticas explícitas para alguns casos particulares.

No caso da captura de partículas pelo mecanismo de exclusão pelo tamanho, quanto maiores forem as partículas e menores forem os poros, maior é a taxa de captura de partículas em suspensão e, conseqüentemente, maior é o dano à formação. Vários autores (Sharma e Yortsos, 1987, A. Suri e M. Sharma 2001, Payatakes et al, 1973 e 1974) sugerem que, quando o mecanismo de exclusão pelo tamanho é dominante, as distribuições de tamanho de poros e de partículas em suspensão desempenham um papel fundamental no processo de filtração profunda.

Entretanto, no modelo clássico, Equação (3.1), não são consideradas as distribuições de tamanho de poros e de partículas. Por outro lado, se o tamanho dos poros e das partículas em suspensão for aumentado simultaneamente, a taxa de captura pelo mecanismo de exclusão pelo tamanho não deveria ser afetada.

Vários trabalhos (Tufenkji et al., 2004; Elimelech et al., 1997, Bradford et al., 2002) mostraram que a previsão da modelagem clássica para a concentração de partículas retidas exhibe discrepâncias em relação aos dados experimentais.

Algumas dessas discrepâncias têm sido atribuídas a rugosidade (Kretzschmar et al., 1997; Redman et al., 2001) e a heterogeneidade da carga ao longo do meio poroso (Johnson and Elimelech, 1995). Além disso, algumas discrepâncias entre a teoria e os dados experimentais também podem ser atribuídas ao fato da modelagem clássica não levar em conta a retenção de partículas por exclusão pelo tamanho (*straining*).

Exclusão pelo tamanho ocorre quando algumas gargantas de poro são muito pequenas para permitir a passagem de partículas em suspensão. A intensidade da retenção de partículas por *straining* depende principalmente das distribuições de tamanho de poros e de partículas em suspensão (Matthess & Pekdeger, 1985; Sharma & Yortsos, 1987; Santos et al., 2006, 2008).

### **3.2 - Modelo estocástico**

Sharma e Yortsos (1987a) desenvolveram equações básicas para o balanço de populações durante o transporte de suspensões particuladas através do meio poroso. O modelo considera variações nas distribuições de tamanho de partículas e de poros devido a diferentes mecanismos de captura. Também é suposto que todo o espaço poroso é acessível para todas as partículas e que as populações de partículas movem-se com a velocidade média do fluido percolante.

No caso de um meio poroso com uma distribuição uniforme de tamanho de poros, esta consideração resulta num processo de filtração profunda independente para todos os tamanhos de partículas (Santos et al., 2005, 2006). Entretanto, no mecanismo de exclusão pelo tamanho, partículas menores que o raio dos poros devem ser transportadas sem ser capturadas e partículas maiores que o raio dos poros não devem entrar no meio poroso.

Santos et al. (2006) desenvolveram um modelo estocástico para a filtração profunda e concluíram que devido ao mecanismo de exclusão pelo tamanho, as partículas podem passar somente através de poros maiores; isto é, apenas uma fração da porosidade está acessível para as partículas. Portanto, as partículas são efetivamente transportadas pela fração de água fluindo através do espaço poroso acessível, isto é, o fluxo de água transportando partículas de um dado tamanho é apenas uma fração do fluxo total de água.

Os efeitos da acessibilidade do espaço poroso e da redução de fluxo de partículas devido ao tamanho finito das moléculas de polímeros foram observados e matematicamente descritos para o transporte de polímeros em rochas (Bartelds et al, 1997; Dawson e Lantz, 1972).

Massei et al. (2002) fizeram experimentos injetando pulsos de partículas em meios porosos e também observaram que a velocidade média das partículas pode ser significativamente diferente da velocidade média do fluido percolante.

Shapiro et al., (2007) desenvolveu um modelo estocástico considerando o entupimento parcial dos poros.

Santos et al., (2008) calculam a previsão analítica do declínio de permeabilidade durante a microfiltração em membranas. A previsão foi baseada na distribuição de tamanho de partículas em suspensão e na distribuição de tamanho de poros e não incluiu nenhum parâmetro empírico. A modelagem mostrou boa concordância com os dados experimentais, validando a cinética estocástica de retenção de partículas e de bloqueio dos poros.

### 3.3 - Modelos de rede

Vários modelos de rede, incluindo diferentes mecanismos físicos de retenção de partículas, foram desenvolvidos por Imdakm e Sahimi (1987), Payatakes *et al.* (1973, 1974), Sahimi *et al.* (1990, 1991), Rege e Fogler (1988), Siqueira (2000), entre outros.

Imdakm et al (1987) utilizaram o método de Monte Carlo para modelar apenas o efeito da exclusão pelo tamanho no dano à formação. Neste caso, o meio poroso foi representado por uma rede quadrada bidimensional, onde as gargantas dos poros são representadas pelas ligações da rede. O modelo estudado pressupõe que os poros são tubos capilares cilíndricos de raio  $r_p$ , distribuídos segundo a função de distribuição de probabilidade de Rayleigh  $f(r_p) = 2\alpha^2 r_p \cdot \exp(-\alpha^2 r_p^2)$ , onde  $\alpha$  é uma característica do raio do poro.

Além disso, foi considerado que as partículas injetadas são esféricas e se distribuem de acordo com a distribuição de Rayleigh ou segundo uma distribuição uniforme.

Como os poros são representados por tubos capilares, o fluxo em um poro de raio  $r_p$  é proporcional a  $r_p^4$  (Poiseuille). Desta forma, a probabilidade de uma partícula encontrar uma garganta será proporcional à porção de fluxo que está passando por ela.

Quanto maior o raio da garganta, maior será o fluxo. Sendo assim, maior será a probabilidade da garganta ser acessada. Após a partícula ter “selecionado” um poro, seu raio efetivo ( $r_s$ ) é comparado com o raio do poro ( $r_p$ ). Se  $r_s < r_p$ , a partícula passa, senão ela é capturada.

Devido à excelente concordância com os resultados experimentais analisados, eles concluíram que o mecanismo dominante na queda de permeabilidade é a exclusão pelo tamanho. Os resultados obtidos no modelo descrito acima indicam que o dano à formação depende da distribuição de tamanho de poros, da topologia do meio poroso, da distribuição do tamanho de partículas injetadas e da concentração de partículas.

O grau de semelhança entre a permeabilidade da rede e a do meio poroso real irá depender muito das considerações adotadas no modelo, onde os atributos mais importantes da estrutura porosa real são sua morfologia (tamanho e forma dos poros), topologia (relações de conectividade dos poros entre si) e suas propriedades de percolação (Dullien, 1979; Ioannidis *et al.*, 1997).

Em geral, com os modelos de rede tenta-se determinar as propriedades macroscópicas do sistema incorporando as heterogeneidades do meio na escala de poros. Eles são os únicos modelos que levam em conta a conectividade do meio, o que lhes possibilita prever com maior acerto a permeabilidade e o comportamento durante o transporte de partículas através do espaço poroso (Sahimi *et al.*, 1990).

A principal desvantagem dos modelos de rede é o esforço computacional requerido, o que limita o tamanho da rede a ser processada.

---

# Capítulo 4

## Modelagem Estatística

---

## 4. Modelagem Estatística

Neste capítulo a modelagem estatística para a filtração profunda é desenvolvida e as soluções analíticas, bem como a solução do problema inverso, são calculadas.

O modelo estatístico é discutido e utilizado para prever a concentração de partículas em suspensão e retidas ao longo de meios porosos. O modelo estatístico incorpora a distância entre os “sítios de retenção” ( $\Delta$ ) e a probabilidade de captura de partículas em suspensão ( $q = 1-p$ ) durante o processo de filtração.

### 4.1 - Modelo proposto para filtração profunda

Com o intuito de entender as discrepâncias observadas entre os dados experimentais e a modelagem clássica, um modelo estatístico para a filtração em meios porosos é apresentado nesta seção.

Considere que durante a filtração uma partícula em suspensão tem uma probabilidade “ $p$ ” de efetuar um deslocamento  $\Delta$  num intervalo de tempo  $\tau$ . Além disso, suponha que a cada intervalo de tempo  $\tau$  exista uma probabilidade “ $q$ ” de a partícula ser capturada (ver Figura 4.1). Sendo assim, a equação:

$$p + q = 1 \quad (4.1)$$

garante a conservação da massa.

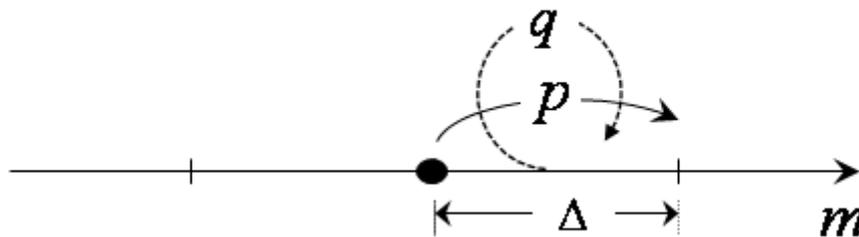


Figura 4.1. Esquema mostrando o deslocamento  $\Delta$  de uma partícula no meio poroso.

Aqui estão representadas as probabilidades de uma partícula ser capturada ( $q$ ) ou de continuar em suspensão ( $p$ ). (Santos, 2008)

Para determinar a penetração média de uma partícula em um meio poroso, a probabilidade de uma partícula ser capturada após  $m$  deslocamentos é definida como:

$$Q_m = p^m q, \text{ para } N \geq m, \quad (4.2)$$

onde:

$$m = \frac{x}{\Delta}; N = \frac{t}{\tau}. \quad (4.3)$$

Portanto, após um tempo  $t (= N\tau)$ , o deslocamento médio  $\langle m \rangle (= \langle x \rangle / \Delta)$  que uma partícula efetuará até ser capturada é dado por:

$$\langle m \rangle = \sum_{m=0}^N m p^m q. \quad (4.4)$$

A Equação (4.4) pode ser reescrita na seguinte forma:

$$\langle m \rangle = q p \frac{\partial}{\partial p} \sum_{m=0}^N p^m. \quad (4.5)$$

O somatório no lado direito da Equação (4.5) é igual à soma de uma progressão geométrica de razão  $p$ , portanto:

$$\sum_{m=0}^N p^m = \frac{1 - p^{N+1}}{1 - p}. \quad (4.6)$$

Substituindo as Equações (4.6) e (4.3) na Equação (4.5), podemos determinar a distância média que a partícula terá percorrido, antes de ser capturada:

$$\langle x(t) \rangle = \left( \frac{p\Delta}{1-p} \right) - \left( \frac{p\Delta}{1-p} + p\Delta \frac{t}{\tau} \right) p^{\frac{t}{\tau}} \quad (4.7)$$

Para calcular a máxima penetração da partícula no meio poroso, basta tender o tempo ( $t$ ) para infinito na Equação (4.7):

$$\langle x \rangle_{\max} = \lim_{t \rightarrow \infty} \langle x(t) \rangle = \frac{p\Delta}{1-p}. \quad (4.8)$$

Por outro lado, a probabilidade  $P(m,N)$  de uma partícula realizar “ $m$ ” deslocamentos após um tempo  $t (=N\tau)$  (ver Figura 4.2)) é dada por:

$$P(m,N) = \begin{cases} p^m; N \geq m \\ 0; N < m \end{cases} \quad (4.9)$$

onde  $m$  e  $N$  são dados na Equação (4.3).

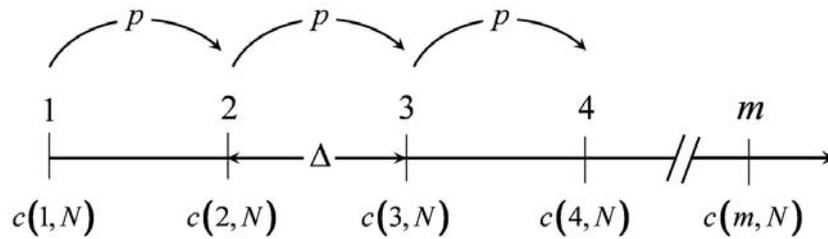


Figura 4.2. Ilustração do transporte de suspensões em meios porosos (Santos, 2008).

Com o objetivo de comparar o modelo proposto com o modelo clássico, vamos considerar que inicialmente ( $t = 0$ ) não há partículas no interior do meio poroso e que a concentração de partículas injetada na entrada do meio poroso é constante ( $c_o$ ), ou seja:

$$\begin{cases} m > 0; t = 0; c = \sigma = 0 \\ m = 0; c = c_o \end{cases} \quad (4.10)$$

Combinando (4.9) com as condições iniciais e de contorno (4.10), segue que:

$$c(m,N) = \begin{cases} c_o p^m, N \geq m \\ 0, N < m \end{cases} \quad (4.11)$$

Por outro lado, a concentração de partículas retidas é cumulativa, ou seja, tem-se que somar todas as partículas retidas longo do tempo (ver Figura 4.2). Portanto:

$$\begin{aligned}
 \sigma(1, N) &= c(0,0)q + c(0,1)q + c(0,2)q + \cdots + c(0, N)q \\
 \sigma(2, N) &= c(1,0)q + c(1,1)q + c(1,2)q + \cdots + c(1, N)q \\
 &\vdots \\
 \sigma(m, N) &= c(m-1,0)q + c(m-1,1)q + \cdots + c(m-1, N)q
 \end{aligned} \tag{4.12}$$

Substituindo (4.11) em (4.12), obtém-se:

$$\sigma(m+1, N) = \sum_{n=m}^N c_0 p^n q = (1-p)c_0(N-m)p^m \quad \text{para } N > m. \tag{4.13}$$

As Equações (4.13) e (4.11) representam as concentrações de partículas retidas e em suspensão, respectivamente, para o caso discreto. Substituindo a Equação (4.3) nas Equações (4.11) e (4.13), é possível determinar a concentração de partículas para o tempo ( $t$ ) e posição ( $x$ ):

$$c(x, t) = \begin{cases} c_0 e^{-\lambda x}; & x \leq v_p t \\ 0; & x > v_p t \end{cases} \tag{4.14}$$

$$\sigma(x, t) = \begin{cases} \lambda^* (v_p t - x) c_0 e^{-\lambda x}; & x \leq v_p t \\ 0; & x > v_p t \end{cases} \tag{4.15}$$

onde:

$$\lambda = -\frac{1}{\Delta} \ln(p), \tag{4.16}$$

$$\lambda^* = \frac{1-p}{p\Delta}, \tag{4.17}$$

$$v_p = \frac{\Delta}{\tau}. \tag{4.18}$$

Nas Equações (4.16) - (4.18)  $\lambda$  e  $\lambda^*$  são os coeficientes de filtração (clássico e modificado, respectivamente) e  $v_p$  é a velocidade de transporte da partícula no meio poroso. Vários autores (Dawson & Lantz, 1972; Bartelds et al., 1997; Massei et al.,

2002; Santos et al., 2006, 2008) mostraram que, devido a diferentes mecanismos físicos, a velocidade de propagação da “frente de concentração” de partículas pode ser diferente da velocidade da “frente de água” em meios porosos.

Comparando as Equações (4.17) e (4.8), pode-se concluir que:

$$\lambda^* = \frac{1}{\langle x \rangle_{\max}}, \quad (4.19)$$

ou seja, o coeficiente de filtração modificado ( $\lambda^*$ ) é o inverso da máxima penetração média da partícula durante a filtração em meios porosos.

Utilizando uma metodologia proposta por Barros & Santos (2008), o coeficiente  $\lambda^*$  pode ser determinado a partir de dados experimentais. Portanto, a Equação (4.19) pode ser aplicada para estimar a penetração média das partículas durante a injeção de suspensões particuladas em meios porosos.

Na indústria do petróleo, por exemplo, este fato pode ser aplicado para estimar a quantidade de ácido que deve ser injetado durante uma operação de *workover* para remover o dano em poços injetores de água.

Combinando as Equações (4.16) e (4.17), segue que:

$$\frac{\lambda^*}{\lambda} = \frac{p-1}{p \ln p}. \quad (4.20)$$

Comparando as Equações (4.14) e (3.3), verifica-se que a solução para a concentração de partículas em suspensão é a mesma para ambos os modelos (proposto e clássico). Entretanto, a Equação (4.20) mostra que quanto menor o valor da probabilidade  $p$ , maior o valor de  $\lambda^*/\lambda$  e, portanto, maior o desvio do modelo proposto em relação ao modelo clássico (comparar Equações (4.15) e (3.4)). Fazendo-se o limite de  $p$  tendendo para 1 na Equação (4.20), obtemos:

$$\lim_{p \rightarrow 1} \frac{\lambda^*}{\lambda} = 1. \quad (4.21)$$

Portanto, comparando a Equação (4.15) com a Equação (3.4) conclui-se que o modelo proposto tende para o modelo clássico somente quando a probabilidade de captura  $q$  tende para zero (ou seja,  $p \rightarrow 1$ ). Além disso, é importante salientar que na

modelagem clássica a velocidade média de transporte das partículas é considerada igual à velocidade média da água; ou seja,  $v_p = U/\phi$ .

Substituindo a Equação (4.1) na Equação (4.16) e fazendo  $q \rightarrow 0$ , segue que:

$$\lim_{q \rightarrow 0} \lambda = \frac{q}{\Delta}, \quad (4.22)$$

ou seja, quando a probabilidade de captura tende para zero, o coeficiente de filtração é igual a probabilidade de captura por unidade de distância percorrida pela partícula.

De acordo com o modelo proposto, a filtração em meios porosos depende da probabilidade de captura ( $q$ ) e da distância entre os “sítios de retenção” ( $\Delta$ ). De modo geral, esses dois parâmetros não podem ser agrupados em um só coeficiente de filtração ( $\lambda$ ), como sugerido pelo modelo clássico.

No Capítulo 6 as previsões dos modelos clássico e proposto são comparadas, permitindo concluir que o modelo proposto explica algumas discrepâncias encontradas quando o modelo clássico é utilizado para a modelagem do transporte de suspensões em meios porosos.

O valor para  $\lambda$  no modelo proposto é numericamente igual ao valor de  $\lambda_c$  (coeficiente de filtração para o modelo clássico, comparar Equações (4.14) e (3.3)) e a concentração de partículas livres,  $c(x,t)$ , para o modelo proposto é, também, numericamente igual ao modelo clássico; entretanto o ajuste oferecido para a concentração de partículas retidas pelo modelo proposto apresenta um novo parâmetro de ajuste,  $\lambda^*$ , o que permite ajustar a Equação (4.15) com dois parâmetros,  $\lambda$  e  $\lambda^*$ , que dependem de  $p$  e  $\Delta$ ; em contrapartida o modelo clássico apresenta apenas um parâmetro de ajuste,  $\lambda$ , para ajustar as Equações (3.4), o que permite prever que o ajuste do modelo proposto será mais fiel aos dados experimentais, conforme será visto no Capítulo 6.

#### **4.1.1 - Determinação experimental de $\lambda$ e $\lambda^*$ para o modelo proposto (solução do problema inverso)**

O ajuste dos dados experimentais para o modelo proposto é feito através das Equações (4.14) e (4.15), e para determinar os valores de  $c(x,t)$  e  $\sigma(x,t)$  é necessário encontrar os valores de  $\lambda$  e  $\lambda^*$ , que por sua vez dependem de  $p$  e de  $\Delta$ .

Os valores de  $\lambda$  para o modelo proposto são numericamente iguais aos valores de  $\lambda_c$  para o modelo clássico, e podem ser determinados experimentalmente através das curvas de *breakthrough* e de acordo com a Equação (3.3).

Com os dados experimentais publicados por Bradford et al (2002, 2005, 2006a e 2006b) e com a Equação (4.15) é possível determinar o melhor ajuste através do valor de  $\lambda^*$ . Para obter o valor  $\lambda^*$  foi criado um programa no Mathcad 13 que permite calcular o melhor valor para  $\lambda^*$  através do método dos mínimos quadrados.

Para melhor comparar os resultados obtidos pelas previsões do modelo estatístico com os resultados da literatura as Equações (4.14) e (4.15) são adimensionalizadas.

$$c(X, T) = \begin{cases} c_o e^{-\lambda L X}; & X \leq \alpha T \\ 0; & X > \alpha T \end{cases} \quad (4.23)$$

$$\sigma(X, T) = \begin{cases} \lambda^* L c_o (\alpha T - X) e^{-\lambda L X}; & X \leq \alpha T \\ 0; & X > \alpha T \end{cases} \quad (4.24)$$

onde  $X$  e  $T$  são dados na Equação (3.7). Além disso  $\alpha$  é o desvio da velocidade média das partículas ( $v_p$ ) em relação à velocidade média da água ( $U/\phi$ ):

$$\alpha = \frac{v_p}{\left(\frac{U}{\phi}\right)} \quad (4.25)$$

De acordo com a Equação (4.23), a frente de deslocamento da concentração de partículas se move com velocidade adimensional  $\alpha (=X/T)$  que, em geral, é diferente de um; ou seja, a velocidade média das partículas ( $v_p$ ) é diferente da velocidade média da água ( $U/\phi$ ). Este efeito foi observado em vários testes experimentais (Bartelds et al., 1997; Massei et al., 2002; Bradford et al., 2002) e modelado matematicamente por diferentes autores (Dawson & Lantz, 1972; Bartelds et al., 1997; Santos et al., 2006).

A velocidade adimensional  $\alpha$  pode ser obtida diretamente das curvas de breakthrough (ver Figura 4.3); pois, quando  $X = 1$ ,  $\alpha$  é igual ao inverso do tempo adimensional de chegada ( $T_{br}$ ), ou seja:

$$\alpha = \frac{1}{T_{br}}. \quad (4.26)$$

Se a velocidade média das partículas for igual à velocidade média da água, o valor de  $\alpha$  é igual a 1; pois, neste caso,  $T_{br} = 1$  pvi.

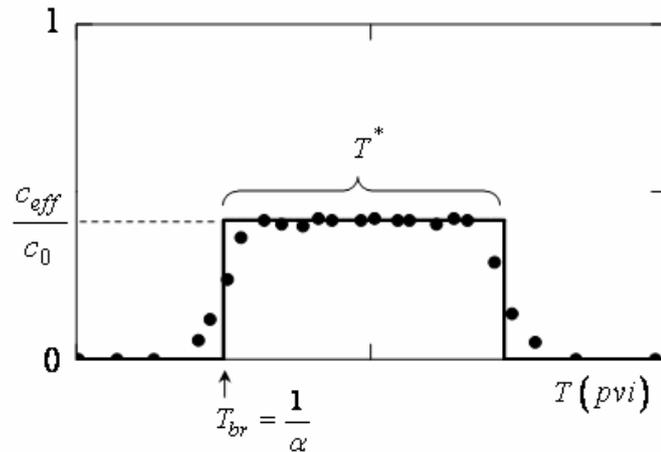


Figura 4.3 Esquema mostrando a determinação dos parâmetros  $T^*$ ,  $\alpha$  e  $c_{eff}/c_0$ . (Barros e Santos, 2008).

O tempo total de injeção da suspensão particulada ( $T^*$ ) também pode ser obtido através das curvas de *breakthrough*, conforme mostrado na Figura 4.3. É bom salientar que, mesmo quando é cessada a injeção do fluido com partículas suspensas, ainda existem partículas em suspensão no interior da amostra; portanto, será necessário injetar aproximadamente mais 1 *p.v.i.* para que todas as partículas suspensas “atravessem” a amostra.

Para  $X \leq \alpha T$ , a Equação (4.24) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\ln\left(\frac{\sigma}{c_0}\right) = \ln\left(\lambda^* L(\alpha T - X)\right) - \lambda L X; \quad X \leq \alpha T. \quad (4.27)$$

O coeficiente de filtração  $\lambda$  pode ser obtido através da Equação (4.14) (que pode ser escrita na forma da Equação (4.23)), onde a concentração relativa  $c_{eff}/c_0$  é obtida conforme mostrado na Figura 4.3. Por outro lado, o coeficiente  $\lambda^*$  pode ser determinado a partir do ajuste da Equação (4.27) aos dados experimentais de concentração de partículas retidas ao longo do meio poroso durante o tempo total de injeção da suspensão ( $T^*$ ). Para encontrar o melhor ajuste das Equações (4.16) e (4.27) aos dados experimentais foi aplicado o método dos mínimos quadrados.

Comparando as Equações (3.6) e (4.24), nota-se que quanto maior a diferença entre  $\lambda$  e  $\lambda^*$ , maior é a discrepância entre as modelagens clássica e estatística. Portanto, quanto maior a probabilidade de captura (ou seja, menor  $p$ ), maior a discordância entre as previsões do modelo estatístico (Equações (4.23) e (4.24)) e do modelo clássico (Equações (3.5) e (3.6)).

---

# Capítulo 5

## Materiais e Métodos

---

## 5. Materiais e Métodos

Neste capítulo vários experimentos de filtração profunda em meios porosos são descritos. Experimentos que deram origem aos dados para comparação entre o modelo clássico e o modelo proposto. Dois experimentos foram realizados com o intuito de obter dados significativos e conclusivos para a comparação entre modelos.

Aqui é explicado como cada experimento foi realizado e que parâmetros foram analisados. São apresentados, também, os equipamentos envolvidos para a formação das amostras dos meios porosos e os equipamentos utilizados para realização das medições de concentração de partículas suspensas e partículas retidas no meio poroso.

### 5.1 - Experimentos de injeção de suspensões particuladas em meios porosos

Nesta seção os experimentos são descritos de maneira geral e nas subseções os mesmos são detalhados.

Os testes laboratoriais conduzidos nos estudos do Bradford et al. (2002, 2005, 2006a e 2006b) consistem na injeção de água com partículas em suspensão numa coluna porosa. A concentração na saída foi monitorada e a concentração de partículas retidas ao longo da coluna foi medida prontamente depois da coluna ter sido inundada com a água com partículas em suspensão.

O colóide foi traçado (marcado) com bromido. Colóides de látex fluorescente foram usadas como partículas modelo no estudo experimental apresentado aqui. O tamanho das partículas (0,45, 1,0, 1,1, 2,0, 3,0 e 3,2 $\mu$ m) foi selecionado de forma a estar consistente com o tamanho típico de bactérias patogênicas.

As baixas concentrações de partículas em suspensão, na ordem de  $10^9$  -  $10^{11}$   $N.L^{-1}$ , foram selecionadas para minimizar qualquer redução na permeabilidade no meio poroso e promover a cada coluna uma massa de partículas aproximadamente igual (3,28 mg) durante os testes a partir de diferentes velocidades de fluxo, aqui  $N.L^{-1}$  é o número de partículas em suspensão por litro.

Areias Ottawa com variações granulométricas foram usadas como solo nas colunas experimentais utilizadas por Bradford et al. (2002, 2005, 2006a e 2006b). A média dos raios dos poros variou de 5 a 100 $\mu$ m.

As areias Ottawa e as partículas possuem uma rede de carga superficial negativa para manter o *pH* neutro. Dessa forma interações atrativas eletrostáticas entre as partículas e a maioria do meio poroso são mínimas.

No estudo de Bradford et al. (2006) uma série de colunas experimentais foi usada para explorar a influência da concentração de colóides na entrada (2,0, 1,0, 0,5, e 0,25 vezes uma concentração de referência ( $3,86 \times 10^{10} \text{ N.L}^{-1}$ )).

## **5.2 - Determinação experimental dos parâmetros do modelo proposto**

Na Seção 4.1 é apresentado o modelo físico para fluxo de água com partículas suspensas sujeitas a retenção no meio poroso. Durante o fluxo no meio poroso, as partículas suspensas são gradualmente retidas, obstruindo os poros de menor diâmetro e, conseqüentemente, reduzindo a permeabilidade do meio, esse fenômeno é chamado de filtração profunda.

Conforme discutido no Capítulo 3, a equação do balanço de massa considerando a concentração de partículas suspensas (*c*) e retidas (*σ*) é dada pela Equação (3.1). Quando uma partícula é capturada por exclusão pelo tamanho um poro “pequeno” é obstruído alterando a fração de poros pequenos e, conseqüentemente alterando a probabilidade de captura. Portanto, em geral, a probabilidade de captura depende da fração de poros pequenos, que por sua vez, depende da quantidade de partículas capturadas.

Neste trabalho, estamos considerando que o número de poros é muito grande em relação a quantidade de partículas injetadas e que a probabilidade de captura pode ser considerada constante. Portanto,  $\lambda(\sigma)$  e *p* podem ser considerados constantes.

Como descrito anteriormente (Equações (4.23) e (4.24)) os valores de  $\lambda$  e  $\lambda^*$  podem ser determinados a partir dos gráficos de concentração na saída da amostra e de concentração de partículas retidas. A partir destes parâmetros obtém-se a probabilidade *p* e a distância  $\Delta$ .

### **5.2.1 - Experimento 01**

Esse experimento foi conduzido por Bradford et al. (2002) e partículas de látex fluorescente (Interfacial Dynamics Company, Portland, Oregon), foram utilizadas como modelo nos estudos experimentais apresentados no experimento.

Estas partículas esféricas foram empregadas em estudos anteriores de transporte de partículas relatados na literatura [Elimelech e O'Melia, 1990; Wan e Wilson, 1994a,

1994b; Reimus, 1995]. Partículas amarelas-verdes (excitação a 490 nm e emissão em 515 nm) foram escolhidas porque elas podem ser iluminadas de modo mais eficiente do que outros tipos de cor.

Essas partículas são marcadas para uma melhor visualização posterior das partículas que ficaram retidas no meio poroso, como pode ser observado na Figura 5.1 (os pontos mais claros representam as partículas retidas).

As areias Ottawa e esferas de vidro (*glass beads*) foram selecionadas como representantes do material do aquífero de forma a abranger um leque considerável de características da granulometria da distribuição do solo. As diversas areias Ottawa serão designadas aqui como 2030, 3550, MIX, e 70110; a forma como é designada as areias Ottawa significam as peneiras nas quais as amostras do meio poroso foram formadas.

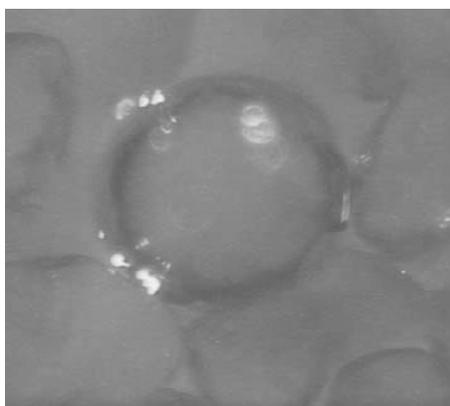


Figura 5.1. Partículas de 3µm retidas no meio poroso 70110 (Bradford et al., 2005).

O meio poroso 2030, por exemplo, é composto 100% pelo material retido na peneira F20-F30, que resultou em um meio poroso com diâmetro médio dos grãos ( $d_{50}$ ) de 0,71mm e grau de uniformidade 1,21. A composição dos meios porosos 2030, 3550, MIX, 70110 e GB (*glass beads*) podem ser observadas na Tabela 5.1.

Em trabalhos posteriores a esse (Bradford et al. (2004) e (2006)) o meios porosos foram designados pelos diâmetros médios dos grãos; ou seja 710µm, 360µm, 150µm e 240µm, que correspondem aos meios porosos 2030, 3550, 70110 e MIX, respectivamente.

Tabela 5.1. Propriedade dos meios porosos

Meio poroso	F20-F30	F35	F50	F70	F110	$d_{50}$ , mm	$U_i$ $d_{60}/d_{10}$
2030	100%	-	-	-	-	0,71	1,21
3550	-	50%	50%	-	-	0,36	1,88
70110	-	-	-	50%	50%	0,15	2,25
MIX	-	25%	25%	25%	25%	0,24	3,06
GB	-	-	-	100%	-	0,26	1,20

As areias Ottawa consistem tipicamente de 99,8% SiO<sub>2</sub> (quartzo) e vestígios de óxidos metálicos, são em forma esferoidal, e podem ter superfícies ásperas.

As amostras com as areias Ottawa foram moldadas em colunas Kontes Chromaflex cromatográficas (Kimble / Kontes, Vineland) feitas de vidro borossilicatado com 15cm de comprimento e 4,8cm de diâmetro interno.

Antes de iniciar um experimento para marcar os colóides, as colunas de solo contendo areias Ottawa foram lavadas injetando-se vários volumes porosos (entre 4 e 8 p.v.i.) de uma solução (0,001 M NaCl + 5 x 10<sup>-5</sup> M NaHCO<sub>3</sub>) para remover partículas de colóides naturais do meio poroso.

A Figura 5.2 mostra o aparato experimental do procedimento empregado para o estudo do transporte de partículas suspensas no meio poroso.

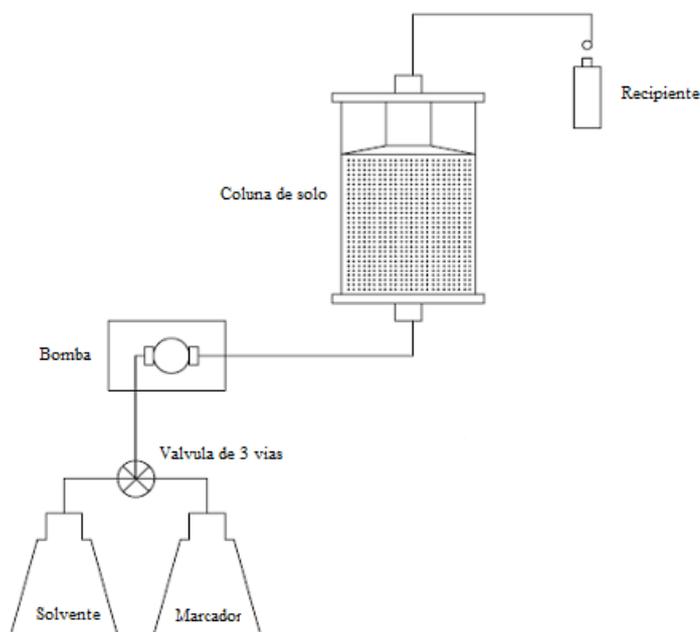


Figura 5.2. Aparato experimental do procedimento empregado para o estudo do transporte de partículas suspensas no meio poroso.

Uma bomba Masterflex L / S de múltiplas passagens (Barnant Company, Barrington, Illinois) equipadas com cabeças padrão foi usada para bombear para cima, e a uma taxa constante as partículas e o brometo marcador (colóides + 0,001 M NaBr +  $5 \times 10^{-5}$  M NaHCO<sub>3</sub>) ou o solvente (0,001 M NaCl +  $5 \times 10^{-5}$  M NaHCO<sub>3</sub>).

A velocidade média, Darcy ( $U$ ), para as diversas experiências nas colunas de solo são dadas na Tabela 5.3, que será discutida posteriormente.

A solução foi bombeada para cima para minimizar qualquer sedimentação que pudesse ocorrer como resultado da diferença de densidade de partículas do colóide (densidade equivale a 1,055 g cm<sup>-3</sup>) e da água (densidade igual a 0,998 g cm<sup>-3</sup>), ver Tabela 5.2.

As partículas (0,45µm, 1,0µm, 2,0µm e 3,2µm) marcadas com a solução de brometo foram bombeadas através das colunas por cerca de 77 minutos, em seguida uma válvula de três vias foi usada para transferir a solução para o bombeamento do solvente (0,001 M NaCl +  $5 \times 10^{-5}$  M NaHCO<sub>3</sub>), sendo o tempo total do experimento de 250 minutos.

Um total de 50 amostras foram coletadas em frascos de vidro de 20 ml ao longo de cada experiência com as colunas de solo. Cada amostra foi recolhida durante um intervalo de 5 minutos.

A concentração de partículas nas amostras de efluente recolhidas ( $N.L^{-1}$ ), onde  $N$  denota número de partículas, foi determinada usando uma Turner Quantech Fluorometer (Barnstead / Thermolyne, Dubuque, Iowa) equipada com filtros de excitação (490 nm, LE1095 x 13, NB490) e de emissão (515 nm, LE1095 x 23, SC515).

O experimento 01 foi realizado injetando fluido com partículas suspensas de quatro diferentes diâmetros, 0,45µm, 1,0µm, 2,0µm e 3,2µm com concentrações de injeção de  $4,24 \times 10^{14}$  N/m<sup>3</sup>,  $3,86 \times 10^{13}$  N/m<sup>3</sup>,  $4,85 \times 10^{12}$  N/m<sup>3</sup> e  $1,18 \times 10^{12}$  N/m<sup>3</sup> respectivamente em cinco diferentes meios porosos, 2030, 3550, MIX, 70110 e GB.

Bradford et al. (2005) injetou partículas de 3,0µm no meio poroso 70110 e os resultados obtidos nesse experimento serão acrescidos nas tabelas do experimento 01.

Tabela 5.2. Dimensões da amostra e propriedades do solo e da partícula.

$\rho$ solo (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho$ partícula (g/cm <sup>3</sup> )	$\phi$ amostra (m)	$l$ amostra (m)	$A$ amostra (m <sup>2</sup> )	$Vt$ (m <sup>3</sup> )
2,65	1,055	0,048	0,15	1,81E-03	2,71E-04

Através da Equação (3.9) é possível encontrar os valores de  $\lambda$  para cada combinação do experimento conforme exemplificado na Figura 4.3.

As curvas de *breakthrough* e de concentração de partículas retidas foram ajustadas pelo método dos mínimos quadrados (programa criado no Mathcad 13), que consiste em encontrar o melhor ajuste para um conjunto de dados minimizando a soma dos quadrados das diferenças entre a curva ajustada e os dados apresentados. A partir desses ajustes foram calculados os valores para  $\lambda$  e  $\lambda^*$ .

Além disso, foram medidas a porosidade  $\phi$ , o comprimento da amostra  $L$ , a velocidade  $U$  e o tempo total de injeção da suspensão particulada  $T^*$  para cada experimento (ver Tabela 5.3).

Tabela 5.3. Porosidade ( $\phi$ ), velocidade de Darcy ( $U$ ) e tempo total de injeção ( $T^*$ ).

<i>Meio poroso</i>	$d_s$ ( $\mu\text{m}$ )	$\phi$	$L$ (m)	$U$ (m/s)	$c_o$ ( $1/\text{m}^3$ )	$T^*$ (p.v.i.)	$\alpha$
2030	0,45	0,367	0,132	1,7E-05	4,24E+14	1,60	0,97
2030	1,00	0,378	0,134	1,7E-05	3,86E+13	1,50	1,03
2030	2,00	0,369	0,122	1,7E-05	4,85E+12	1,60	1,00
2030	3,20	0,362	0,131	1,7E-05	1,18E+12	1,80	1,11
3550	0,45	0,341	0,127	1,7E-05	4,24E+14	1,80	0,95
3550	1,00	0,342	0,127	1,7E-05	3,86E+13	1,80	1,00
3550	2,00	0,343	0,128	1,7E-05	4,85E+12	1,80	1,08
3550	3,20	0,341	0,128	1,7E-05	1,18E+12	1,90	1,00
MIX	0,45	0,328	0,124	1,7E-05	4,24E+14	2,00	1,00
MIX	1,00	0,33	0,125	1,8E-05	3,86E+13	1,90	1,04
MIX	2,00	0,344	0,127	1,8E-05	4,85E+12	2,00	1,25
MIX	3,20	0,336	0,125	1,8E-05	1,18E+12	2,10	1,09
70110	0,45	0,342	0,127	1,8E-05	4,24E+14	1,80	0,85
70110	1,00	0,342	0,127	1,8E-05	3,86E+13	1,80	0,91
70110	2,00	0,351	0,130	1,8E-05	4,85E+12	1,90	1,18
70110	3,00	0,351	0,130	1,8E-05	4,85E+12	1,90	1,11
70110	3,20	0,34	0,126	1,8E-05	1,5E+12	1,80	0,91
GB	0,45	0,377	0,100	2,3E-05	4,24E+14	2,60	1,05
GB	1,00	0,360	0,100	2,5E-05	3,86E+13	3,25	0,91
GB	2,00	0,373	0,100	2,8E-05	4,85E+12	3,55	0,87
GB	3,20	0,369	0,100	2,4E-05	1,18E+12	3,20	0,91

Os resultados obtidos para os ajustes considerando a modelagem clássica e estatística serão discutidos no Capítulo 6.

Bredford et al. (2005b), injetaram partículas de  $1,0\mu\text{m}$  no meio poroso 70110. Nesse experimento ele carregou as partículas com forças iônicas diferentes e utilizou velocidades de Darcy diferentes. A Tabela 5.4 apresenta a porosidade  $\phi$ , o comprimento

da amostra  $L$ , a velocidade  $U$  e o tempo total de injeção da suspensão particulada  $T^*$  para cada experimento.

Tabela 5.4. Porosidade ( $\phi$ ), velocidade de Darcy ( $U$ ) e tempo total de injeção ( $T^*$ ) para  $d_s$  de  $1,0\mu\text{m}$ .

<i>Meio poroso</i>	<i>mM</i>	$\phi$	<i>L(m)</i>	<i>U (m/s)</i>	<i>c<sub>o</sub>(1/m<sup>3</sup>)</i>	<i>T* (p.v.i.)</i>	$\alpha$
70110	6	0,34	0,127	3,5E-05	3,9E+13	1,65	1,05
70110	56	0,34	0,127	3,5E-05	3,9E+13	1,75	0,91
70110	56	0,34	0,127	7,5E-05	3,9E+13	1,34	0,99

### 5.2.2 - Experimento 02

Muitos dos materiais experimentais, procedimentos e protocolos empregados aqui foram descritas por Bradford et al. (2002), conforme descrito no item 5.2.1. Nesta seção é descrito os procedimentos experimentais adotados por Bradford et al (2006a).

Micro-esferas látex fluorescentes amarelo-verde (Interfacial Dynamics Company, Portland, OR 97224) foram utilizados como partículas modelo no estudo experimental (excitação a 490 nm, e a emissão em 515 nm). Dois tamanhos de diâmetros de partículas ( $d_s$ ),  $1,0\mu\text{m}$  e  $3,2\mu\text{m}$ , foram empregados.

Os experimentos foram concebidos para examinar a influência da concentração no comportamento do transporte de uma massa fixa de partículas.

Quatro diferentes níveis de concentrações iniciais ( $c_o$ ) foram injetadas:  $2*cr$ ,  $1*cr$ ,  $0,5*cr$ ,  $0,25*cr$ , onde  $cr$  é a concentração de referência sendo  $cr = 3,86 \times 10^{10} \text{ N.L}^{-1}$ , para as partículas com diâmetros de  $1,0\mu\text{m}$  e  $cr$  é igual a  $1,18 \times 10^9 \text{ N.L}^{-1}$  para as partículas com diâmetros de  $3,2\mu\text{m}$ .

Neste experimento as concentrações  $2*cr$ ,  $1*cr$ ,  $0,5*cr$ ,  $0,25*cr$  foram injetadas durante um tempo  $0,5*t_r$ ,  $t_r$ ,  $2*t_r$ , e  $4*t_r$ , respectivamente; onde o tempo de referência ( $t_r$ ) é aproximadamente 75 min.

Os materiais utilizados para a confecção das colunas do experimento consistiram em diversos tamanhos de areia Ottawa (E.U. Sílica, Ottawa, IL 61350). As areias Ottawa serão designadas aqui como: 3550, MIX, e 70110. Estes meios porosos foram selecionados de forma a abranger um leque significativo de características granulométricas de distribuição da areia.

As propriedades específicas de 3550, MIX, 70110 e areias, incluem: diâmetro médio ( $d_{50}$ ) de 0,36, 0,24, e 0,15 mm; e índice uniformidade de 1,88, 3,06, e 2,25, respectivamente, conforme descrito no experimento anterior (ver Tabela 5.1).

Colunas de alumínio (10 cm de comprimento e 5 centímetros de diâmetro interno) ou colunas cromatográficas Kontes Chromaflex 2 (Kimble / Kontes, Vineland, NJ 08360) feitas de vidro borosilicatado (15 cm de comprimento e 4,8 centímetros de diâmetro interno equipado com um adaptador caudal regulável na parte superior) foram utilizados no estudo do transporte de partículas suspensas. As características do tubo e as densidades do solo e das partículas podem ser observadas na Tabela 5.5.

Tabela 5.5. Dimensões do tubo e propriedades do solo e da partícula

$\rho_{\text{solo}} \text{ (g/cm}^3\text{)}$	$\rho_{\text{particula}} \text{ (g/cm}^3\text{)}$	$\phi_{\text{amostra}} \text{ (m)}$	$l_{\text{amostra}} \text{ (m)}$	$A_{\text{amostra}} \text{ (m}^2\text{)}$	$Vt \text{ (m}^3\text{)}$
2,65	1,055	0,05	0,1	1,96E-03	1,96E-04

O mesmo procedimento que foi adotado no experimento 01 será adotado aqui. A porosidade  $\phi$ , o comprimento da amostra  $L$ , a velocidade  $U$  e o tempo total de injeção da suspensão particulada  $T^*$  para cada experimento (ver Tabela 5.6).

Tabela 5.6. Porosidade ( $\phi$ ), velocidade de Darcy ( $U$ ) e tempo total de injeção ( $T^*$ ).

<i>Meio poroso</i>	$d_s$ ( $\mu\text{m}$ )	$c_o/cr$	$\phi$	$L(m)$	$U$ (m/s)	$c_o(1/m^3)$	$T^*$ (p.v.i.)	$\alpha$
3550	1,00	2,00	0,31	0,100	1,5E-05	7,7E+13	1,15	1,00
3550	1,00	1,00	0,34	0,127	1,7E-05	3,9E+13	1,83	1,00
3550	1,00	0,50	0,27	0,100	2,0E-05	1,9E+13	6,75	0,95
3550	1,00	0,25	0,31	0,100	1,7E-05	9,7E+12	9,70	1,00
3550	3,20	2,00	0,30	0,100	2,0E-05	2,4E+12	1,59	1,10
3550	3,20	1,00	0,34	0,128	1,7E-05	1,2E+12	1,71	1,05
3550	3,20	0,50	0,31	0,100	1,5E-05	5,9E+11	4,25	0,94
3550	3,20	0,25	0,31	0,100	1,3E-05	3,0E+11	7,29	1,04
MIX	1,00	2,00	0,31	0,100	2,2E-05	7,7E+13	1,65	1,11
MIX	1,00	1,00	0,33	0,125	1,8E-05	3,9E+13	2,00	0,91
MIX	1,00	0,25	0,30	0,100	1,8E-05	9,7E+12	11,00	1,00
MIX	3,20	2,00	0,30	0,100	2,0E-05	2,4E+12	1,53	1,15
MIX	3,20	1,00	0,34	0,125	1,8E-05	1,2E+12	2,15	1,25
MIX	3,20	0,50	0,30	0,100	1,8E-05	5,9E+11	9,80	1,43
MIX	3,20	0,25	0,29	0,100	1,7E-05	3,0E+11	11,25	1,05
70110	1,00	2,00	0,33	0,100	1,8E-05	7,7E+13	1,33	1,03
70110	1,00	0,25	0,32	0,100	1,7E-05	9,7E+12	9,50	0,97
70110	3,20	2,00	0,33	0,100	2,0E-05	2,4E+12	1,50	1,00
70110	3,20	1,00	0,36	0,130	1,8E-05	1,2E+12	5,40	3,33
70110	3,20	0,50	0,33	0,100	1,7E-05	5,9E+11	9,09	1,33
70110	3,20	0,25	0,31	0,100	1,5E-05	3,0E+11	9,11	1,01

---

# Capítulo 6

## Resultados e Discussões

---

## 6. Resultados e discussões

Neste capítulo é apresentada uma comparação entre as previsões do modelo clássico e do modelo proposto para as concentrações de partículas. Com o objetivo de entender os mecanismos de retenção atuantes nos experimentos estudados, as distribuições de tamanho de poros também foram determinadas a partir da metodologia descrita na Seção 2.4 e apresentadas neste capítulo.

Para os dados experimentais apresentados por Bradford et al. (2002, 2005, 2006a e 2006b), já discutidos no Capítulo 5, são calculados os coeficientes de filtração a partir das curvas de *breakthrough* e de concentração de partículas retidas ao longo do meio poroso. Os resultados obtidos são comparados com a previsão da modelagem clássica de filtração profunda.

Conforme discutido no Capítulo 4, no modelo estatístico a velocidade de propagação da “frente de concentração” é diferente da velocidade de propagação da “frente de água”. Por outro lado, no modelo clássico as velocidades de propagação da “frente de concentração” e da “frente de água” são iguais. Apesar disso, a concentração efluente relativa prevista por ambos os modelos são iguais.

### 6.1 - Porosimetria dos meios porosos estudados

Nesta seção são obtidas as distribuições de tamanho de poros para os meios porosos estudados por Bradford et al. (2001) (Figura 6.1). Conforme descrito na Seção 2.4, a distribuição de tamanho de poros pode ser obtida a partir das curvas de saturação versus pressão capilar.

A Figura 6.1 mostra os dados experimentais apresentados por Bradford et al. (2001) sendo esses dados obtidos através da porosimetria com mercúrio, conforme explicado na Seção 2.4.

Devido ao grande número de poros existentes numa amostra de rocha, pode-se considerar que  $f(r_p)$  é contínua e suave. Sendo assim, foi considerada uma função contínua (do tipo tangente hiperbólico) para ajustar a saturação em função da pressão capilar:

$$S(P_c) = (1 - b) \cdot \left\{ \frac{1 - \tanh[a \cdot (P_c - c)]}{2} \right\} + b \quad (6.1)$$

onde  $a$ ,  $b$  e  $c$  são constantes obtidas através do método dos mínimos quadrados. A Figura 6.1 mostra os dados experimentais fornecidos por Bradford et al. (2001) e os ajustes obtidos considerando a Equação (6.1). Os valores de  $a$ ,  $b$  e  $c$ , característicos de cada meio poroso, são mostrados na Tabela 6.1.

Tabela 6.1. Valores para  $a$ ,  $b$  e  $c$ .

Meio Poroso	$a$	$b$	$c$
2030	0,0034	0,009	998,8
3550	0,0014	0,040	2000
MIX	0,0005	0,003	3200
70110	0,0008	0,241	4485

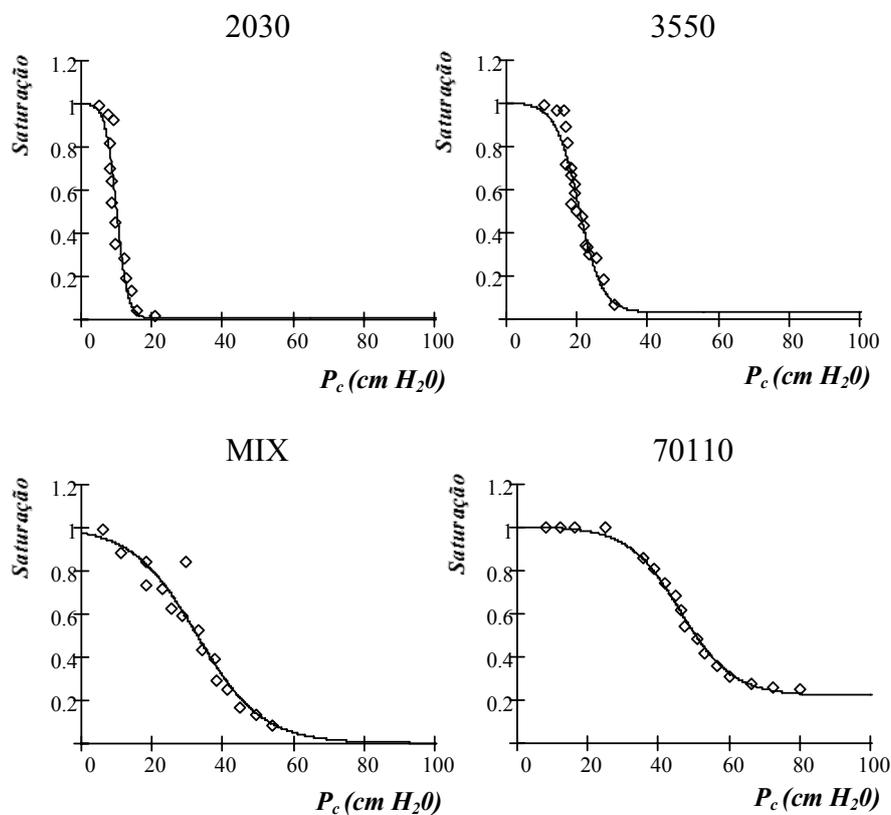


Figura 6.1. Gráficos da pressão capilar em  $cm$  de  $H_2O$ ,  $P_c(S)$ , para os meios porosos 2030, 3550, MIX e 70110 (Bradford et al., 2001).

Substituindo a Equação (6.1) na Equação (2.8) é possível determinar as curvas de distribuição de tamanho de poros, conforme mostrado na Figura 6.2. Para determinar as curvas de distribuição de poros, foi desenvolvido um programa no ambiente Mathcad 13.

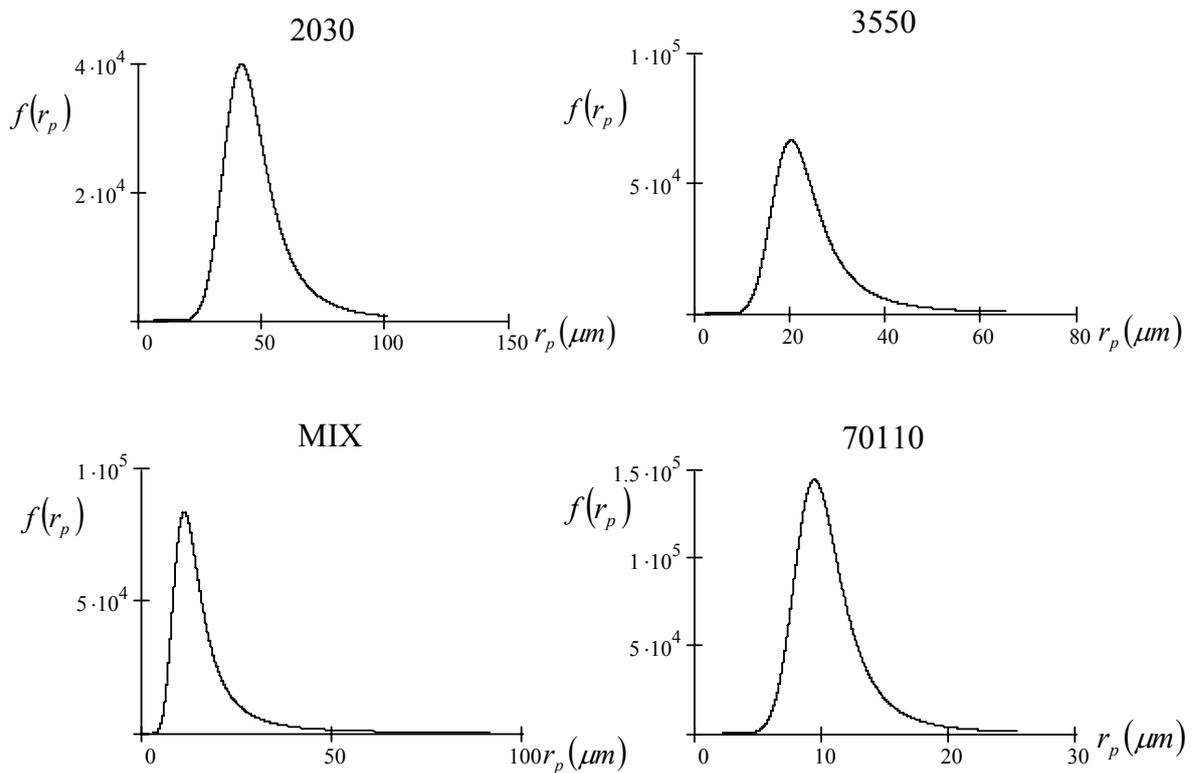


Figura 6.2. Curvas de distribuição de tamanhos de poros para os meios porosos 2030, 3550, MIX e 70110

Conforme discutido no Capítulo 2, na porosimetria de mercúrio é considerado que o meio poroso é constituído de tubos capilares. Mas num meio poroso natural, os poros são conectados por gargantas (onde é mais provável a ocorrência de exclusão pelo tamanho) muito menores do que os poros (ver Tabela 2.3).

A distribuição de tamanho de gargantas pode apresentar tamanho de poros da ordem de 10 vezes menores do que os apresentados na Figura 6.2.

Conforme discutido no Capítulo 5, foram injetadas partículas entre  $0,45 \mu m$  e  $3,2 \mu m$  de diâmetro. Ou seja, da mesma ordem do tamanho das gargantas de poros. Isto

sugere que o mecanismo de exclusão pelo tamanho pode ter um efeito predominante na retenção de partículas durante o transporte de suspensões nos meios porosos estudados.

## **6.2 - Comparação do modelo clássico com o modelo proposto**

Para os experimentos analisados por Bradford et al.(2002, 2005, 2006a e 2006b), o perfil de retenção de partículas nos meios porosos estudados foram ajustados com o modelo clássico (Equação (3.6)) e com o modelo proposto (Equação (4.24)) apresentado nos Capítulos 3 e 4, respectivamente.

Para comparar as previsões das modelagens clássica e estatística para a retenção de partículas nos meios porosos, é calculado o erro padrão de cada modelo em relação aos dados experimentais; quanto menor e mais próximo de zero for o valor do erro padrão, melhor é o ajuste do modelo aos dados experimentais.

### **6.2.1 - Experimento 01**

Nesse experimento foram injetadas partículas de 0,45, 1,0, 2,0, 3,0 e 3,2 $\mu$ m nos meios porosos 2030, 3550, MIX, 70110 e GB.

Bradford et al. (2006b) também injetaram partículas de 1,0 $\mu$ m carregadas eletricamente no meio poroso 70110. Nesse experimento também é verificado a influência da velocidade na retenção de partículas no meio poroso.

As Figuras 6.4 – 6.9 apresentam os gráficos com os pontos experimentais medidos por Bradford et al. (2002 e 2005) e as curvas de previsão de comportamento para o modelo clássico e para o modelo proposto.

Os pontos representam os dados experimentais obtidos por Bradford (Exp.), a linha contínua representa o ajuste da concentração de partículas retidas previsto pelo modelo proposto (Est.) e a linha tracejada representa o ajuste da concentração de partículas retidas previsto pelo modelo clássico (Clas.).

As curvas das Figuras 6.4 – 6.9 foram ajustadas pelo método dos mínimos quadrados (programa criado no Mathcad 13). Esta é uma técnica de otimização matemática que procura encontrar o melhor ajuste para um conjunto de dados minimizando a soma dos quadrados das diferenças entre a curva ajustada e os dados

experimentais. Isto permitiu encontrar o melhor ajuste para as curvas de *breakthrough* e curvas de concentração de partículas retidas no meio poroso.

Os valores dos coeficientes  $\lambda$  e  $\lambda^*$  foram determinados a partir do ajuste dos dados experimentais apresentados por Bradford et al. (2002). As concentrações relativas  $c_{eff}/c_o$ , que foram obtidas ajustando-se as curvas de *breakthrough* (ver Figura 4.3) pelo método dos mínimos quadrados, são utilizados para a determinação do coeficiente de filtração  $\lambda$  para cada experimento (ver Equação (3.9)). Após a determinação do valor do coeficiente de filtração ( $\lambda$ ), o coeficiente  $\lambda^*$  foi obtido através do melhor ajuste (mínimos quadrados) da Equação (4.27) para a concentração de partículas retidas ao longo do meio poroso durante o tempo total de injeção da suspensão particulada ( $T^*$ ). De posse dos valores de  $\lambda$  e de  $\lambda^*$ , a probabilidade de retenção ( $q$ ) e a distância entre os sítios de retenção ( $\Delta$ ) são calculados através das Eqs. (4.16) e (4.17). Finalmente, as previsões do modelo clássico e do modelo estatístico são comparadas, conforme mostrado nas Figuras 6.4 – 6.15.

A retenção de partículas pode ocorrer devido a diferentes mecanismos, cujas intensidades (probabilidade de captura por unidade de deslocamento,  $q/\Delta$ ) dependem das interações entre as partículas e o meio poroso.

As Figuras 6.4b – 6.7b mostram que os ajustes da modelagem estatística para a concentração de partículas de  $0.45\mu\text{m}$  retidas ao longo do meio poroso concordam razoavelmente bem com os dados experimentais.

Por outro lado, as previsões de ambos os modelos (clássico e estatístico) para a concentração de partículas de tamanho  $3.2\mu\text{m}$  ao longo dos meios porosos 2030, 3550, MIX e 70110 não ajustam bem os dados experimentais (ver Figuras 6.4e – 6.7e). Esta discrepância deve estar relacionada à atuação simultânea de diferentes mecanismos de captura para partículas de diâmetro igual a  $3.2\mu\text{m}$ .

É importante salientar que quando a diferença entre a previsão de ajuste do modelo estatístico ( $\sigma_{est}$ ) e do modelo clássico ( $\sigma_{cla}$ ) é da ordem de “ $\delta$ ” conforme ilustrado na Figura 6.3, temos que::

$$\sigma_{est.} = e^{\delta} \cdot \sigma_{cla.} \quad (6.2)$$

Ou seja, a previsão da retenção pela modelagem estatística ( $\sigma_{est}$ ) é “ $e^\delta$ ” vezes maior do que a previsão da retenção pela modelagem clássica ( $\sigma_{cla}$ ). Na Figura 6.3, por exemplo,  $\sigma_{est}$  é aproximadamente 1.65 vezes  $\sigma_{cla}$ .

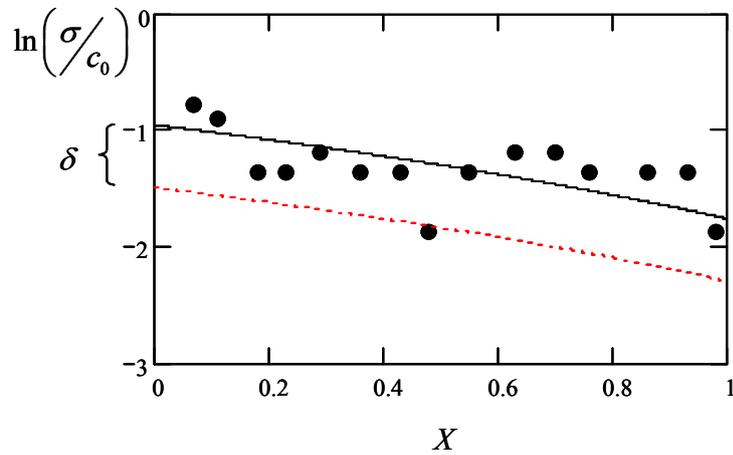


Figura 6.3. Ordem da diferença entre o modelo estatístico e o modelo clássico para previsão de partículas retidas.

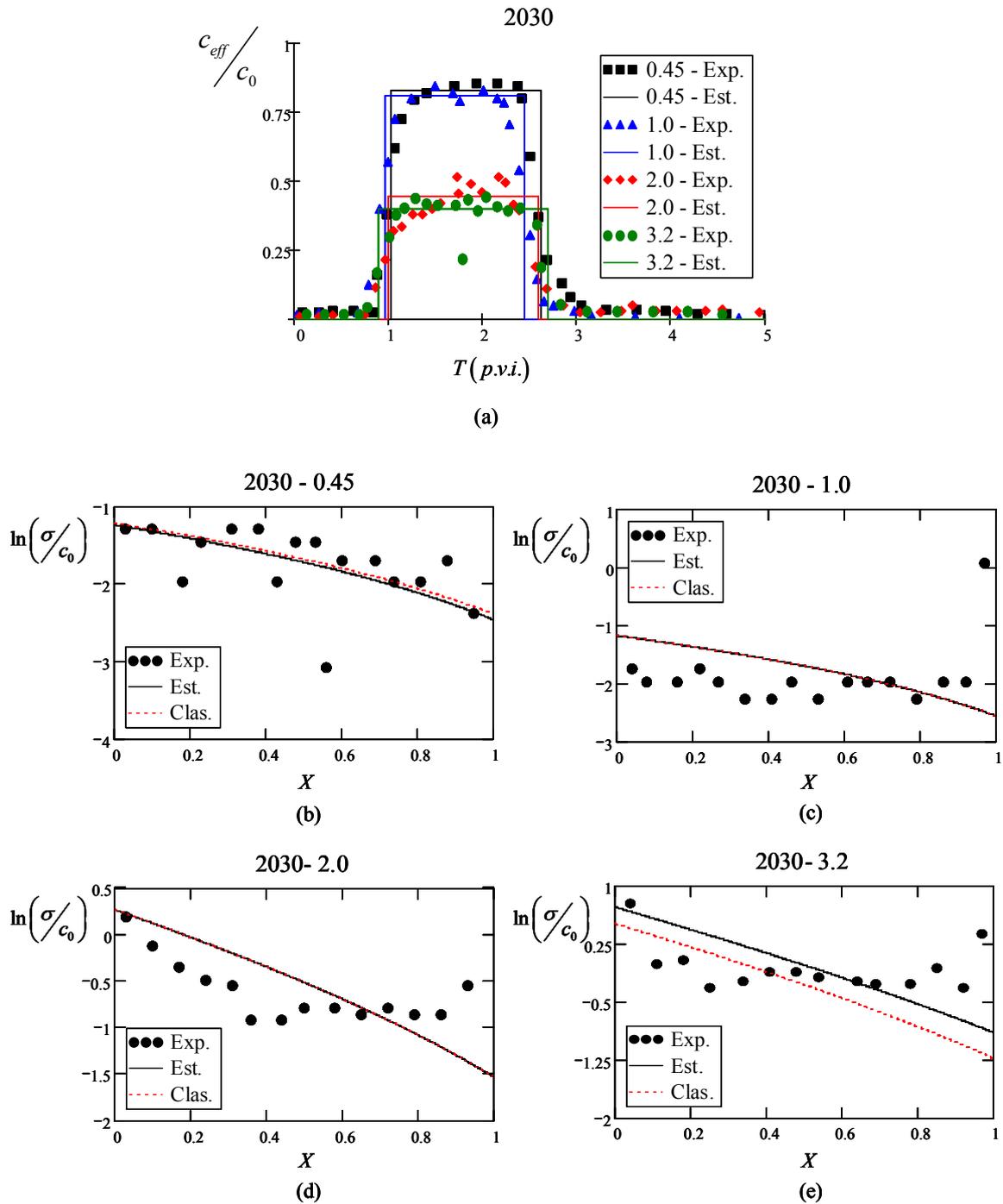


Figura 6.4. (a) Curva de *breakthrough* e concentração de partículas retidas e previsão do modelo clássico e do modelo estatístico para partículas de diâmetro (b) 0,45 $\mu m$ , (c) 1,0 $\mu m$ , (d) 2,0 $\mu m$  e (e) 3,2 $\mu m$  ao longo do meio poroso 2030.

Na Figura 6.4a pode ser observado que quanto menor o tamanho da partícula maior é a concentração na saída da amostra. Este fato é reforçado quando observamos as Figuras 6.5a – 6.9a; que mostram que quanto menor o tamanho da partícula menor a concentração de partículas retidas, sendo o experimento com o meio poroso 3550 a única exceção (ver Figura 6.5).

Para o meio poroso 2030 (diâmetro médio dos grãos,  $d_{50}$ , de 0,71mm), foram injetados quatro tamanhos de partículas diferentes (0,45 $\mu$ m, 1,0 $\mu$ m, 2,0 $\mu$ m e 3,2 $\mu$ m). Como pode ser observado comparando as Figuras 6.4b – 6.4e, quanto maior o diâmetro das partículas injetadas maior é a retenção de partículas no meio poroso. Além disso, quanto maior o tamanho da partícula injetada, maior a retenção e melhor é o ajuste do modelo estatístico em relação ao ajuste do modelo clássico (ver erro padrão na Tabela 6.3), como é evidente na Figura 6.4e.

Para o meio poroso 3550 (diâmetro médio dos grãos,  $d_{50}$ , 0,36mm), o comportamento da retenção de partículas suspensas no meio poroso previsto pelo modelo estatístico foi melhor que o comportamento previsto pelo modelo clássico (ver erro padrão na Tabela 6.3). Para partículas injetadas de 1,0 $\mu$ m (Figura 6.5c) o ajuste do modelo proposto é muito melhor que o ajuste do modelo clássico. Outro fato a ser observado é que nos experimentos do Bradford (2002) o único mecanismo de retenção estudado foi o de exclusão pelo tamanho (*straining*). Mas, provavelmente, outro mecanismo de retenção (adsorção, por exemplo) atuando simultaneamente, está contribuindo para modificar o perfil da concentração de partículas retidas (ver Figura 6.5d).

Caso a liberação de partículas (*detachment*) estivesse ocorrendo, a retenção de partículas antes da injeção do solvente (tempo  $T^*$ ) seria maior; ou seja,  $\sigma(X, T^*)$  seria maior nas Figuras 6.4b – 6.9b. Neste caso, a diferença entre as previsões dos modelos clássico e modelo estatístico seriam aumentadas.

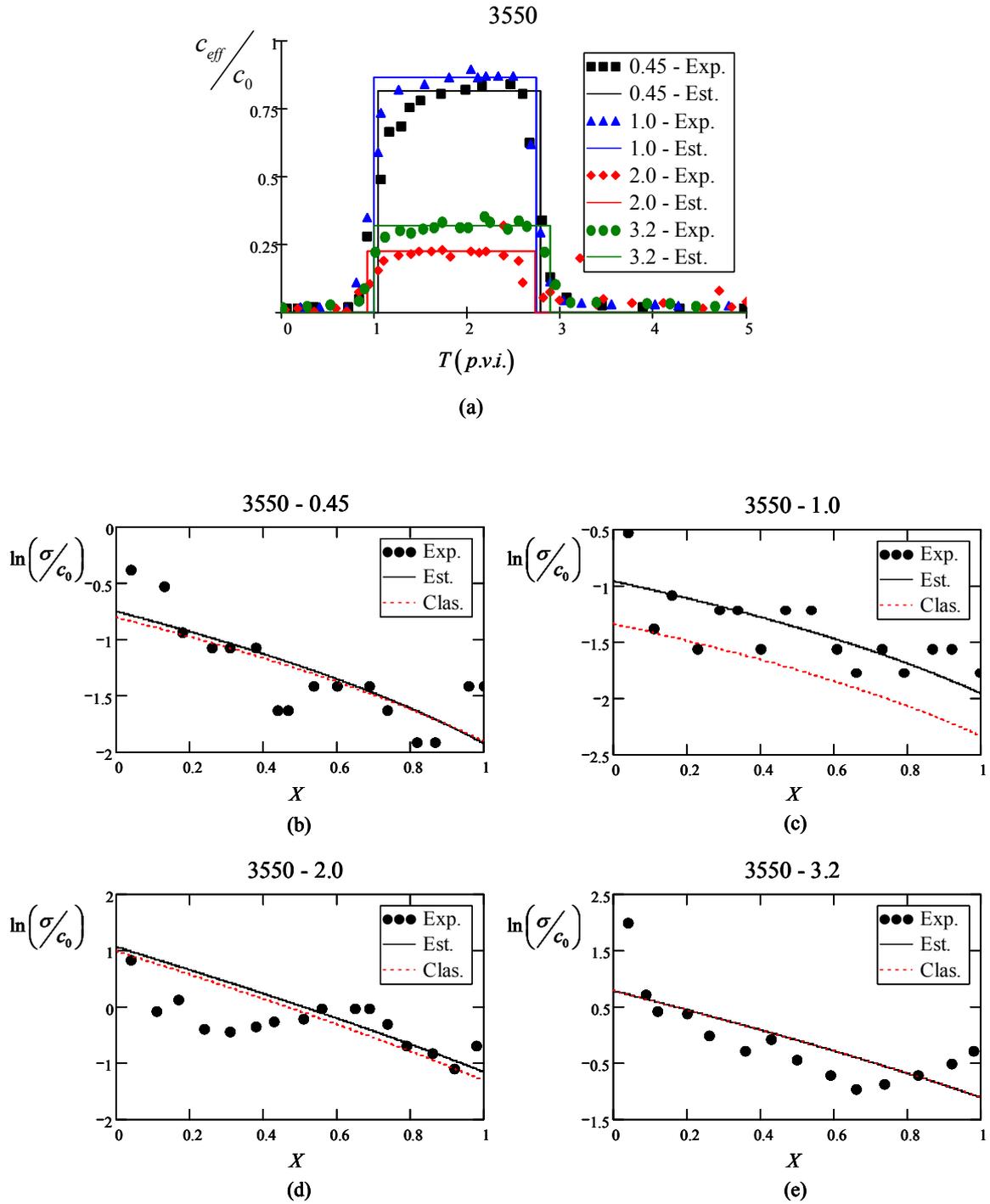


Figura 6.5. (a) Curva de *breakthrough* e concentração de partículas retidas e previsão do modelo clássico e do modelo estatístico para partículas de diâmetro (b) 0,45 $\mu m$ , (c) 1,0 $\mu m$ , (d) 2,0 $\mu m$  e (e) 3,2 $\mu m$  ao longo do meio poroso 3550.

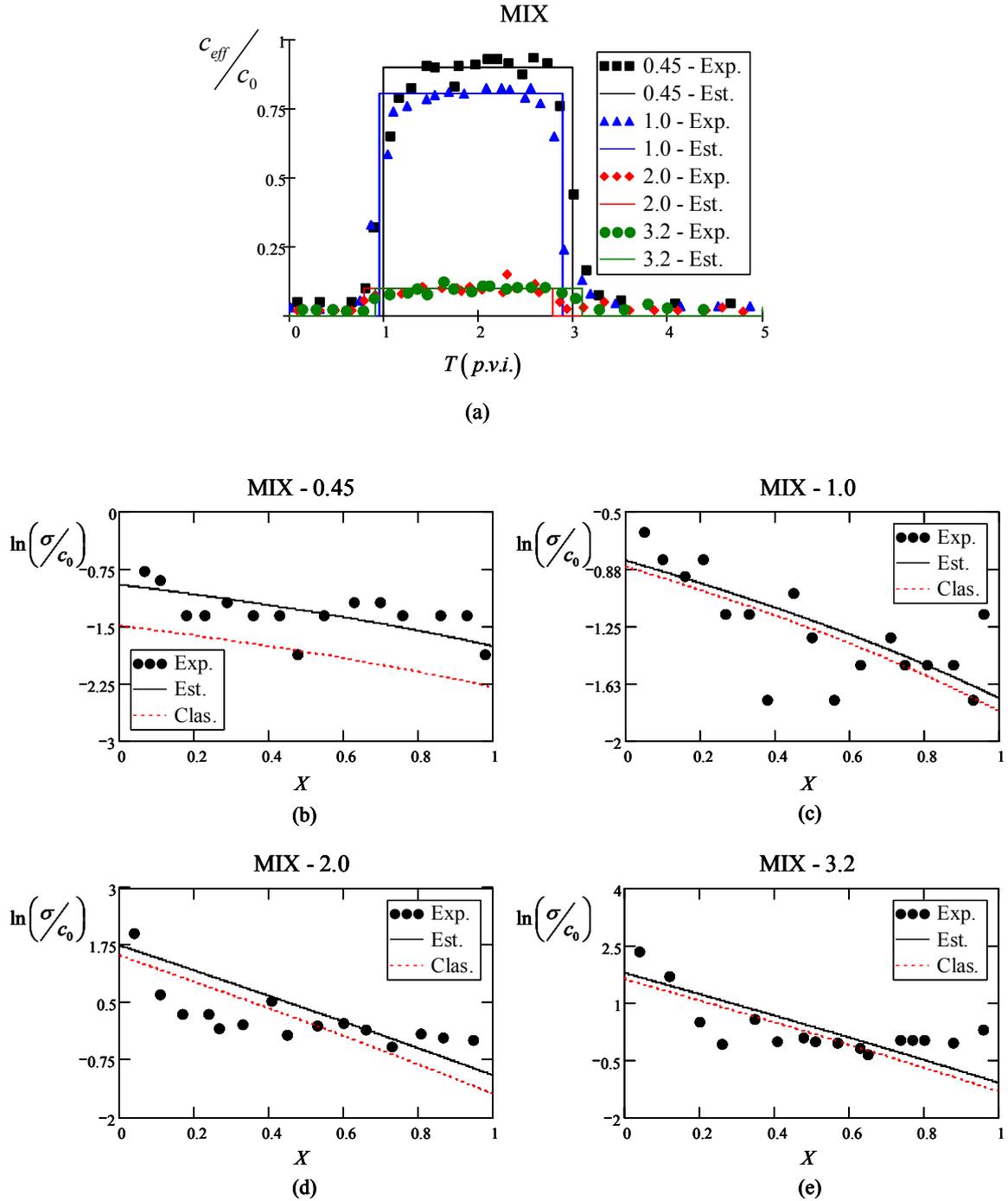


Figura 6.6. (a) Curva de *breakthrough* e concentração de partículas retidas e previsão do modelo clássico e do modelo estatístico para partículas de diâmetro (b) 0,45 $\mu\text{m}$ , (c) 1,0 $\mu\text{m}$ , (d) 2,0 $\mu\text{m}$  e (e) 3,2 $\mu\text{m}$  ao longo do meio poroso MIX.

No meio poroso MIX, com  $d_{50}$  igual a 0,24mm, o ajuste da retenção de partículas no meio poroso previsto pelo modelo estatístico é melhor do que o apresentado pelo modelo clássico, sendo a única exceção para as partículas injetadas de 2,0 $\mu$ m (ver Figura 6.6 e erro padrão na Tabela 6.3). O ajuste do modelo clássico para a retenção de partículas de 2,0 $\mu$ m apresentou um melhor ajuste do que a previsão de retenção de partículas do modelo estatístico, mas um ajuste inadequado para a concentração efluente relativa. Isso concorda com o fato de que o modelo clássico não consegue ajustar satisfatoriamente os dados de concentração de partículas efluente e retidas simultaneamente.

Como o meio poroso MIX é uma mistura de vários tamanhos de grãos (ver Tabela 5.1) os tamanhos de poros tendem a serem menores, favorecendo assim o mecanismo de exclusão pelo tamanho (*straining*). Com o aumento do tamanho da partícula, a influência do mecanismo de exclusão pelo tamanho é intensificada e a modelagem considerando somente um mecanismo de retenção torna-se cada vez mais inadequada (comparar Figura 6.6b e Figura 6.6e).

A previsão do comportamento da retenção de partículas no meio poroso 70110, Figura 6.7, para o modelo proposto é melhor que o comportamento previsto pelo modelo clássico, sendo a única exceção para partículas injetadas de 3,2 $\mu$ m (ver erro padrão na Tabela 6.3).

Outro ponto a ser observado é que no meio poroso 70110 (diâmetro médio dos grãos,  $d_{50}$ , igual a 0,15mm) a razão entre o número de partículas efluente e o de partículas injetadas é menor que nos outros meios porosos; um dos fatores que explica essa ocorrência é o fato de que o meio poroso 70110 ter o diâmetro médio dos grãos menor que os outros meios porosos, o que indica menores diâmetros de poros e menores diâmetros de gargantas.

Para os meios porosos 70110 (Figura 6.7) e GB (Figura 6.8), muitos pontos experimentais estão a baixo das curvas de previsão de retenção, sugerindo que ocorreu liberação de partículas retidas (*detachment*) durante a injeção do solvente.

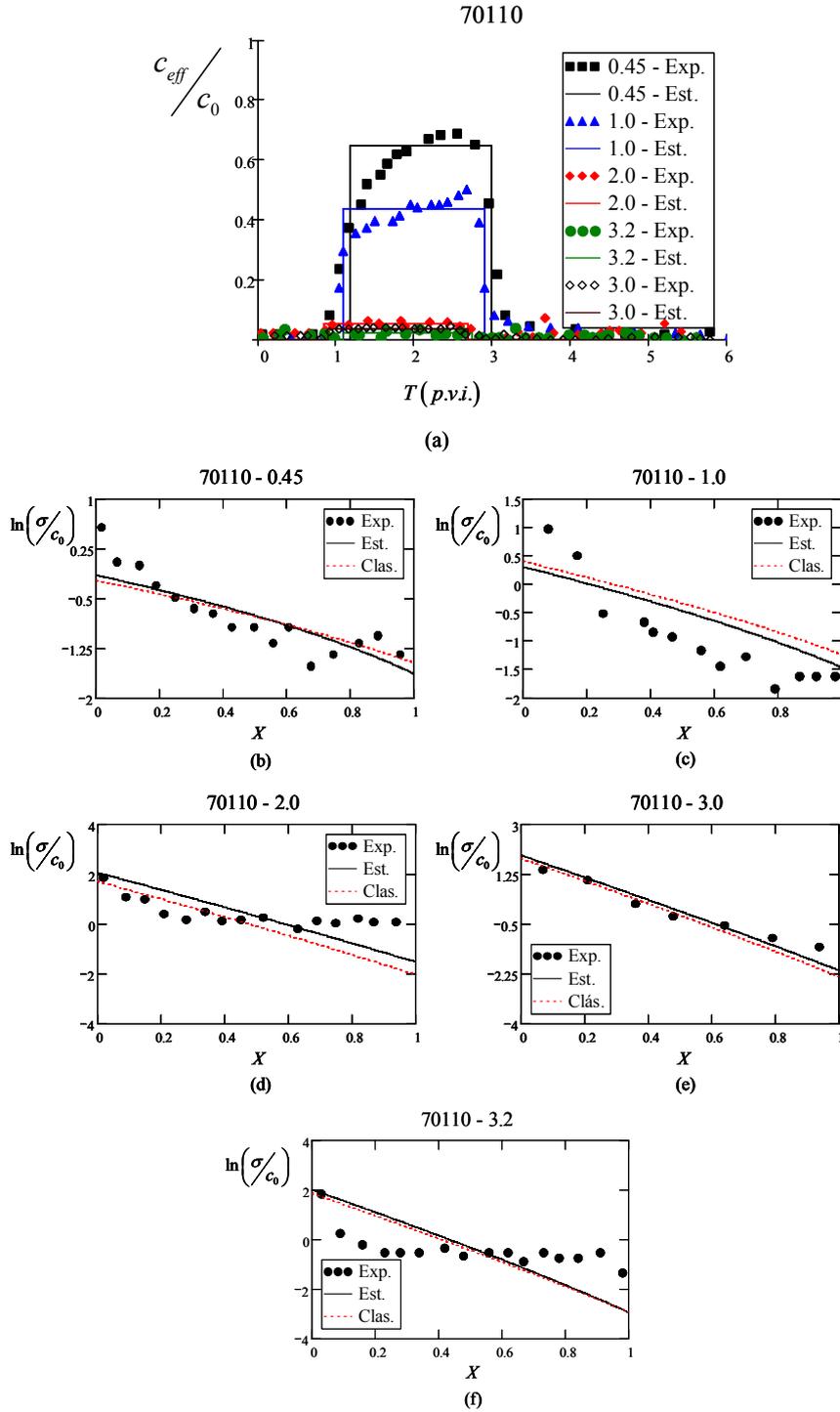


Figura 6.7 (a) Curva de *breakthrough* e concentração de partículas retidas e previsão do modelo clássico e do modelo estatístico para partículas de diâmetro (b) 0,45 $\mu\text{m}$ , (c) 1,0 $\mu\text{m}$ , (d) 2,0 $\mu\text{m}$ , (e) 3,0 $\mu\text{m}$  e (f) 3,2 $\mu\text{m}$  ao longo do meio poroso 70110.

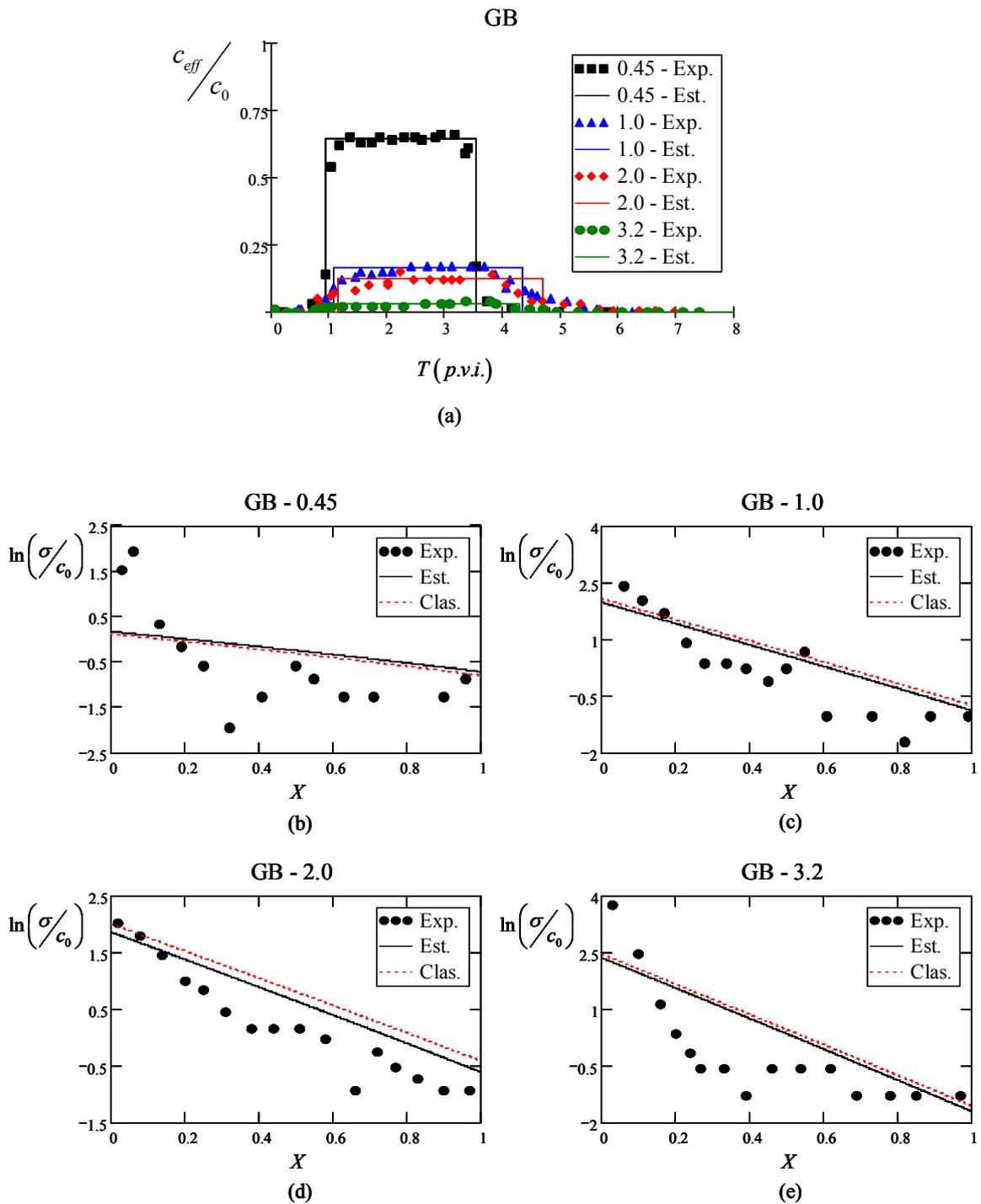


Figura 6.8 (a) Curva de *breakthrough* e concentração de partículas retidas e previsão do modelo clássico e do modelo estatístico para partículas de diâmetro (b) 0,45 $\mu\text{m}$ , (c) 1,0 $\mu\text{m}$ , (d) 2,0 $\mu\text{m}$  e (e) 3,2 $\mu\text{m}$ , ao longo do meio poroso GB.

Para o meio poroso GB, Figura 6.8 (diâmetro médio dos grãos,  $d_{50}$ , 0,26mm), o comportamento da retenção de partículas suspensas no meio poroso previsto pelo modelo estatístico é praticamente igual ao comportamento previsto pelo modelo clássico (ver erro padrão na Tabela 6.3). No meio poroso GB, quase todos os pontos experimentais estão abaixo das previsões de retenção feitas pelo modelo clássico e pelo modelo estatístico. Esse comportamento, provavelmente, se explica pela ocorrência da liberação de partículas retidas (*detachment*).

A Figura 6.9 apresenta as previsões de retenção de partículas feitas pelo modelo estatístico e pelo modelo clássico para os dados publicados por Bradford et al., (2006b). Para o meio poroso 70110 foram injetadas partículas de 1,0 $\mu$ m carregadas ionicamente e com velocidades diferentes, sendo que LL significa força iônica baixa (6M) e velocidade baixa ( $3,5 \times 10^{-5}$  m/s), HL força iônica alta (56M) e velocidade alta ( $7,5 \times 10^{-5}$  m/s) e HH força iônica alta (56M) e velocidade alta ( $7,5 \times 10^{-5}$  m/s).

Aqui é possível observar que o aumento da velocidade (comparar Figura 6.9c e Figura 6.9d) possibilitou um ajuste muito melhor dos dados experimentais feito pelo modelo estatístico (ver erro padrão na Tabela 6.3). Isso se deve ao fato de que com o aumento da velocidade aumentam-se as forças de arraste o que dificulta a retenção de partículas por adsorção (*attachment*), e o que é retido, provavelmente, é devido a exclusão pelo tamanho (*straining*).

Observando Figura 6.9b observa-se a ocorrência de liberação de partículas retidas (*detachment*) pois todos os pontos experimentais estão abaixo das previsões de retenção do modelo estatístico e do modelo clássico.

Comparando a Figura 6.9b e a Figura 6.9c é possível observar que o aumento da força iônica resultou em um aumento de partículas retidas, sugerindo condições favoráveis a retenção de partículas por forças elétricas.

A Tabela 6.2 mostra os valores obtidos para  $c_{eff}/c_o$ , coeficientes de filtração  $\lambda$  e  $\lambda^*$ , probabilidade de a partícula ser capturada ( $q$ ) e distância entre os sítios de retenção ( $\Delta$ ).

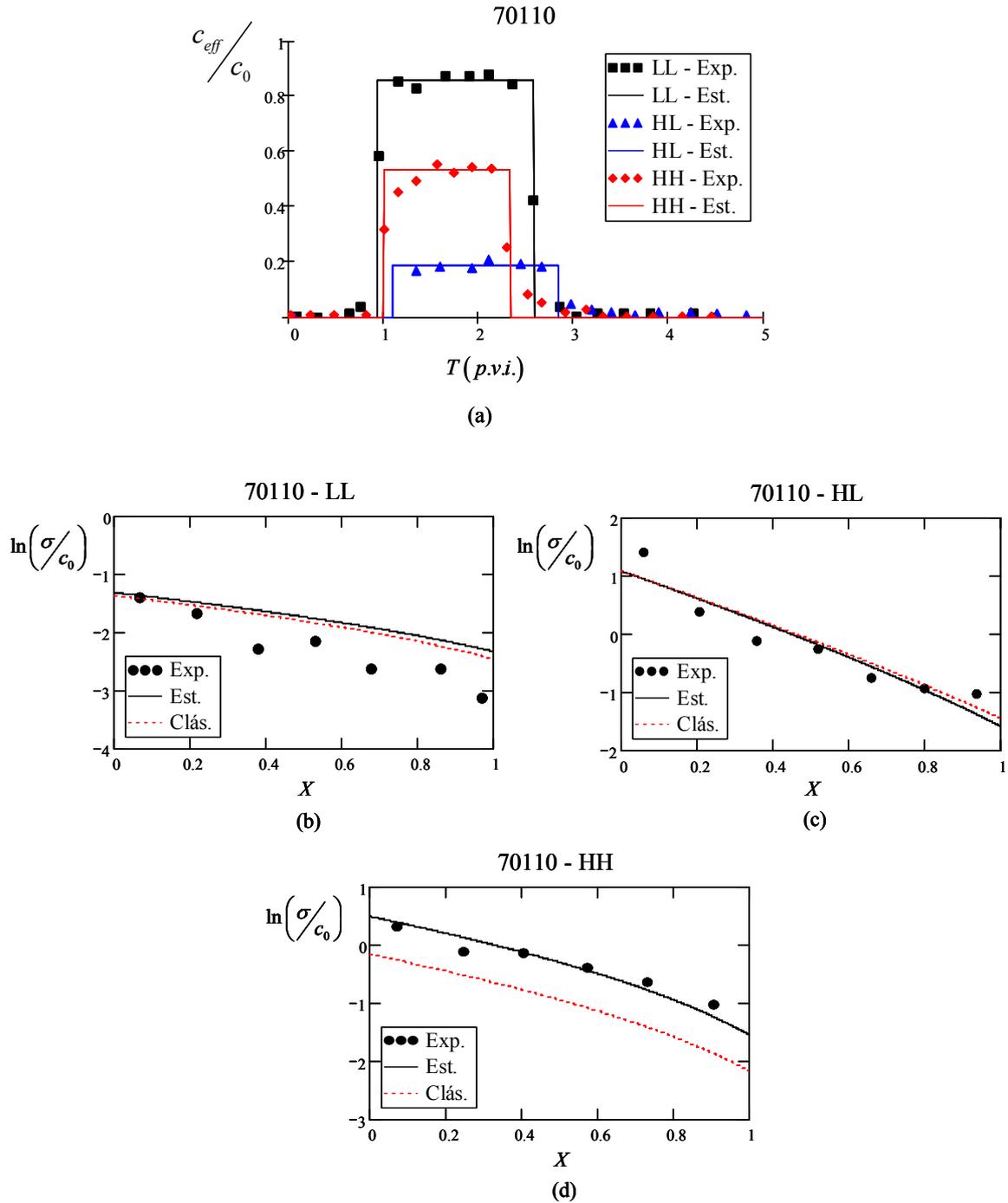


Figura 6.9. (a) Curva de *breakthrough* e concentração de partículas retidas e previsão do modelo clássico e do modelo estatístico para partículas de diâmetro de 1,0 $\mu$ m (b) força iônica e velocidade baixa (c) força iônica alta e velocidade baixa (d) força iônica alta e velocidade alta, ao longo do meio poroso 70110.

Tabela 6.2. Valores de  $\lambda$  e  $\lambda^*$ ,  $q$  e  $\Delta$ .

<i>Meio poroso</i>	$d_s$ ( $\mu\text{m}$ )	$c_{eff}/c_0$	$\lambda$ (1/m)	$\lambda^*$ (1/m)	$q$	$\Delta$ (m)
2030	0,45	0,84	1,42	1,43	0,011	0,00780
2030	1,00	0,83	1,59	1,59	0,002	0,00126
2030	2,00	0,45	6,71	6,71	0,001	0,00015
2030	3,20	0,40	7,07	7,89	0,194	0,03051
3550	0,45	0,79	2,01	2,23	0,181	0,09924
3550	1,00	0,82	1,18	1,72	0,510	0,60453
3550	2,00	0,23	11,74	11,74	0,001	0,00009
3550	3,20	0,30	8,99	8,99	0,001	0,00011
MIX	0,45	0,88	0,89	1,52	0,630	1,12345
MIX	1,00	0,80	1,75	1,75	0,002	0,00115
MIX	2,00	0,11	18,28	18,28	0,001	0,00005
MIX	3,20	0,09	18,64	20,12	0,140	0,00809
70110	0,45	0,63	3,43	4,41	0,383	0,14070
70110	1,00	0,41	6,51	6,51	0,001	0,00015
70110	2,00	0,05	22,81	27,59	0,309	0,01621
70110	3,00	0,04	26,50	26,59	0,007	0,00027
70110	3,20	0,03	29,86	38,36	0,382	0,01612
GB	0,45	0,64	4,318	4,31	0,001	0,00023
GB	1,00	0,16	18,26	18,26	0,001	0,00005
GB	2,00	0,13	20,79	20,79	0,001	0,00005
GB	3,20	0,03	36,438	36,44	0,001	0,00003

Como pode ser observado na Tabela 6.2 os valores de  $\lambda$  e  $\lambda^*$  variam desde 1,18 até 36,44 o que faz com que os valores de  $q$  e  $\Delta$  também variem bastante. Quando os valores de  $\lambda$  e  $\lambda^*$  diferem muito para uma mesma amostra, o que ocorre, geralmente, é que o modelo proposto apresenta uma previsão melhor para o comportamento das partículas retidas no meio poroso. Por outro lado, quando  $\lambda$  e  $\lambda^*$  se aproximam muito um do outro, o modelo estatístico tende para o modelo clássico e a probabilidade  $q$  tende para zero.

A Tabela 6.3 apresenta os valores de erro padrão para o ajuste dos modelos clássico  $SE_{cla}$  e estatístico  $SE_{est}$ , bem como a probabilidade de captura por unidade de deslocamento  $q/\Delta$ .

Tabela 6.3. Parâmetros determinados a partir do tratamento dos dados experimentais utilizando a modelagem estatística.

<i>Meio poroso</i>	$d_s$ ( $\mu\text{m}$ )	$\lambda$ (1/m)	$\lambda^*$ (1/m)	$q/\Delta$ (1/m)	$SE_{cla}$	$SE_{est}$
2030	0,45	1,42	1,43	1,41	0,45	0,45
2030	1,00	1,59	1,59	1,58	0,84	0,84
2030	2,00	6,71	6,71	6,71	0,42	0,42
2030	3,20	7,07	7,89	6,36	0,62	0,52
3550	0,45	2,01	2,23	1,82	0,30	0,31
3550	1,00	1,18	1,72	0,84	0,48	0,25
3550	2,00	11,74	11,74	11,74	0,51	0,53
3550	3,20	8,99	8,99	8,99	0,55	0,55
MIX	0,45	0,89	1,52	0,56	0,64	0,27
MIX	1,00	1,75	1,75	1,75	0,27	0,27
MIX	2,00	18,28	18,28	18,28	0,63	0,66
MIX	3,20	18,64	20,12	17,30	0,69	0,65
70110	0,45	3,43	4,41	2,72	0,35	0,33
70110	1,00	6,51	6,51	6,51	0,72	0,59
70110	2,00	22,81	27,59	19,07	0,94	0,78
70110	3,00	26,50	26,59	26,40	0,94	0,78
70110	3,20	29,86	38,36	23,71	1,11	1,15
GB	0,45	4,32	4,32	4,32	1,05	1,07
GB	1,00	18,26	18,26	18,26	0,85	0,77
GB	2,00	20,79	20,79	20,79	0,75	0,60
GB	3,20	36,44	36,44	36,44	1,34	1,26

A Tabela 6.3 mostra que a probabilidade de captura por unidade de deslocamento ( $q/\Delta$ ) tem uma dependência não-monotônica com o tamanho de partículas. Isto ocorre porque com o aumento do tamanho da partícula, aumentam as probabilidades de retenção devido à exclusão pelo tamanho (*straining*), mas diminui a probabilidade de retenção devido à difusão, por exemplo. Além disso, quanto maior o tamanho da partícula maior a força de arraste e, conseqüentemente, menos intensa é a retenção de partículas por forças elétricas, por exemplo.

A Tabela 6.4 apresenta os valores dos coeficientes de filtração  $\lambda$  e  $\lambda^*$  para os dados experimentais do Bradford et al.,(2006b), bem como as probabilidades da partículas ser capturada ( $q$ ) e das distâncias entre os sítios de retenção ( $\Delta$ ).

Tabela 6.4. Valores de  $\lambda$  e  $\lambda^*$ ,  $p$  e  $\Delta$  para os dados de Bradford et al., (2006b)

<i>Meio poroso</i>	$d_s$ ( $\mu\text{m}$ )	$mM$	$U$ (m/s)	$\lambda$ (1/m)	$\lambda^*$ (1/m)	$q$	$\Delta$ (m)
70110	1,00	6	3,5E-05	1,209	1,209	0,001	0,00083
70110	1,00	56	3,5E-05	13,272	14,649	0,176	0,01459
70110	1,00	56	7,5E-05	4,993	9,672	0,700	0,24113

Na Tabela 6.4 os valores dos coeficientes de filtração  $\lambda$  e  $\lambda^*$  nos dois primeiros casos são bem próximos, o que acarreta valores de  $q$  próximos de zero. Comparando os dois últimos casos (velocidades  $3,5 \times 10^{-5}$  m/s e  $7,5 \times 10^{-5}$  m/s) nota-se que o aumento da velocidade gerou uma redução nos coeficientes de filtração.

A Tabela 6.5 apresenta os valores de erro padrão para cada experimento bem como a probabilidade de captura por unidade de deslocamento.

Tabela 6.5. Parâmetros determinados a partir do tratamento dos dados experimentais utilizando a modelagem estatística.

<i>Meio poroso</i>	$d_s$ ( $\mu\text{m}$ )	$mM$	$U$ (m/s)	$\lambda$ (1/m)	$\lambda^*$ (1/m)	$q/\Delta$ (1/m)	$SE_{cla}$	$SE_{est}$
70110	1,00	6	3,5E-05	1,209	1,209	1,209	0,550	0,630
70110	1,00	56	3,5E-05	13,272	14,649	12,063	0,320	0,320
70110	1,00	56	7,5E-05	4,993	9,672	2,903	0,810	0,180

Na Tabela 6.5 é possível observar que o aumento da velocidade resultou no decréscimo dos coeficientes de filtração. Além disso, para velocidade alta ( $7,5 \times 10^{-5}$  m/s) o erro padrão para o modelo estatístico foi muito menor que o erro padrão para o modelo clássico, o que traduz um melhor ajuste (ver Figura 6.9).

### 6.2.2 - Experimento 02

Nesse experimento foram injetados dois tamanhos de partículas,  $1,0\mu\text{m}$  e  $3,2\mu\text{m}$ , em três meios porosos, 3550, MIX e 70110.

Quatro diferentes níveis de concentrações iniciais ( $c_o$ ) foram utilizados:  $2*cr$ ,  $1*cr$ ,  $0,5*cr$ ,  $0,25*cr$ , onde  $cr$  é  $3,86 \times 10^{10} \text{ N.L}^{-1}$  e de  $1,18 \times 10^9 \text{ N.L}^{-1}$  para as partículas com diâmetros de  $1,0 \mu\text{m}$  e  $3,2 \mu\text{m}$  respectivamente.

As Figuras 6.10 – 6.15 apresentam os gráficos com os pontos experimentais medidos por Bradford et al. (2006) e as curvas de previsão de comportamento para o modelo clássico e o modelo estatístico.

As Figuras 6.10 – 6.15 mostram que, para uma dada concentração de injeção foi diminuído o tamanho da areia (tamanho médio dos poros do meio poroso, ver Tabela 5.1) e aumentado o tamanho do diâmetro das partículas injetadas, o que resultou em um aumento da massa de retida perto da “entrada” do meio poroso (ver Figuras 6.10 – 6.15), e menor concentrações relativas ( $c_{eff}/c_o$ ) no fim da coluna.

Pode-se verificar que, nos experimentos realizados por Bradford et al. (2006a), quanto maior a concentração de partículas injetada, menor é a concentração efluente relativa (ver Figura 6.10a). Este comportamento é contrário ao esperado, pois quanto maior a concentração, maior a agregação de partículas e, portanto, maior a probabilidade de retenção por exclusão pelo tamanho. Além disso, quanto maior a concentração de partículas em suspensão, maior a probabilidade de ocorrer formação de pontes (*bridging*). Entretanto, este fato não foi comentado por Bradford et al. (2006a).

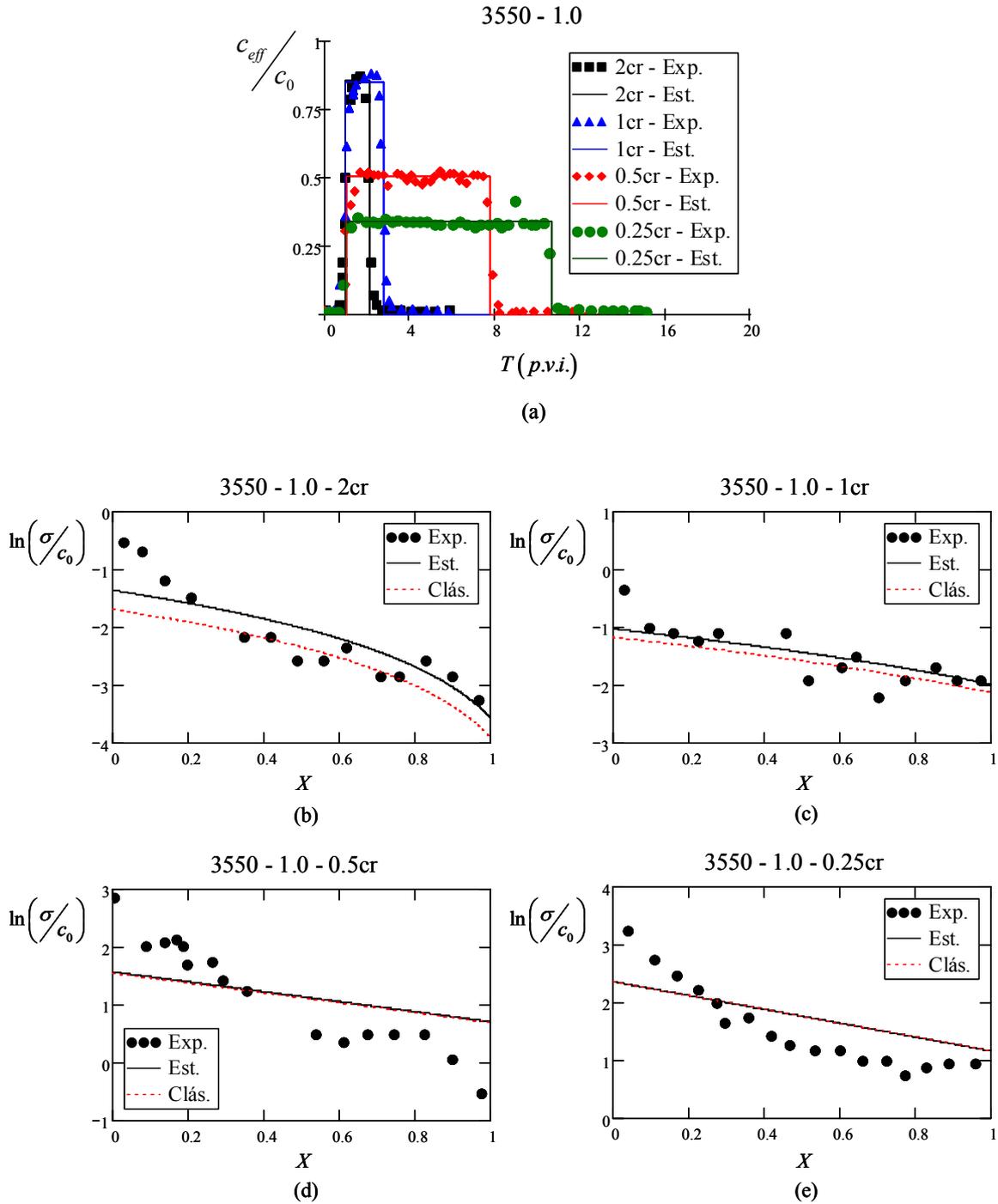


Figura 6.10. (a) Curva de *breakthrough*, concentração de partículas retidas e previsão do modelo clássico e do modelo estatístico para partículas de diâmetro 1,0 $\mu$ m e relação de concentração de referência (b) 2cr, (c) 1cr, (d) 0,5 cr e (d) 0,25 cr ao longo do meio poroso 3550.

Para o meio poroso 3550 e partículas injetadas de  $1,0\mu\text{m}$  a previsão de comportamento do modelo estatístico para retenção de partículas suspensas no meio poroso foi idêntica à previsão do modelo clássico para a concentração de  $0,5cr$  e  $0,25cr$  (Figura 6.10d e Figura 6.10e).

Para a concentração de injeção de  $2cr$  a previsão do modelo estatístico para retenção de partículas suspensas no meio poroso é visivelmente melhor que o ajuste feito pelo modelo clássico (ver Tabela 6.7). Para a relação de concentração de injeção igual à concentração de referência,  $1cr$  (Figura 6.10c) a previsão de comportamento do modelo proposto foi um pouco melhor que a previsão do modelo clássico (ver Tabela 6.7).

A previsão do comportamento da retenção de partículas suspensas no meio poroso feita pelo modelo clássico para o meio poroso 3550 e diâmetro de partículas injetadas de  $3,2\mu\text{m}$  apresenta um melhor ajuste que a previsão para o modelo estatístico para o caso de concentração de injeção de  $1cr$  e  $0,5cr$  (ver Tabela 6.7), como pode ser observado nas Figuras 6.11c e 6.11d.

Nas Figuras 6.11c – 6.11e os pontos experimentais estão quase todos abaixo da curva de previsão, o que pode indicar a possível ocorrência de liberação de partículas retidas (*detachment*) no meio poroso.

Pode-se observar que quanto menor a concentração de partículas injetadas maior é a retenção de partículas no meio poroso (ver Figuras 6.11b – 6.11e). É bom salientar que os tempos de injeção ( $T^*$ ) foram maiores para as menores concentrações injetadas.

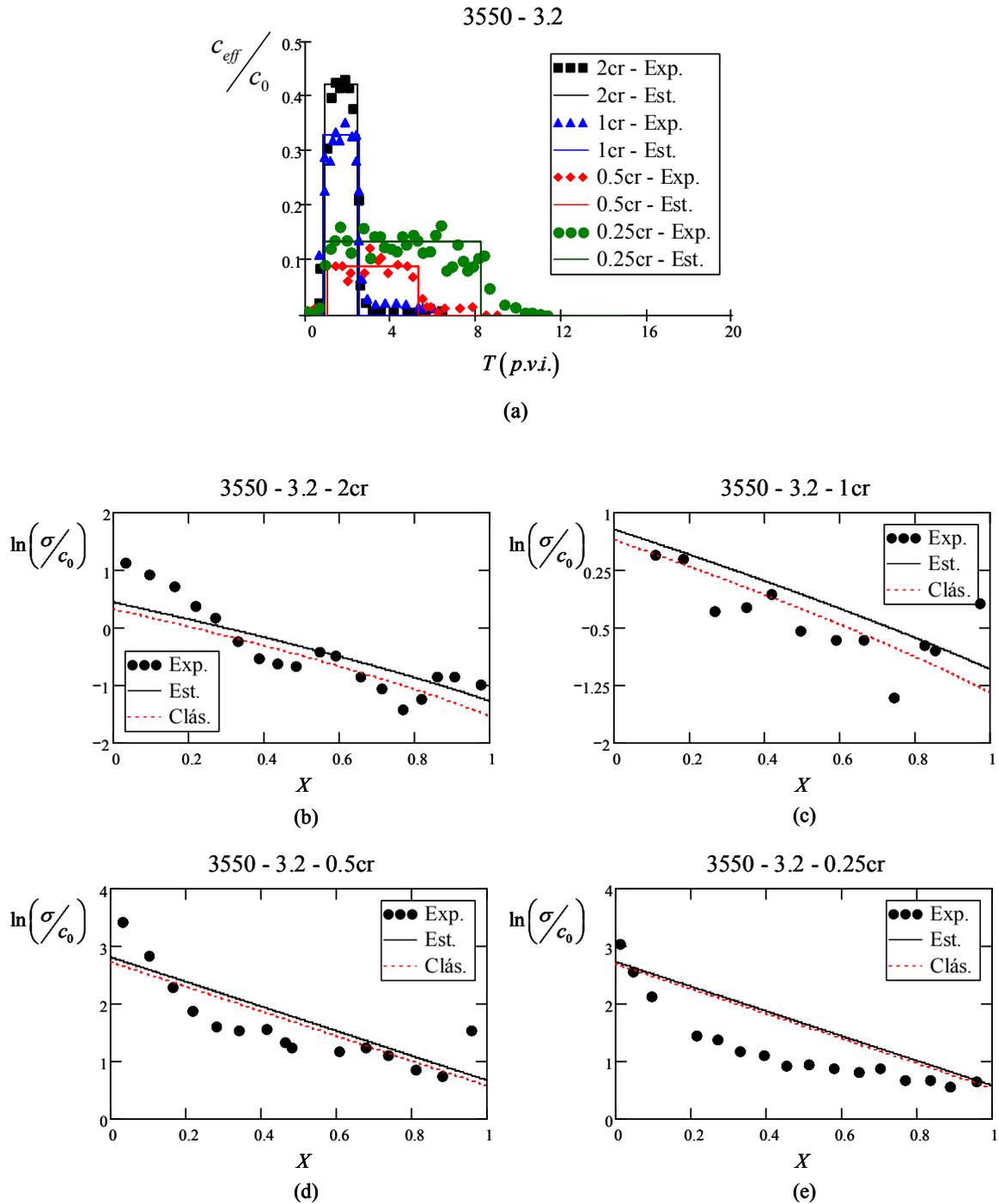


Figura 6.11. (a) Curva de *breakthrough*, concentração de partículas retidas e previsão do modelo clássico e do modelo estatístico para partículas de diâmetro  $3,2\mu\text{m}$  e relação de concentração de referência (b)  $2cr$ , (c)  $1cr$ , (d)  $0,5 cr$  e (e)  $0,25 cr$  ao longo do meio poroso 3550.

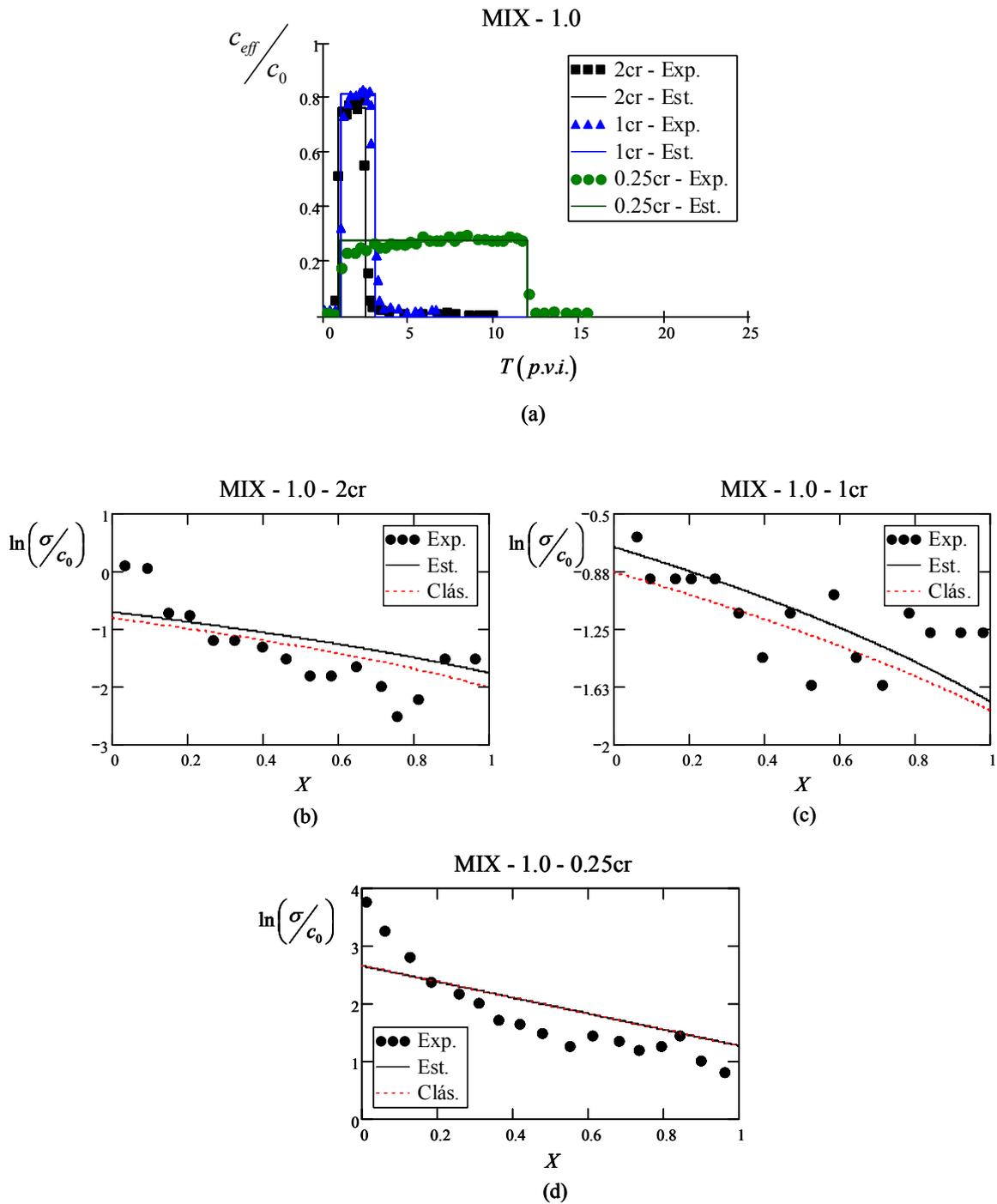


Figura 6.12. (a) Curva de *breakthrough*, concentração de partículas retidas e previsão do modelo clássico e do modelo estatístico para partículas de diâmetro 1,0 $\mu$ m e relação de concentração de referência (b) 2cr, (c) 1cr e (d) 0,25 cr ao longo do meio poroso MIX.

Para partículas de  $1,0\mu\text{m}$  injetadas no meio poroso MIX a previsão de comportamento de retenção de partículas no meio poroso feita pelo modelo proposto é melhor do que a previsão do modelo clássico para a concentração de partículas injetadas de  $1cr$  (Figura 6.12c) e pior para a concentração de  $2cr$  (Figura 6.12b). Para a concentração de  $0,25cr$  (Figura 6.12d) o modelo estatístico apresenta um ajuste igual à previsão de comportamento do modelo clássico (ver Tabela 6.7).

A amostra MIX –  $1\mu\text{m}$  –  $0,5cr$  não é apresentada aqui, pois o coeficiente de filtração ( $\lambda$ ) não se comporta de forma constante.

O fato de a previsão do perfil de retenção estar acima dos pontos experimentais para a injeção de  $1,0\mu\text{m}$  no meio poroso MIX (ver Figura 6.12) sugere a ocorrência de liberação de partículas (*detachment*).

Para a injeção de partículas de diâmetro  $1,0\mu\text{m}$  no meio poroso MIX, o comportamento previsto pelo modelo estatístico para concentração de partículas retidas é muito próximo à previsão obtida a partir do modelo clássico. Aumentando-se o diâmetro da partícula injetada para  $3,2\mu\text{m}$  o ajuste da concentração de partículas retidas utilizando modelo estatístico mostrou-se melhor em relação ao ajuste do comportamento feito pelo modelo clássico (ver Tabela 6.7). Esse comportamento pode ser observado de forma mais clara observando os gráficos plotados na Figura 6.13 e comparando-os com os gráficos da Figura 6.12, e em especial a Figura 6.13d onde o ajuste do modelo estatístico é visivelmente muito melhor que o ajuste feito pelo modelo clássico.

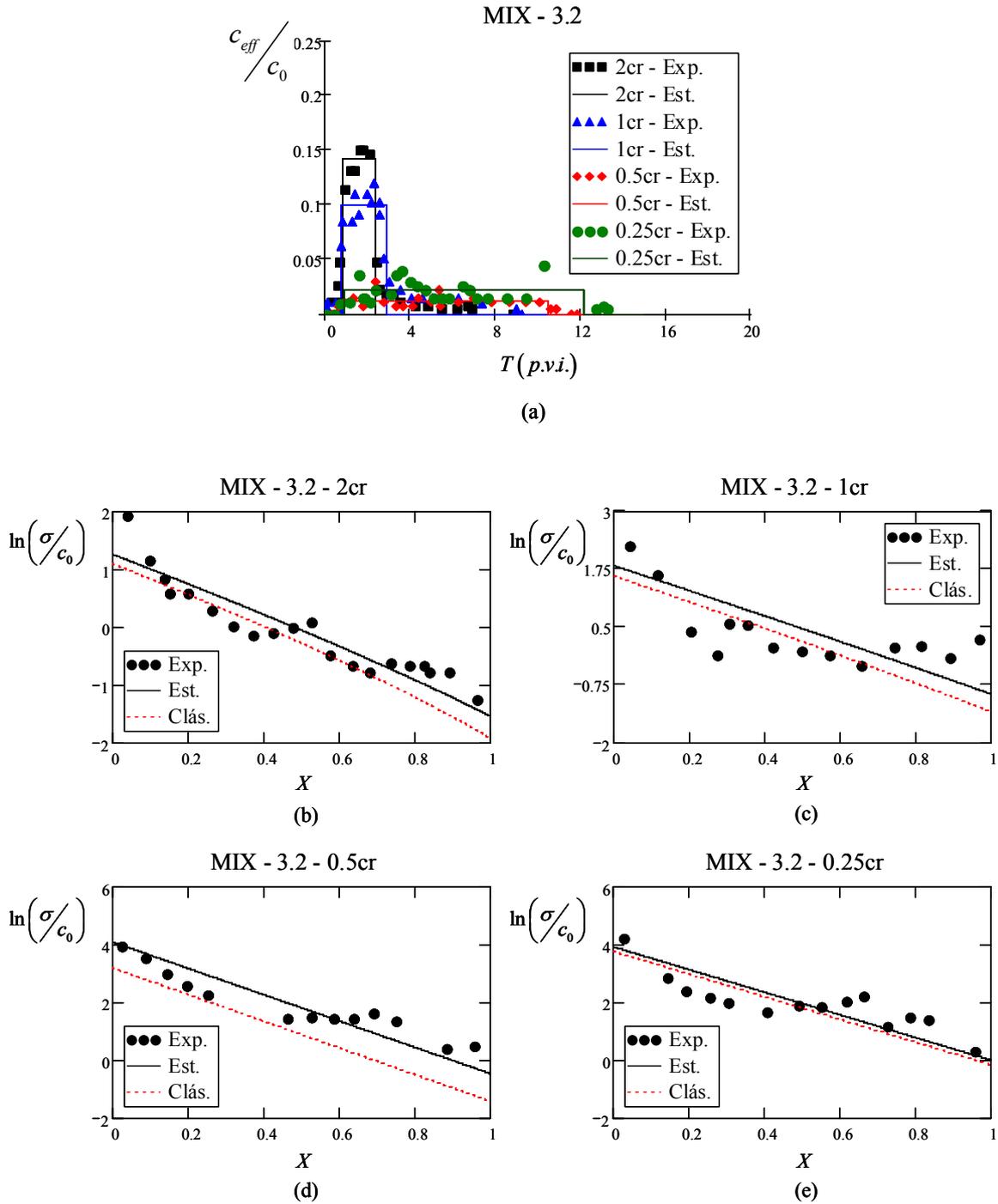


Figura 6.13. (a) Curva de *breakthrough*, concentração de partículas retidas e previsão do modelo clássico e do modelo estatístico para partículas de diâmetro 3,2 $\mu$ m e relação de concentração de referência (b) 2cr, (c) 1cr, (d) 0,5 cr e (e) 0,25 cr ao longo do meio poroso MIX.

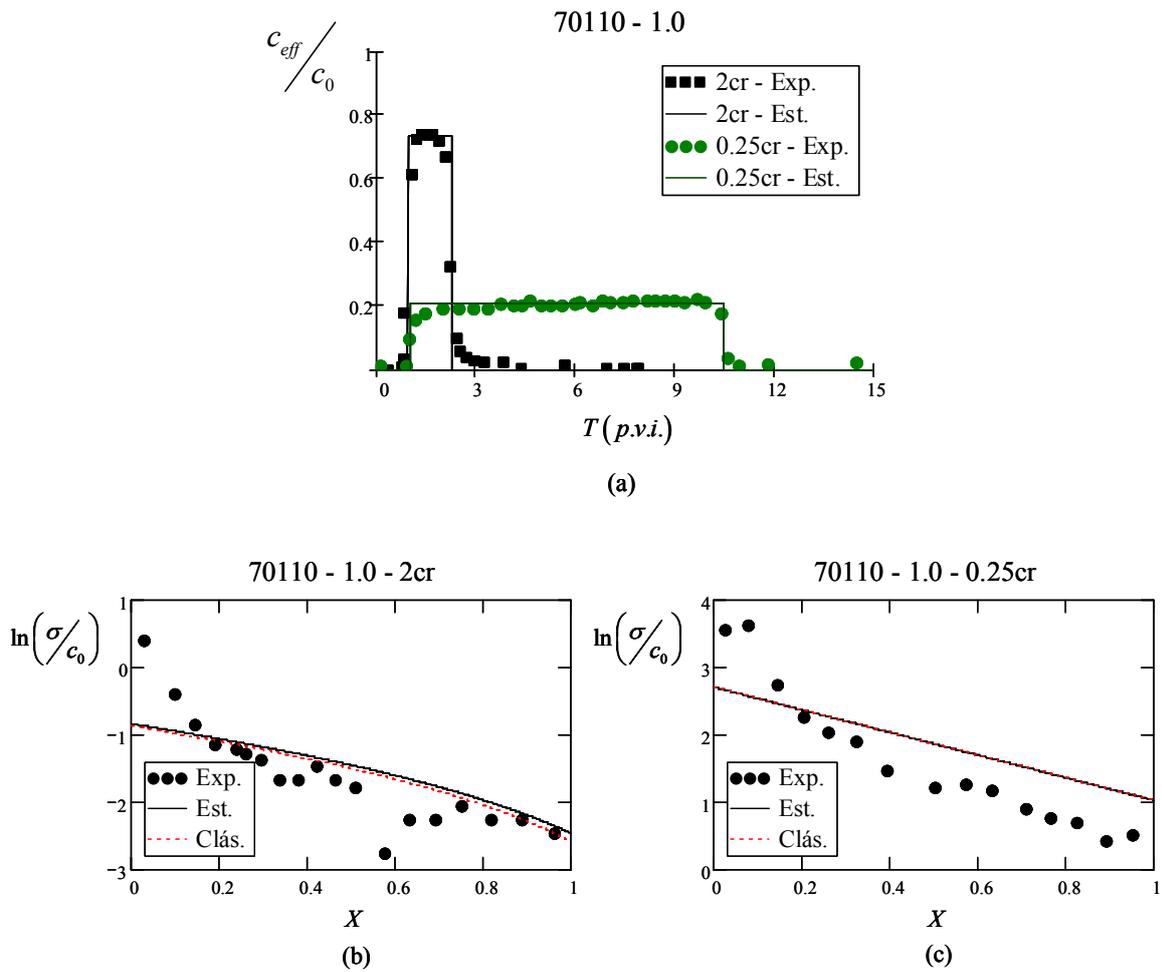


Figura 6.14. (a) Curva de *breakthrough*, concentração de partículas retidas e previsão do modelo clássico e do modelo estatístico para partículas de diâmetro  $1,0\mu\text{m}$  e relação de concentração de referência (b)  $2cr$ , (c)  $0,25cr$  ao longo do meio poroso 70110.

Conforme discutido anteriormente, quanto menor o tamanho das partículas injetadas menor é a probabilidade de captura, e mais o modelo estatístico se aproxima do ajuste do comportamento feita pelo modelo clássico. Ou seja,  $\lambda^*$  tende para  $\lambda$  (ver Tabela 6.7).

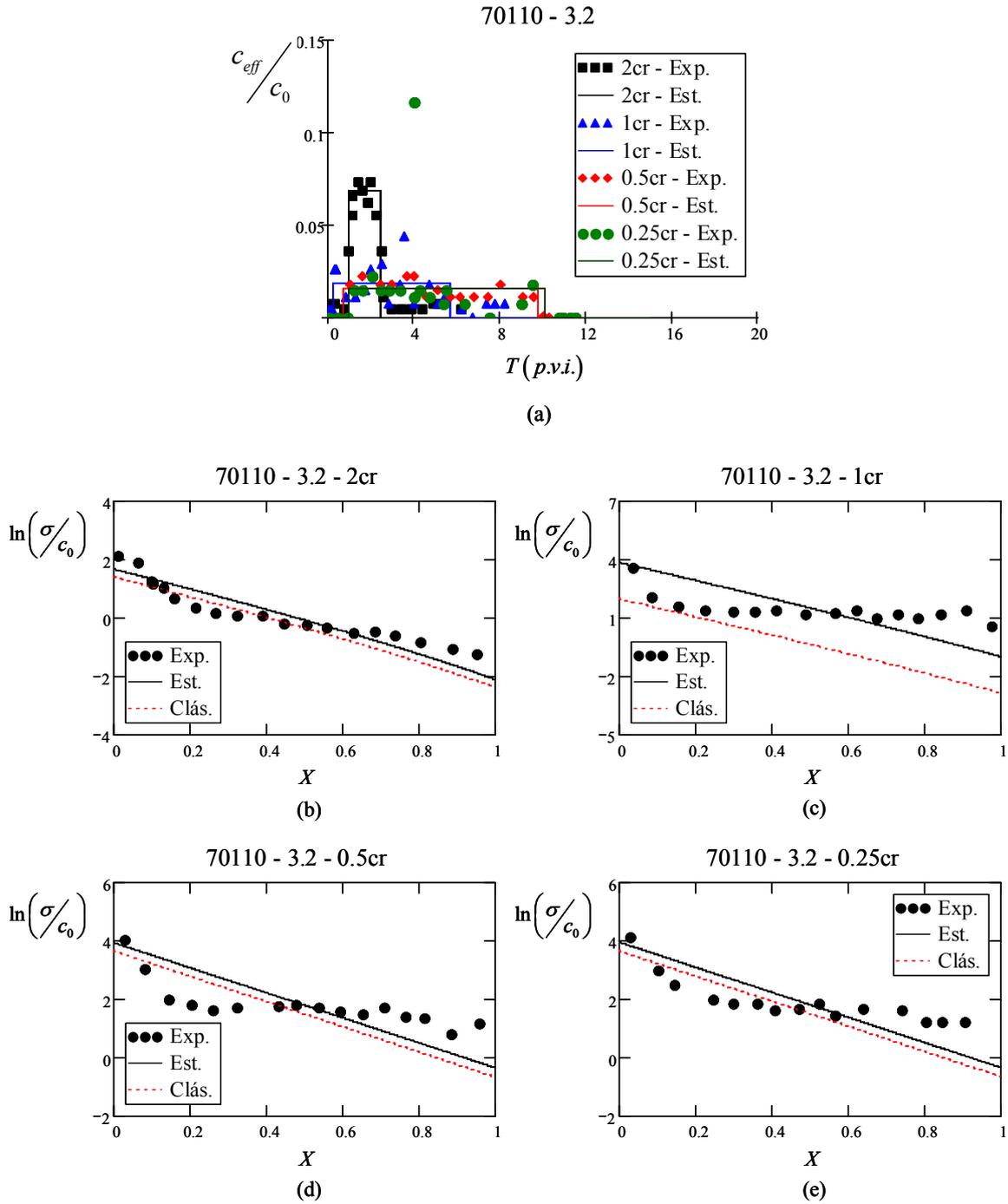


Figura 6.15. (a) Curva de *breakthrough*, concentração de partículas retidas e previsão do modelo clássico e do modelo estatístico para partículas de diâmetro  $3,2\mu\text{m}$  e relação de concentração de referência (b)  $2cr$ , (c)  $1cr$ , (d)  $0,5 cr$  e (e)  $0,25 cr$  ao longo do meio poroso 70110.

Para o meio poroso 70110, que tem o menor diâmetro médio de grão (o que acarreta menores diâmetros de poros e gargantas), e partículas injetadas de  $3,2\mu\text{m}$  a previsão do modelo proposto para a concentração de partículas retidas ao longo do meio poroso mostrou-se mais adequada (ver Tabela 6.7).

Pode-se observar na Figura 6.15a que a razão entre o número de partículas efluente e o de partículas injetadas é menor que nos outros meios porosos.

Na Figura 6.15 é possível admitir que quanto maior o diâmetro das partículas injetadas, e menor o diâmetro médio dos grãos que compõem o meio poroso, melhor é o ajuste do comportamento de partículas retidas ao longo do meio poroso feito pelo modelo proposto em relação ao modelo clássico.

Conforme discutido anteriormente e a partir das comparações feitas dos gráficos plotados nas Figuras 6.10 – 6.15 pode-se concluir que quanto menor o tamanho das partículas injetadas menor é a probabilidade de captura e mais o modelo proposto se aproxima do ajuste do comportamento feito pelo modelo clássico; ou seja,  $\lambda^*$  tende para  $\lambda$  (ver Tabela 6.7).

A Tabela 6.6 apresenta os valores dos coeficientes de filtração,  $\lambda$  e  $\lambda^*$ , a probabilidade de retenção de partículas ( $q$ ) e a distância entre os sítios de retenção ( $\Delta$ ).

Tabela 6.6. Valores de  $\lambda$  e  $\lambda^*$ ,  $q$  e  $\Delta$ .

<i>Meio poroso</i>	$d_s$ ( $\mu\text{m}$ )	$c_o/c_r$	$\lambda$ (1/m)	$\lambda^*$ (1/m)	$q$	$\Delta$ (m)
3550	1,00	2,00	1,598	2,222	0,466	0,39259
3550	1,00	1,00	1,321	1,529	0,249	0,21677
3550	1,00	0,50	6,920	7,440	0,138	0,02146
3550	1,00	0,25	10,876	10,876	0,001	0,00009
3550	3,20	2,00	8,663	8,666	0,045	0,00532
3550	3,20	1,00	8,665	8,665	0,001	0,00012
3550	3,20	0,50	24,259	46,642	0,696	0,04908
3550	3,20	0,25	20,068	20,068	0,001	0,00005
MIX	1,00	2,00	2,690	2,690	0,001	0,00037
MIX	1,00	1,00	1,659	2,149	0,392	0,29993
MIX	1,00	0,25	12,894	12,894	0,001	0,00008
MIX	3,20	2,00	19,547	20,025	0,047	0,00246
MIX	3,20	1,00	18,492	18,492	0,001	0,00005
MIX	3,20	0,50	44,091	44,091	0,001	0,00002
MIX	3,20	0,25	38,282	42,461	0,184	0,00531
70110	1,00	2,00	3,133	3,133	0,001	0,00032
70110	1,00	0,25	15,693	15,693	0,001	0,00006
70110	3,20	2,00	26,795	35,128	0,405	0,01938
70110	3,20	1,00	30,782	30,782	0,001	0,00003
70110	3,20	0,50	41,955	50,253	0,598	0,02173
70110	3,20	0,25	41,750	56,002	0,429	0,01342

Na Tabela 6.6 os valores dos coeficientes de filtração variam desde 1,321 à 56,002, as probabilidades  $q$  também variam muito, desde 0,001 até 0,696. Quando a probabilidade  $q$  tende para zero o modelo estatístico tende para o modelo clássico.

A Tabela 6.7 apresenta os valores de erro padrão para cada experimento bem como a probabilidade de captura por unidade de deslocamento.

Tabela 6.7. Parâmetros determinados a partir do tratamento dos dados experimentais utilizando a modelagem estatística.

<i>Meio poroso</i>	$d_s$ ( $\mu\text{m}$ )	$c_o/c_r$	$\lambda$ (1/m)	$\lambda^*$ (1/m)	$q/\Delta$ (1/m)	$SE_{cla}$	$SE_{est}$
3550	1,00	2,00	1,598	2,222	1,187	0,584	0,462
3550	1,00	1,00	1,321	1,529	1,149	0,358	0,321
3550	1,00	0,50	6,920	7,440	6,434	0,709	0,706
3550	1,00	0,25	10,876	10,876	10,876	0,508	0,508
3550	3,20	2,00	8,663	8,666	8,467	0,431	0,402
3550	3,20	1,00	8,665	8,665	8,665	0,461	0,504
3550	3,20	0,50	24,259	46,642	14,180	0,445	0,470
3550	3,20	0,25	20,068	20,068	20,068	0,453	0,405
MIX	1,00	2,00	2,690	2,690	2,690	0,528	0,574
MIX	1,00	1,00	1,659	2,149	1,307	0,280	0,265
MIX	1,00	0,25	12,894	12,894	12,894	0,509	0,509
MIX	3,20	2,00	19,547	20,025	19,084	0,424	0,321
MIX	3,20	1,00	18,492	18,492	18,492	0,718	0,675
MIX	3,20	0,50	44,091	44,091	44,091	1,141	0,625
MIX	3,20	0,25	38,282	42,461	34,634	0,647	0,623
70110	1,00	2,00	3,133	3,133	3,133	0,501	0,521
70110	1,00	0,25	15,693	15,693	15,693	0,645	0,645
70110	3,20	2,00	26,795	35,128	20,902	0,507	0,418
70110	3,20	1,00	30,782	30,782	30,781	1,091	0,957
70110	3,20	0,50	41,955	50,253	20,197	0,918	0,855
70110	3,20	0,25	41,750	56,002	31,951	0,793	0,722

Na Tabela 6.7 a probabilidade de captura por unidade de deslocamento varia desde 1,149 até 44,091. É importante mencionar que, mesmo os coeficientes de filtração  $\lambda$  e  $\lambda^*$  sendo iguais, os valores dos erros padrões são diferentes em alguns casos. Isso se explica devido a modelagem estatística considerar que a velocidade da “frente de concentração” é diferente da velocidade da “frente de água”; ou seja,  $\alpha$  é diferente de 1 no modelo proposto.

---

Capítulo 7

Conclusões

---

## **7. Conclusões**

A modelagem estatística explica algumas discrepâncias apresentadas entre os dados experimentais e a previsão do modelo clássico. Além disso, a modelagem estatística apresentou melhor concordância com os dados experimentais do que a modelagem clássica para a filtração em meios porosos.

A partir da modelagem proposta concluímos que:

- i) Em geral, não é possível agregar os efeitos da probabilidade de captura “ $q$ ” e da distância entre os “sítios de retenção” em somente um parâmetro (coeficiente de filtração), como considerado na modelagem clássica;
- ii) O modelo proposto possibilita uma melhor interpretação física dos parâmetros envolvidos (probabilidade de captura e distância entre os sítios de retenção). A partir destes parâmetros, podemos calcular o valor do coeficiente de filtração do modelo clássico;
- iii) O modelo proposto apresenta dois parâmetros (coeficiente de filtração e coeficiente de filtração modificado, isto porque os coeficientes de filtração dependem da probabilidade de captura e da distância entre os sítios de retenção) para o ajuste das concentrações de partículas retidas e em suspensão;
- iv) A penetração média das partículas injetadas no meio poroso foi determinada analiticamente, verificando-se que ela é igual ao inverso do coeficiente de filtração modificado. Este fato pode ser utilizado para dimensionar a quantidade de ácido injetado durante uma intervenção, por exemplo.
- v) Foi mostrado que o coeficiente de filtração (presente no modelo estatístico) é igual ao coeficiente de filtração do modelo clássico.
- vi) Quanto maior a probabilidade de captura, maior é a divergência entre as modelagens clássica e estatística.
- vii) Quando a probabilidade de captura e a distância entre os “sítios de retenção” tendem para zero, o modelo proposto tende para o modelo clássico;
- viii) Para o caso do mecanismo de exclusão pelo tamanho, a probabilidade de captura depende do tamanho dos poros e das partículas.

Se as partículas em suspensão fossem retidas somente por exclusão pelo tamanho (*straining*), quanto maior fosse o tamanho da partícula, maior deveria ser a intensidade de retenção.

Como a intensidade de retenção não tem uma dependência monotônica (ver Tabela 6.3 e Tabela 6.7) com o tamanho das partículas, concluímos que a exclusão pelo tamanho não é o único mecanismo de retenção atuante nos casos estudados.

## **Sugestões para Trabalhos Futuros**

Uma modelagem para o transporte de suspensões que inclua as probabilidades de captura de partículas devido a diferentes mecanismos é essencial para entender a filtração em meios porosos. Isso permitiria distinguir entre os mecanismos de retenção mais importantes e, portanto, possibilitaria uma escolha mais criteriosa dos métodos para minimizar o dano à formação.

Desenvolver critérios (baseados na modelagem estatística) para o dimensionamento de filtros para o tratamento da água de injeção.

Desenvolver um modelo para filtração em meios poroso que considere probabilidades de captura variáveis.

Realizar experimentos de injeção de fluido com partículas suspensas e logo após a injeção não injetar solvente minimizando a liberação de partículas retidas (*detachment*).

Aplicar as previsões do modelo estatístico à dados experimentais e comparar as probabilidades de captura por unidade de comprimento com as penetrações médias encontradas no laboratório.

## **Trabalhos Publicados / Submetidos**

SANTOS, A., BARROS, P.H.L., Characterization of pore structure: Stochastic model for filtration and its inverse problem. (Apresentação de Trabalho/Congresso). COI, 2007

BARROS, P. H. L., SANTOS, A., Modelo estatístico para o transporte de suspensões em meios porosos, *Rio Oil & Gás*, 2008

BARROS, P. H. L., SANTOS, A., Experimental Modeling for Suspension Transport in Porous media: Deviation from the Classical Filtration Model (Submetido para o *AIChE J.*, 2008).

BARROS, P. H. L., SANTOS, A., Deviation of the classical model for filtration and its consequences on injectivity decline prediction. (LACPEC 09, Cartagena, Colombia – submetido em Outubro de 2008).

BARROS, P. H. L., SANTOS A., Deviation from the Classical DBF Model: Analytical and Experimental Modeling (8th European Formation Damage Conference – submetido em Outubro de 2008)

## Referências Bibliográficas

AHFIR, N., WANG, H. Q., BENAMAR, A., ALEM, A., MASSEI, N., DUPONT, J., Transport and deposition of suspended particles in saturated porous media: hydrodynamic effect, *Hydrogeology Journal*, V.15: p.659–668, 2007.

BARROS, P. H. L., SANTOS, A. Experimental Modeling for Suspension Transport in Porous media: Deviation from the Classical Filtration Model (Submetido para o *AICHE J.*, 2008).

BARTELD, G. A., BRUINING, J. AND MOLENAAR, J., The Modeling of Velocity Enhancement in Polymer Flooding, *Transport in Porous Media*, V.26, p.75–88, 1997.

BEDRIKOVETSKY, P., MARCHESIN, D., HIME, G., ALVAREZ, A., SIQUEIRA, A. G., SERRA, A. L., RODRIGUES, J. R. P., MARCHESIN, A., VINICIUS, M., Inverse Problems for Treatment of Laboratory Data on Injectivity Impairment, *SPE 86523*, 2004.

BEDRIKOVETSKY, P., TRAN, P., VAN DEN BROEK, W .M. G. T, MARCHESIN, D., REZENDE, E., SIQUEIRA, A., SERRA, A. L., SHECAIRA F., Damage Characterization of Deep Bed Filtration from Pressure Measurements, *SPE 7466*, 2002.

BOLSTER, C. H., A. L. MILLS, G. M. HORNBERGER, and J. S. HERMAN, Spatial distribution of deposited bacteria following miscible displacement experiments in intact cores, *Water Resour. Res.*, V.35, p.1797– 1807, 1999.

BRADFORD, S. A., BETTAHAR, M., Concentration dependent transport of colloids in saturated porous media, *Elsevier Journal of Contaminant Hydrology*, n.82, p. 99– 117, 2006a.

BRADFORD, S. A., SIMUNEK J., BETTAHAR, M., VAN GENUCHTEN, M. T., and YATES, S. R., Significance of straining in colloid deposition: Evidence and implications, *Water Resources Research*, V.42, 2006b.

BRADFORD S. A., SIMUNEK, J., BETTAHAR, M., TADASSA, Y.F., VAN GENUCHTEN, M.T., and YATES, S.R., Straining of colloids at textural interfaces, *Water Resources Research*, V.41, 2005.

BRADFORD, S. A., BETTAHAR, M., SIMUNEK, J., VAN GENUCHTEN, M.T.H. Straining and attachment of colloids in physically heterogeneous porous media. *Vadose Zone J.*, n.3, p.384-394, 2004.

BRADFORD, S. A., SIMUNEK, J.; BETTAHAR, M., VAN GENUCHTEN, M. T., YATES, S. R. Modeling colloid attachment, straining, and exclusion in saturated porous media. *Environ. Sci. Technol.*, n.37, p.2242-2250, 2003.

BRADFORD, S. A., YATES, S. R.; BETTAHAR, M.; SIMUNEK, J. Physical factors affecting the transport and fate of colloids in saturated porous media. *Water Resour. Res.*, V.38, p.1327-1338, 2002.

BRADFORD, S. A., ABRIOLO, L.M, Dissolution of residual tetrachloroethylene in fractional wettability porous media: Incorporation of interfacial area estimates, *Water Resour. Res.*, V.37, n.5, p.1183–1195, 2001.

CHAUVETEAU, G., NABZAR, L. AND COSTE, J-P., Physics and Modeling of Permeability Damage Induced by Particle Deposition, *SPE 39463*, 1998.

CORAPCIOGLU, M. Y., and H. CHOI, Modeling colloid transport in unsaturated porous media and validation with laboratory column data, *Water Resour. Res.*, V.32, p.3437–3449, 1996.

COSTA, T., LANÇA, R., Apostila de escoamento em meios porosos, Universidade Algarve, 2001

CUSHING, R. S., and D. F. LAWLER, Depth filtration: Fundamental investigation through three-dimensional trajectory analysis, *Environ. Sci. Technol.*, V.32, p.3793–3801, 1998.

DAWSON, R., LANTZ R.B., Inaccessible Pore Volume in Polymer Flooding. *Soc Petr Eng J.*, p.448-452, 1972.

DAWSON, R. and LANTZ, R. B. Inaccessible pore volume in polymer flooding, *Soc. Petr. Eng. J.*, p.448-452., 1972

DULLIEN, F.A. L., Porous media: fluid transport and pore structure, *San Diego: Academic Press*, 1979.

ELIMELECH, M., and O'MELIA, C. R., Kinetics of deposition of colloidal particles in porous media, *Environ. Sci. Technol.*, V.24, p.1528–1536, 1990.

FOX, R. W., McDONALD, A. T., Introduction to Fluid Mechanics, 4 ed., *University of Toronto Press, Toronto, Canada*, 1995.

HARVEY, R. W., and S. P. GARABEDIAN Use of colloid filtration theory in modeling movement of bacteria through a contaminated sandy aquifer, *Environ. Sci. Technol.*, V.25, p.178–185,1991.

HERZIG, J.P., D. M. LECLERC, and P.LEGOFF, Flow of suspension through porous media: Application to deep filtration. *Ind. Eng. Chem. Res.*, n.62, p.129– 157, 1970.

IMDAKM, A. O., SAHIMI, M., Transport of large particles in flow through porous media, *Physical Review A*, V. 36, p.5304-5309, 1987.

IOANNIDIS, M. A., KWIECEN, M. J., CHATZIS, I., MACDONALD, I. F., DULLIEN, F. A. L., Comprehensive pore structure characterization using 3D computer reconstruction and stochastic modeling. *SPE 38713*, 1997.

IWAZAKI, T., Some notes on sand filtration, *J. Am. Water Works Ass.*, p.1591–1602, 1937.

JOHNSON, W. P., TONG, M., LI, X., On colloid retention in saturated porous media in the presence of energy barriers: The failure of  $\alpha$ , and opportunities to predict  $\eta$ , *Water Resources research*, V.43, 2007

KRETZSCHMAR, R., BARMETTLER, K., GROLIMUND, D., YAN, Y. D., BORKOVEC, M. AND STICHER, H. Experimental determination of colloid deposition rates and collision efficiencies in natural porous media. *Water Resour. Res.*, V.33, p.1129–1137, 1997.

LAUDONE, G.M., MATTHEWS, G.P., GANE, P.A.C., Modelling diffusion from simulated porous structures, *Chemical Engineering Science* n.63, p.1987– 1996, 2008.

LI, X., and W. P. JOHNSON , Nonmonotonic variations in deposition rate coefficients of microspheres in porous media under unfavorable deposition conditions, *Environ. Sci. Technol.*, V.39, p.1658– 1665, 2005.

MANEGOLD, E., *Kolloid-Z*, p.80, p.253, 1937.

MASSEI N., LACROIX M., WANG H. Q., DUPONT J., Transport of particulate material and dissolved tracer in a highly permeable porous medium: comparison of the transfer parameters. *Journal of Contaminant Hydrology* V.57, p.21– 39, 2002.

MATTHESS, G., AND A. PEKDEGER, Survival and transport of pathogenic bacteria and viruses in groundwater, in *Ground Water Quality*, edited by C. H. Ward, W. Giger, and P. McCarty, p. 472 – 482, John Wiley, New York, 1985.

OCHI, J., VERNOUXB, J., Permeability decrease in sandstone reservoirs by fluid injection hydrodynamic and chemical effects, *Journal of Hydrology*, V.208 p.237–248, 1998.

PANG, S., SHARMA, M. M. A Model for Predicting Injectivity Decline in Water-Injection Wells. *SPEFE*, 1997.

PAYATAKES, A. C., TIEN, C., TURIAN, R. M., A new model for granular porous media. I. Model formulation. *AIChE J.*, V.19(1), p.58-76, 1973.

PAYATAKES, A. S., RAJAGOPALAN, R. AND TIEN, C., Application of Porous Medium Models to the Study of Deep Bed Filtration. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, V.52, 1974.

QUAN CHEN, MURRAY K. GINGRAS, BRUCE J. BALCOM, A magnetic resonance study of pore filling processes during spontaneous imbibition in Berea sandstone, *Journal of Chemical Physics*, V. 119, n.18, p.9609-9616, 2003.

RADLINSKI, A.P., IOANNIDIS, M.A., HINDE, A.L., HAINBUCHNER, M., BARON, M., RAUCH, H. AND KLINE, S. R. Angstrom-to-millimeter characterization of sedimentary rock microstructure, *Journal of Colloid and Interface Science* n.274, p.607–612, 2004.

REDMAN, J.A., GRANT, S.B., OLSON, T.M. AND ESTES, M.K. Pathogen filtration heterogeneity, and the potable reuse of wastewater. *Environ. Sci. Technol.*, V.35, p.1798– 805, 2001.

REGE, S. D., FOGLER, H. S., A network model for deep bed filtration of solid particles and emulsion drops. *AIChE J.*, V.34(11), p.1761-1772, 1988.

REIMUS, P. W., The use of synthetic colloids in tracer transport experiments in saturated rock fractures, Rep. LA-13004-T, *Los Alamos Natl. Lab., Los Alamos, N. M.*, 1995.

RITTER, H. L, DRAKE, L. C., *Ind. Eng. Chem.* V.17, p.782, 1945.

ROSA, A.J., CARVALHO, S.C., XAVIER, J.A.D., Engenharia de reservatórios de petróleo, Rio de Janeiro, *Interciência: PETROBRAS*, 2006.

SAHIMI, M., GAVALAS, G. R., TSOTSIS, T. T., Statistical and continuum models of fluid-solid reactions in porous media. *Chemical Engineering Science*, V.45(6), p.443-1502, 1990.

SAHIMI, M., IMDAKM, A. O., Hydrodynamics of particulate motion in porous media. *Physical Review Letters*, V.66(9), p.1169-1172, 1991.

SAKTHIVADIVEL, R. Clogging of a granular porous medium by sediment; Rep HEL 15-5; *Hydraulic Engineering Laboratory: University of California, Berkeley*, 1969.

SALLUM, M.E., Validação do modelo clássico de filtração profunda, dissertação de mestrado em Engenharia de Reservatório e de Exploração de Petróleo, *Universidade Estadual do Norte Fluminense*, 2006

SANTOS, A, Statistical Model for Filtration in Porous Media. (Submetido para o *AIChE J.*, 2008).

SANTOS, A., BEDRIKOVETSKY, P. Size Exclusion During Particle Suspension Transport in Porous media: Stochastic and Averaged Equations. *Computational and Applied Mathematics*. V.23, p.259-284, 2004 (Erratum: V. 24, p. 491-495, 2005).

SANTOS, A.; BEDRIKOVETSKI, P., A stochastic model for particulate suspension flow in porous media. *Transport in Porous Media*, V. 62, p. 23-53, 2006.

SANTOS, A.; BEDRIKOVETSKI, P., FONTOURA, S.. Analytical micro model for size exclusion: Pore blocking and permeability reduction. *Journal of Membrane Science*, V. 308, p. 115-127, 2008.

SCHEIDEGGER, A. E., The Physics of Flow through Porous Media, 3 ed., *University of Toronto Press, Toronto, Canada*, 1974.

SCHIJVEN, J. K., and HASSANIZADEH, S. M., Removal of viruses by soil passage: Overview of modeling, processes, and parameters, *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.*, V.30, p.49– 127, 2000.

SHAPIRO A. A., BEDRIKOVETSKI, P., SANTOS, A. MEDVEDEV O.M., A stochastic model for filtration of particulate suspensions with incomplete pore plugging. *Transport in Porous Media*, V. 67, p. 135-164, 2007.

SHARMA, M.M., YORTSOS, Y.C., Transport of particulate suspensions in porous media: model formulation, *AIChE Journal* V.33, n.10, p.1636-1643, 1987a.

SHECAIRA, F. S., BRANCO, C.C.M, SOUZA, A. L., PINTO, A. C., HOLLEBEN, C. R. C, JOHANN, P. R. S., IOR: The Brazilian Perspective., *SPE 75170*, 2002.

SIQUEIRA, A.G. Modelagem em rede 3D do escoamento de fluidos particulados em meios porosos, *dissertação de mestrado na Universidade Estadual de Campinas no curso de Engenharia Mecânica*, 2000.

SURI, A. AND SHARMA, M., Strategies for Sizing Particles in Drilling and Completion Fluids, *SPE 68964*, 2001.

TUFENKJI, N., ELIMELECH,M. Deviation from the classical filtration theory in the presence of repulsive DLVO interactions, *Langmuir* n.20, p.10818-10828, 2004.

WAN, J., and WILSON , J. L., Visualization of the role of the gas-water interface on the fate and transport of colloids in porous media, *Water Resour. Res.*, V.30, p.11 – 23, 1994a.

YAO, K. M., M. T. HABIBIAN, and C. R. O'MELIA, Water and waste water filtration—Concepts and applications, *Environ. Sci. Technol.*,V.5, p.1105– 1112, 1971.

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)