

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**Modelagem em Rede 3D do Escoamento de  
Fluidos Particulados em Meios Porosos**

**Autor: Alexandre Guedes de Siqueira  
Orientador: Euclides José Bonet  
Co-orientador: Farid Salomão Shecaira**

97/00

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO**

# **Modelagem em Rede 3D do Escoamento de Fluidos Particulados em Meios Porosos**

Autor: **Alexandre Guedes de Siqueira**  
Orientador: **Euclides José Bonet**  
Co-orientador: **Farid Salomão Shecaira**

Curso: Ciências e Engenharia de Petróleo

Dissertação de Mestrado apresentada à Comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Ciências e Engenharia de Petróleo.

Campinas, 2000  
S.P. - Brasil

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

Si75m Siqueira, Alexandre Guedes de  
Modelagem em rede 3D do escoamento de fluidos particulados  
em meios porosos / Alexandre Guedes de Siqueira. --Campinas,  
SP: [s.n.], 2000.

Orientadores: Euclides José Bonet; Farid Salomão Shecaira.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas,  
Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Redes (Matemática). 2. Filtros e filtração. 3. Modelos  
matemáticos. 4. Modelos e construção de modelos. 5.  
Permeabilidade. 6. Partículas. I. Bonet, Euclides José.  
II. Shecaira, Farid Salomão. III. Universidade Estadual de  
Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. IV. Título.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

# **Modelagem em Rede 3D do Escoamento de Fluidos Particulados em Meios Porosos**

Autor: **Alexandre Guedes de Siqueira**  
Orientador: **Prof. Dr. Euclides José Bonet**  
Co-orientador: **Dr. Farid Salomão Shecaira**

Banca Examinadora:

---

**Prof. Dr. Euclides José Bonet, Presidente**  
**Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP**

---

**Prof. Dr. Antonio Luiz Serra de Souza**  
**Petróleo Brasileiro S. A. - PETROBRAS**

---

**Prof. Dr. Denis José Schiozer**  
**Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP**

Campinas, 14 de dezembro de 2000

## **Dedicatória**

Dedico este trabalho à minha companheira Neide, às minhas filhas, Marina e Laura, a meus pais, Alexandre e Lucinda, e a meus irmãos, Maria Lúcia e Ricardo.

## Agradecimentos

Como qualquer outro, este trabalho não foi feito somente pelo autor que o assina, embora seja deste a responsabilidade pelo resultado obtido. Correndo o risco de esquecer injustamente pessoas a quem devo significativas colaborações, expresso meu especial agradecimento

À Petrobras pelo suporte propiciado durante a execução deste trabalho.

A Euclides José Bonet e a Farid Salomão Shecaira pelo constante apoio, incentivo e orientação.

A Carlos Rogério Oliveira Rodrigues, da Petrobras/Cenpes, e a Celso Peres Fernandes, da UFSC/Lmpt, pelo processamento de imagens. A Paulo Vicente Alves Milanez, da Petrobras/Cenpes, pelos ensaios de fluxo em amostras do arenito Berea citados nesta dissertação. A José Roberto Pereira Rodrigues, da Petrobras/Cenpes, pelo *solver* usado para a solução dos sistemas de equações. A Régis Kruehl Romeu, também da Petrobras/Cenpes, e a Pavel Bredrikovetsky, da UENF/Lenep, pela generosidade de suas diversas dicas. A todos eles devo, ainda, a valiosa troca de informações e o auxílio na interpretação de resultados.

Aos colegas e funcionários da Unicamp e da Petrobras, que me ajudaram com sua capacidade, sua amizade e seu estímulo. Em particular, a Patrícia Martins Silva de Gasperi, da Petrobras/E&P-BC, pelo compartilhamento de informações referentes ao *VCLab*.

E à Neide, à Marina e à Laura por suportarem o longo período de disponibilidade pequena e humor inconstante.

A necessária dupla ilusão da teoria fechada é de que o mundo já está feito desde sempre e é possível apreendê-lo pelo pensamento. Mas a idéia central da revolução é que a humanidade tem diante de si um verdadeiro porvir, e que este porvir não é simplesmente para ser pensado, mas para ser feito.

*Cornelius Castoriadis,*

*in A instituição imaginária da sociedade*

## Resumo

SIQUEIRA, Alexandre Guedes de. *Modelagem em Rede 3-D do Escoamento de Fluidos Particulados em Meios Porosos*. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2000, 124p. Dissertação (Mestrado)

É proposto um procedimento para a modelagem do escoamento de fluidos particulados em meios porosos. A partir de técnicas de análise de imagens e da reconstrução estocástica virtual de meios porosos, ou a partir de curvas de pressão capilar, são obtidas algumas características morfológicas (distribuições de tamanhos de poros e gargantas) e topológicas (interconectividade da estrutura porosa) do meio. Constrói-se um modelo de rede cúbica regular de nós (poros) e ligações (gargantas) em que tais características são reproduzidas. A permeabilidade do modelo é determinada pela solução de um sistema de equações lineares de balanço de massa para os nós da rede, associadas a equações da condutividade hidráulica para suas ligações. Critérios estocásticos são aplicados para a simulação da movimentação das partículas e sua captura internamente à rede. Os mecanismos de captura considerados são a exclusão pelo tamanho, para partículas maiores que as aberturas das gargantas e a deposição de partículas menores pelo efeito do campo gravitacional e/ou de interações entre as partículas e as superfícies dos poros. As partículas capturadas alteram o campo de pressões na rede, que é sucessivamente atualizado. Dois parâmetros são usados para o ajuste das respostas do modelo a dados experimentais. A influência das variáveis presentes no modelo é avaliada. Destacam-se os efeitos da interconectividade dos poros e da forma de suas gargantas, que não haviam sido adequadamente considerados em outros modelos publicados. O modelo é aplicado a dois casos reais, sendo identificados pontos que podem ser aperfeiçoados e sugeridos alguns temas para futura investigação nesse sentido.

## **Abstract**

SIQUEIRA, Alexandre Guedes de. *A 3-D Network Model for Particulate Fluid Flow through Porous Media*. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2000, 124p. Dissertation (MSc)

A procedure to model the flow of a particulate fluid through a porous medium is proposed. By applying image analysis techniques and virtual stochastic reconstruction, or from capillary pressure curves, some morphologic (pore and throat size distributions) and topologic (porous structure interconnectivity) characteristics of the medium are obtained. A regular cubic network model of nodes (pores) and bonds (pore throats) is structured in such a way that the model reproduces these characteristics. The model permeability is determined by the solution of a system of linear mass balance equations for the nodes, along with equations of hydraulic conductivity for the bonds. Stochastic criteria are applied for the movement of particles and their capture inside the network. The particle capture mechanisms considered are the size exclusion of particles greater than the pore throat apertures and the deposition of smaller ones due to the gravitational field and/or interactions between the particles and the surfaces of the pores. The captured particles alter the flow in the network, hence the pressure field is sequentially updated. Two parameters are used to adjust the simulated results to the experimental data. An evaluation of the model's sensitivity to its variables is performed. The effects of both pore interconnectivity and pore throat shape, factors that had not been considered in previous models, are remarkable. Two real cases were simulated, and some model elements that can be improved were identified. Suggestions are made for future investigation in this area.

## Índice

Lista de Figuras .....	xi
Lista de Tabelas .....	xiv
Nomenclatura .....	xv
1. Introdução .....	1
2. Modelos para o Fluxo de Partículas em Meios Porosos .....	8
2.1 Modelos contínuos para o fluxo de partículas em meios porosos .....	8
2.2 Modelos estatísticos para o fluxo de partículas em meios porosos .....	11
2.3 A evolução dos modelos de rede para o fluxo de partículas .....	13
3. Caracterização Morfo-topológica do Meio Poroso .....	28
3.1 A caracterização morfo-topológica nos modelos anteriormente publicados .....	30
3.2 Caracterização morfo-topológica pela reconstrução estocástica virtual .....	32
3.3 Avaliação alternativa das características morfo-topológicas do meio poroso .....	41
4. O Modelo de Rede para o Escoamento de Fluidos Particulados no Meio Poroso .....	46
4.1 Pressupostos gerais .....	47
4.2 Construção do modelo de rede .....	47
4.3 Simulação do escoamento de fluidos particulados na rede .....	55

5. Sensibilidade do Modelo às Variáveis Envolvidas .....	72
5.1 A influência do tamanho da rede .....	74
5.2 A influência do número de coordenação médio (conectividade) da rede .....	79
5.3 A influência do parâmetro $\theta$ e das distribuições de tamanhos de partículas .....	81
5.4 A influência da razão de aspecto das ligações .....	87
5.5 Os efeitos da injeção a vazão ou pressão constante e da velocidade crítica, $v_{cr}$ .....	88
5.6 A influência da componente gravitacional .....	90
5.7 Os efeitos da morfologia de deposição e da superfície específica do meio poroso .....	91
6. Comparação de Resultados Experimentais com os Simulados .....	95
6.1 Injeção de água com partículas em amostra do arenito Berea .....	95
6.2 Injeção de emulsão em pacote de areia (Soo e Radke; 1984a, 1985) .....	100
7. Conclusões e Sugestões .....	107
Referências Bibliográficas .....	111
Apêndice: Dependência de $\theta$ com Relação à Velocidade de Fluxo .....	123

## Lista de Figuras

3.1	Representação de como seria o meio poroso modelado segundo a interpretação tradicional da porosimetria de mercúrio .....	31
3.2	Imagem adquirida por microscópio óptico, com aumento de 25 vezes, em lâmina delgada do arenito Berea .....	34
3.3	Imagem binarizada correspondente à figura 3.2 .....	34
3.4	Interface gráfica do programa <i>VCLab</i> : à esquerda, a mesma imagem binarizada da Figura 3.3; à direita, menor, uma das 256 seções transversais do meio reconstruído .	40
4.1	Fluxograma representando a geração dos elementos estruturais da rede	51
4.2	Esquema do modelo de rede de poros, representando os nós (poros) como sendo cubos e as ligações (gargantas) como prismas retangulares .....	52
4.3	Fluxograma representando a geração dos padrões morfológicos da rede	55
4.4	Fluxograma da simulação do escoamento de fluidos particulados na rede	73
5.1	Distribuições das dimensões características de poros ( $b_b$ ) e gargantas ( $b_t$ ) .....	73
5.2	Distribuições de diâmetros de partículas comparadas à de abertura das gargantas .....	74
5.3	Médias da queda de permeabilidade para vários tamanhos de rede (8 realizações) ....	75
5.4	Desvios padrão da queda de permeabilidade para vários tamanhos de rede (8 realizações) .....	76
5.5	Representação, em forma de malha, de uma seção da rede com $20 \times 20$ nós (b) gerada por superposição lateral de uma seção com $10 \times 10$ nós (a) .....	77
5.6	Queda de permeabilidade em uma rede com $10 \times 10 \times 30$ nós, comparada à de outra	

	com $20 \times 20 \times 30$ nós, gerada pela superposição lateral da primeira .....	78
5.7	Comparação entre o comportamento da permeabilidade em redes com número de coordenação médio $Z = 6$ e com $Z = 3$ , para partículas de $2 \mu\text{m}$ .....	80
5.8	Comparação entre o comportamento da permeabilidade em redes com número de coordenação médio $Z = 6$ , com $Z = 4$ e com $Z = 3$ , para partículas de $2,5 \mu\text{m}$ .....	80
5.9	Comparação entre o comportamento da permeabilidade em redes com número de coordenação médio $Z = 6$ e com $Z = 3$ , para partículas de $3 \mu\text{m}$ .....	81
5.10	Suspensão monodispersa: queda da permeabilidade devida à exclusão pelo tamanho (partículas de $2,5 \mu\text{m}$ , $\theta = 1$ ) e devida à deposição (partículas de $0,099 \mu\text{m}$ , $\theta = 50$ ) .....	82
5.11	Suspensão monodispersa: queda de permeabilidade correspondente a diversos valores de $\theta$ , para partículas com diâmetro de $1 \mu\text{m}$ .....	83
5.12	Suspensão monodispersa: queda de permeabilidade ocasionada por partículas com diâmetro $d_p = 1 \mu\text{m}$ , comparada à obtida com $d_p = 1,5 \mu\text{m}$ ( $\theta = 1$ e $\theta = 1,5$ ) .....	84
5.13	Efeito do desvio-padrão das distribuições de tamanhos de partículas sobre a queda de permeabilidade ( $\theta = 1$ e $\theta = 1,5$ ) .....	85
5.14	Efeito da média das distribuições de tamanhos de partículas sobre a queda de permeabilidade (para $\theta = 1$ e $\theta = 1,5$ ) .....	86
5.15	Suspensão monodispersa com $d_p = 1 \mu\text{m}$ : efeito da razão de aspecto das ligações, $\psi$ , sobre a queda de permeabilidade ( $\theta = 1$ e $\theta = 20$ ) .....	87
5.16	Suspensão polidispersa com distribuição de diâmetros de partículas A: efeito da razão de aspecto das ligações, $\psi$ , sobre a queda de permeabilidade ( $\theta = 1$ e $\theta = 20$ ) .....	88
5.17	Efeito da velocidade aparente de injeção $V_{ap}$ (vazão W constante) e da injeção a pressão constante sobre a queda da permeabilidade ( $\theta = 20$ ) .....	89
5.18	Efeito da velocidade crítica de captura, $v_{cr}$ , na injeção a vazão constante e na injeção a pressão constante, sobre a queda da permeabilidade ( $\theta_0 = 20$ ) .....	90
5.19	Efeito da componente gravitacional sobre a queda da permeabilidade ( $\theta = 20$ , direção macroscópica de fluxo horizontal) .....	91
5.20	Efeito da morfologia da deposição de gotículas de uma emulsão, comparada à de	

	partículas sólidas de mesmo diâmetro ( $d_p = 1,5 \mu\text{m}$ ), $\theta = 1,5$ .....	92
5.21	Efeito da morfologia da deposição de gotículas de uma emulsão comparada à de partículas sólidas com a mesma distribuição de diâmetros, para $\theta = 20$ .....	93
5.22	Efeito da morfologia da deposição de gotículas de uma emulsão, comparada à de partículas sólidas com a mesma distribuição de diâmetros, para dois valores da superfície específica do meio poroso (igual à da rede e 5 vezes a da rede), com $\theta = 1,5$ .....	94
6.1	Distribuição de diâmetros de partículas injetadas na amostra do arenito Berea .....	96
6.2	Distribuições das dimensões características das gargantas e dos poros obtidas a partir da reconstrução estocástica virtual de amostra do arenito Berea .....	97
6.3	Distribuições acumuladas das dimensões características das gargantas e dos poros obtidas a partir da reconstrução estocástica virtual de amostra do arenito Berea .....	97
6.4	Comparação das quedas de permeabilidade experimental e simulada para a amostra do arenito Berea .....	98
6.5	Distribuições (em volume e em número) dos diâmetros de gotas de óleo da Corrida 1 (Soo e Radke; 1984a, 1985) .....	101
6.6	Distribuições (em volume e em número) dos diâmetros de gotas de óleo da Corrida 2 (Soo e Radke; 1984a, 1985) .....	101
6.7	Distribuição em número das dimensões características do nós (poros) do pacote de areia (Soo e Radke; 1984a, 1985) .....	102
6.8	Distribuições em número, convencional e modificada, das dimensões características das ligações (gargantas) do pacote de areia (Soo e Radke; 1984a, 1985).....	103
6.9	Corrida 1 (Soo e Radke; 1984a, 1985): comparação das quedas de permeabilidade experimental e simulada com $\theta = 1,02$ e $v_{cr} = 1,4$ .....	104
6.10	Corrida 2 (Soo e Radke; 1984a, 1985): comparação das quedas de permeabilidade experimental e simulada com $\theta = 1,02$ e $v_{cr} = 1,4$ .....	104
6.11	Corrida 2 (Soo e Radke; 1984a, 1985): comparação das quedas de permeabilidade experimental e simulada com $\theta = 1,04$ e $v_{cr} = 1,5$ .....	106

## Lista de Tabelas

4.1	Comparação entre os números de coordenação do modelo atual e os dos anteriormente publicados .....	48
5.1	Dimensões características de poros e gargantas e diâmetros de partículas .....	73
5.2	Permeabilidade original em realizações da rede com diferentes números de nós .....	75

## Nomenclatura

<i>Letras Latinas</i>		<b>Dimensões</b>
$a, b$	coordenadas dos pontos, respectivamente nas direções do lado maior e menor da seção de uma ligação retangular	L
$A_1, A_2$	constantes	
$a_t$	metade do lado maior da seção retangular da ligação	L
$A_t$	área das gargantas	$L^2$
$B_1$	constante	
$b_b$	dimensão característica dos nós (metade do lado do cubo)	L
$b_t$	dimensão característica da ligação (metade do lado menor da seção retangular da ligação)	L
$b_{ta}$	dimensão característica equivalente da ligação antes da deposição	L
$b_{td}$	dimensão característica equivalente da ligação depois da deposição	L
$c$	concentração	
$c_o$	concentração da suspensão na entrada da ligação	
$C_{pp}(u)$	função covariograma	
$c_t$	comprimento das ligações	L
$F$	força de arraste sobre uma esfera em contato com um plano	$LMT^{-2}$
$f$	constante (O'Neil, 1968)	

$g$	aceleração da gravidade	$LT^{-2}$
$G$	componente gravitacional da taxa de transporte de partículas	$L^3T^{-1}$
$g_{ij}$	condutância hidráulica da ligação entre os nós $i$ e $j$	$L^4M^{-1}T$
$h$	altura das saliências dos dutos (rugosidade)	$L$
$(i, j, k)$	locações de uma matriz tridimensional	
$(i+r, j+s, k+t)$	vizinhança de $(i, j, k)$	
$I_R$	Índice de referência para abertura dos nós da rede	
$k, K$	permeabilidade	$L^{-2}$
$l$	comprimento entre os centros dos nós vizinhos	$L$
$N_x, N_y$ e $N_z$	número de nós da rede, respectivamente nas direções longitudinal e transversais ao fluxo	
$N_c$	número de classes de nós da rede	
$P$	pressão	$L^{-1}MT^{-2}$
$P(\mathbf{x})$	função fase	
$P_a$	pressão antes da deposição	$L^{-1}MT^{-2}$
$PC$	probabilidade de captura	
$p_{cb}$	limite de percolação em ligações	
$P_d$	pressão depois da deposição	$L^{-1}MT^{-2}$
$Q$	componente hidrodinâmica da taxa de transporte de partículas	$L^3T^{-1}$
$Q_a$	vazão antes da deposição	$L^3T^{-1}$
$R$	raio do duto	$L$
$R_i$	raio da boca da $i$ -ésima ligação da face de entrada	$L$
$r_p$	raio da partícula	$L$
$R_{pp}(\mathbf{u})$	Função de autocorrelação a dois pontos	
$t$	tempo	$T$
$u$	velocidade aparente de fluxo	$LT^{-1}$
$u_\infty$	velocidade-limite da partícula por ação gravitacional	$LT^{-1}$

$\mathbf{u}$	vetor deslocamento	
$\hat{u}$	norma do vetor $\mathbf{u}$	
$v$	velocidade média na ligação	$LT^{-1}$
$\dot{V}$	taxa de variação linearizada da velocidade do fluido na ligação	$T^{-1}$
$V_b$	Volume dos poros	$L^3$
$v_{cr}$	velocidade crítica (parâmetro de ajuste)	$LT^{-1}$
$V_{max}$	velocidade máxima na ligação	$LT^{-1}$
$VP$	volume poroso da rede	$L^3$
$v_R$	velocidade de livramento de partículas	$LT^{-1}$
$v_x$	componente da velocidade na direção média de fluxo na entrada da ligação	$LT^{-1}$
$v_x(a,b)$	velocidade longitudinal do fluido em cada ponto (a,b) da seção retangular do duto	$LT^{-1}$
$W$	vazão volumétrica da rede	$LT^{-1}$
$x$	distância	$L$
$\mathbf{x}$	vetor de posição	
$X$	força contraposta ao fluxo depois da deposição	$LM^{-1}T^{-2}$
$x(i,j,k)$	números gerados segundo uma distribuição Gaussiana, sem correlação espacial	
$X(x)$	conjunto dos números $x$	
$x, y, z$	direções de um sistema ortogonal de coordenadas	
$x_1, x_2$	coordenadas do ponto definido pelo vetor $\mathbf{x}$	
$Y(x)$	conjunto de números gerados segundo a distribuição Gaussiana, com correlação espacial	
$Z$	número de coordenação	
$Z(x)$	conjunto de números binários cujos $\phi$ e $R_{pp}$ correspondem à da média das imagens 2D do meio poroso real	

### ***Letras Gregas***

$\alpha$	coeficiente de combinação linear	
$\beta$	fator de dano	
$\Delta$	diferença	
$\theta$	parâmetro de captura	
$\theta_0$	parâmetro de ajuste	
$\lambda$	coeficiente de filtração	
$\mu$	viscosidade dinâmica	$L^{-1}MT^{-1}$
$\rho$	densidade	$L^{-3}M$
$\psi$	razão de aspecto das ligações ( $= a_t/b_t$ )	
$\sigma$	depósito específico de partículas	
$\phi$	porosidade	
$\varphi$	ângulo que o eixo da ligação faz com o plano horizontal	

### ***Subscritos***

$0$	valor original da variável
$1, 2$	referente às direções dos eixos de coordenadas no plano
$\infty$	valor limite
$a$	referente a antes da deposição da partícula
$b$	referente aos corpos de poros ( <i>pore body</i> )
$cb$	valor crítico para a percolação em ligações ( <i>bonds</i> )
$cr$	valor crítico
$d$	referente a depois da deposição da partícula
$i$	número de ordem da ligação na face de entrada da rede
$max$	valor máximo

<i>medido</i>	valor medido
<i>min</i>	valor mínimo
<i>o</i>	referente à entrada da ligação
<i>p</i>	referente a partículas
<i>pp</i>	referente a dois pontos
<i>ret-<math>\theta_r</math></i>	limites de integração da variável quando se desconta uma camada de espessura $\theta_r$ de cada meio lado da seção transversal
<i>ret-<math>r_p</math></i>	limites de integração da variável, quando se desconta uma camada de espessura $r_p$ de cada meio lado da seção transversal
<i>t</i>	referente às gargantas de poros
<i>ta</i>	referente à garganta do poro antes da deposição da partícula
<i>td</i>	referente à garganta do poro depois da deposição da partícula
<i>x</i>	referente à direção longitudinal média de fluxo
<i>y, z</i>	referente a cada uma das direções transversais ao fluxo

### ***Siglas***

2D	Bidimensional
3D	Tridimensional
<i>CPU</i>	<i>Unidade de Processamento Central</i>
<i>DFT</i>	<i>Discrete Fourier Transform</i>
<i>EMA</i>	<i>Effective Medium Approximation</i>
<i>JQA</i>	Joshi, Quiblier e Adler
<i>RAM</i>	<i>Random Access Memory</i>
<i>REV</i>	Volume Elementar Representativo
<i>UBE</i>	<i>Unit Bed Elements</i>
<i>VCLab</i>	<i>Virtual Core Lab</i>

# Capítulo 1

## Introdução

O estudo do transporte de suspensões através de meios porosos é relevante para uma ampla gama de processos naturais e industriais, caracterizados por uma contínua alteração da estrutura física dos poros. Entre os exemplos concernentes à indústria do petróleo citam-se: processos de injeção de água em reservatórios de petróleo (para deslocá-lo em direção aos poços produtores, para fornecer energia aos reservatórios e/ou para descartar água produzida); filtração da água destinada à injeção; migração de finos (carreamento, pelo fluxo, de partículas finas soltas nos poros da rocha); controle de invasão de fluidos de perfuração e completação em formações portadoras de óleo e/ou gás; uso de agentes seletivos para uniformização da acidificação de formações que apresentam canalizações de fluxo; escoamento de emulsões estáveis diluídas; contaminação de água subterrânea.

Cresce a importância da injeção de água em campos de petróleo no mundo inteiro, à medida em que estes vão se tornando maduros: por um lado, cada vez maiores volumes de água para injeção são solicitados; por outro, aumenta a fração de água produzida, trazendo problemas ligados ao seu descarte. Uma estimativa publicada há duas décadas (Lacey e Wells, 1979) avaliava como sendo da ordem de bilhões de barris por ano o volume de óleo que deixa de ser produzido em todo o mundo devido a danos de formação. Naturalmente, melhorando o grau de pré-filtração da água a ser injetada (o que implica maiores custos), cai a probabilidade de serem causados altos níveis de danos irreversíveis às formações pelo entranhamento profundo de

partículas no espaço poroso, além de diminuir a necessidade de intervenções em poços para a remoção de danos reversíveis.

O projeto de qualquer sistema de injeção de água deve confrontar, por um lado, o custo da melhoria da qualidade da água e, por outro, a diminuição dos níveis de dano às formações correspondentes a essa melhoria e, conseqüentemente, das perdas econômicas a eles associadas. Porém, se a estimativa de custos de captação e tratamento da água é um problema relativamente simples, não se pode dizer o mesmo da modelagem do comportamento da permeabilidade da formação em função da qualidade da água a ser injetada. Vários fatores inter-relacionados precisam ser levados em consideração, tais como a velocidade e a geometria de fluxo, a natureza e distribuição de tamanhos das partículas e dos poros, a concentração das partículas e as características químicas e físicas da solução em que elas se encontram dispersas (Kumar, 1988).

A interação das partículas com a superfície sólida dos poros, que leva à adsorção física e/ou à deposição de partículas na superfície, bem como ao tamponamento das gargantas de poros por partículas maiores isoladas, ou por superposição de partículas menores, é avaliada em laboratório injetando-se a água de captação, submetida a diversos graus de filtração, em amostras de testemunhos. Além de laboriosos, tais ensaios são destrutivos e, conseqüentemente, restringem o número de alternativas que podem ser testadas. Daí a conveniência do uso de modelos teóricos para simular esses processos e estimar seus efeitos previamente aos testes físicos, possibilitando a previsão da evolução da permeabilidade da formação em torno de poços injetores de água.

Embora a análise do transporte de suspensões em meios porosos tenha uma longa história ligada ao escoamento em reservatórios de petróleo, é somente a partir dos anos 80 que surgem trabalhos teóricos levando em conta mudanças estruturais no meio e reconhecendo a importância desempenhada tanto pela morfologia do sistema poroso (os tamanhos e formas dos poros), quanto por sua topologia (relações de conectividade dos poros entre si). Há uma grande variedade de aspectos enfatizados e de técnicas aplicadas nesses estudos. No entanto, direta ou indiretamente, a questão central que os motiva é: de que maneira os processos físicos e a estrutura do meio poroso em escala microscópica influenciam seus parâmetros de transporte macroscópicos (que são os relevantes, do ponto de vista da engenharia)?

Sahimi *et al.* (1990) classificam em duas categorias as abordagens sobre o transporte de partículas em suspensão através de meios porosos: a dos modelos contínuos e a dos modelos estatísticos.

Os modelos contínuos podem ser subdivididos de acordo com sua escala de observação e descrição dos fenômenos estudados. Os modelos de análise de trajetórias computam os percursos e a captura de partículas no interior de um poro (delimitado por um coletor de partículas unitário com forma geométrica simplificada) em função das forças atuantes na escala do poro. Já os modelos fenomenológicos baseiam-se em equações de conservação a nível macroscópico e em leis empíricas para as grandezas que descrevem os fenômenos estudados macroscopicamente, tais como a taxa de retenção de partículas e o coeficiente de filtração.

Os modelos estatísticos compreendem os modelos estocásticos e os modelos de rede. Nos modelos estocásticos, os fenômenos são descritos por uma família de variáveis aleatórias e sua evolução é governada por leis de probabilidade.

Os modelos contínuos e os estocásticos não permitem estimar consistentemente a permeabilidade do meio e seu comportamento durante a injeção de água com sólidos em suspensão. Isso se deve à sua incapacidade de levar em conta a conectividade do espaço poroso, à qual a evolução do comportamento da permeabilidade do meio é muito sensível, dado que o transporte de partículas é, essencialmente, um fenômeno de percolação (Imdakh e Sahimi, 1987). Num processo de percolação típico, a conectividade do sistema é reduzida como resultado de um progressivo bloqueio de poros, podendo chegar ao ponto em que o limite de percolação é atingido e todas as suas propriedades macroscópicas de transporte são anuladas (Stauffer e Aharony, 1992; Sahimi, 1995). O limite de percolação é a proporção de poros ainda abertos na qual o sistema perde sua conectividade macroscópica. Os conceitos da teoria da percolação são aplicáveis aos processos de transporte de partículas, embora atentando para o fato de que, nestes, o bloqueio de poros é determinado pelo fluxo das partículas e sua interação com os elementos constituintes da estrutura porosa, enquanto os problemas tradicionais de percolação escolhem aleatoriamente os poros e/ou as ligações a serem seqüencialmente bloqueados.

Nos modelos de rede, as heterogeneidades do meio na escala de poros são incorporadas à determinação de propriedades macroscópicas do sistema. O meio poroso é figurado conceitualmente como uma teia bi ou tridimensional, composta de nós (representando os corpos dos poros) interconectados por ligações (simbolizando as “gargantas” entre poros), correspondendo a cada um desses elementos uma determinada resistência ao fluxo. Impondo-se à rede uma vazão (ou uma diferença de pressão), obtém-se, pelo balanço de massa em cada nó, um sistema de equações cuja solução numérica para as pressões (ou para as velocidades) permite o cálculo da permeabilidade absoluta do modelo. Nesse processo, melhores resultados são obtidos quanto mais adequadamente forem representados pela rede os atributos mais relevantes da estrutura porosa: sua morfologia, topologia e propriedades de percolação (Dullien, 1992; Ioannidis *et al.*, 1997). A principal limitação que os modelos de rede apresentam é a demanda computacional requerida para poderem lidar realisticamente com sistemas complexos.

Os modelos de rede diferenciam-se entre si pela maior ou menor fidelidade com que exprimem a geometria e as distribuições de tamanhos de poros e gargantas do meio real, bem como sua conectividade. Habitualmente, a caracterização quantitativa do espaço poroso de rochas-reservatório, em escala microscópica, é feita por intermédio de ensaios de porosimetria de mercúrio, nos quais determina-se, para cada diâmetro das gargantas que dão acesso aos poros, o volume dos poros acessados. Os métodos tradicionais de interpretação dos resultados desses experimentos modelam o meio poroso como um feixe de capilares tortuosos de seção circular, o que impede a dedução da distribuição dos tamanhos dos corpos dos poros e da conectividade intrínseca do meio. Apesar de existirem vários trabalhos publicados propondo alternativas a esse método de interpretação da porosimetria de mercúrio, alguns dos quais alterando inclusive os procedimentos experimentais usuais, nenhuma dessas abordagens mostrou-se capaz de suplantiar inequivocamente as limitações apontadas. Recentemente, têm sido publicados alguns trabalhos interessantes, relatando a obtenção das características morfo-topológicas tridimensionais de meios porosos a partir de propriedades espaciais obtidas em superfícies polidas desses meios (lâminas delgadas). Com o auxílio de microscópios eletrônicos de varredura ou ópticos, tais superfícies são percorridas e sua geometria porosa é registrada em imagens digitalizadas, sobre as quais são aplicadas técnicas de processamento de imagens capazes de gerar estruturas porosas

tridimensionais virtuais com propriedades estatísticas determinadas, idênticas às observadas no meio real. Esse procedimento recebe a denominação de reconstrução estocástica virtual de meios porosos. As informações geométricas e topológicas obtidas com a reconstrução de meios porosos têm sido usadas como base para modelos de rede capazes de produzir boas estimativas das propriedades petrofísicas macroscópicas de amostras de rocha-reservatório, entre as quais a permeabilidade absoluta, o índice de resistividade, o fator de formação e curvas de pressão capilar (Ioannidis e Chatzis, 1993; Ioannidis *et al.*, 1997).

Por sua vez, a modelagem da geração, movimentação, captura e livramento de partículas no interior de redes de poros também tem sido objeto de diferentes propostas. A movimentação é definida em função do critério de escolha da garganta por onde a partícula deixará cada poro, podendo ser puramente aleatória ou agregar um viés ditado pela vazão do fluido ou pela taxa de transporte de partículas em cada garganta. Os modelos de captura e livramento vão desde a simples consideração da retenção de uma partícula maior que o tamanho da garganta (*size exclusion*) até o equilíbrio de forças e torques atuantes em cada uma das partículas geradas, computando sua interação com o fluido, as paredes do espaço poroso e as outras partículas, já capturadas ou não.

Este trabalho propõe-se à elaboração de um simulador de transporte de partículas em meios porosos, utilizando modelos de rede que incorporam as características morfo-topológicas do espaço poroso. São avaliados os resultados das simulações quando tais características são determinadas com a utilização da análise de imagens e da reconstrução estocástica virtual de meios porosos. Alternativamente, essa avaliação é feita a partir das distribuições de tamanhos de gargantas obtidos por porosimetria de mercúrio, conjugadas a conectividades e a distribuições de tamanhos de poros estimadas com base em observações petrográficas de meios porosos naturais, bem como de análises de seccionamento serial e mesmo de resultados de reconstruções estocásticas virtuais de meios porosos. A geração, a movimentação e a captura de partículas são agregadas ao modelo por meio de critérios suficientemente representativos dos processos observados em sistemas reais. Os critérios de geração e movimentação das partículas têm por base um procedimento estocástico, sendo a taxa de fluxo de partículas utilizada como viés para a escolha das ligações por onde cada partícula irá prosseguir seu caminho dentro da rede. A captura

de partículas é testada segundo a natureza do evento modelado. Quando a abertura da ligação, à qual o critério de movimentação conduziu a partícula, é menor que esta, dá-se o aprisionamento devido à exclusão pelo tamanho. Nesse caso, a condutância hidráulica da ligação é reduzida (em caso de obstrução parcial da entrada da ligação) ou anulada (caso a obstrução seja total). Quando a partícula é menor que a abertura da ligação, existe uma probabilidade de captura por deposição nas paredes internas da ligação, calculada segundo critérios provenientes da análise de trajetórias de partículas. Naturalmente, a essa deposição também corresponde uma redução da condutância hidráulica da ligação.

O simulador proposto conjuga, portanto, o aumento da representatividade do modelo de rede utilizado e a adoção de critérios adequados e eficientes para modelar a geração, a movimentação e a captura de partículas. Para avaliar sua capacidade de previsão do comportamento da permeabilidade durante o transporte de partículas através de meios porosos, seus resultados são comparados com dados experimentais disponíveis.

No Capítulo 2, é feita uma revisão sobre os modelos contínuos e estatísticos propostos na literatura para a representação do fluxo de partículas em meios porosos.

No Capítulo 3, é brevemente discutida a caracterização morfo-topológica de meios porosos, sendo abordados os conceitos teóricos e procedimentos práticos da reconstrução estocástica virtual de meios porosos. Apresenta-se, também, uma sistemática alternativa para obter essa caracterização com base em resultados de ensaios de porosimetria de mercúrio e em estimativas empíricas provenientes de observações petrográficas de meios porosos naturais e de análises de seccionamento serial de moldes de poros.

No Capítulo 4, é descrito o simulador proposto para o fluxo de partículas em meios porosos, incluindo a construção do modelo de rede, a geração, movimentação e captura de partículas, e os efeitos decorrentes sobre o campo de fluxo no sistema.

O Capítulo 5 consiste na avaliação da sensibilidade das respostas do simulador aos valores de variáveis envolvidas na modelagem, tais como: o tamanho da rede; o seu número de

coordenação médio; as diferentes distribuições de tamanhos de partículas, relativamente à distribuição de tamanhos de gargantas de poros; os dois parâmetros de ajuste utilizados; as condições de contorno adotadas para o escoamento (vazão ou pressão constante); a densidade das partículas em relação à do fluido suporte e o sentido de fluxo (por cuja combinação expressam-se os efeitos gravitacionais); a concentração de partículas nas suspensões injetadas; o tipo de partícula (sólida ou líquida) e as diferentes morfologias de deposição características de cada um desses tipos; no caso de partículas líquidas, a superfície específica do meio poroso.

O Capítulo 6 apresenta os resultados de simulações e sua comparação com dois conjuntos de dados experimentais disponíveis, sendo o primeiro proveniente de resultados ainda não publicados de ensaios laboratoriais em uma amostra de arenito Berea, e o outro do trabalho de Soo e Radke (1984a, 1985), consistindo no escoamento de uma emulsão de óleo em água através de um pacote de areia.

Por fim, no Capítulo 7, são apresentadas as conclusões deste trabalho e sugestões para futuras investigações a respeito de temas a ele ligados.

## **Capítulo 2**

### **Modelos para o Fluxo de Partículas em Meios Porosos**

Este capítulo dedica-se a uma revisão dos modelos teóricos propostos para a simulação do fluxo e deposição de partículas no interior de meios porosos. O capítulo principia com uma breve exposição geral sobre tais modelos que, seguindo a classificação proposta por Sahimi *et al.* (1990), serão agrupados em duas grandes categorias: a dos modelos contínuos e a dos modelos estatísticos. Posteriormente, realiza-se uma descrição mais detalhada dos modelos estatísticos de rede já publicados, explicitando seus méritos e suas deficiências.

#### **2.1 – Modelos contínuos para o fluxo de partículas em meios porosos**

A classificação dos modelos contínuos compreende duas subdivisões, segundo sua escala de observação e descrição dos fenômenos estudados. Numa escala macroscópica, encontram-se os modelos fenomenológicos e, em escala microscópica, os modelos de análise de trajetórias.

##### **2.1.1 – Modelos fenomenológicos**

Nos modelos fenomenológicos, os processos de filtração em leito profundo são observados a partir de uma escala espacial muito maior que a das dimensões de poros individuais. O meio poroso é tratado como um sistema fechado, no interior do qual as partículas da suspensão se depositam. As concentrações de partículas depositadas e em suspensão são consideradas funções suaves e contínuas, no tempo e no espaço. Os volumes investigados devem ser suficientemente

grandes para que se obtenham coeficientes efetivos de transporte estatisticamente estáveis e representativos da média das propriedades microscópicas correspondentes, e pequenos a ponto de permitir a consideração dos efeitos de heterogeneidades na escala supra-poro.

Os detalhes morfo-topológicos dos poros são ignorados, sendo incorporados ao modelo apenas em função de seus reflexos sobre as grandezas que descrevem os fenômenos estudados macroscopicamente, tais como o depósito específico,  $\sigma$  (volume de partículas depositadas por volume unitário do meio filtrante), e o coeficiente de filtração,  $\lambda$ .

Os modelos fenomenológicos baseiam-se na conservação de massa em nível macroscópico. Sendo  $t$  o tempo,  $u$  a velocidade aparente de fluxo,  $x$  a distância e  $c$  a concentração volumétrica das partículas em suspensão, essa conservação de massa é expressa sob a forma:

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} = 0 \quad (2.1).$$

Para resolver essa equação, é necessário definir uma relação entre a taxa de retenção das partículas, a concentração e o coeficiente de filtração. Para tanto, várias expressões foram propostas na literatura (ver revisões feitas por Tien e Payatakes, 1979 e por Herzig *et al.*, 1970), entre as quais a de Iwasaki (1937):

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} = u \lambda c \quad (2.2).$$

O coeficiente de filtração,  $\lambda$ , depende de muitos parâmetros do sistema, tais como a densidade das partículas e a velocidade do fluido, e é uma função do estado do sistema, variando com o tempo na medida em que o sistema se altera devido às partículas que vão sendo capturadas. Diversos modelos foram propostos para a taxa de retenção das partículas, vários deles dependentes de parâmetros empíricos cuja estimativa é, freqüentemente, impossível e cujo significado físico nem sempre é bem estabelecido (Sahimi *et al.*, 1990).

Para estimar a queda de pressão ao longo do meio poroso (e, a partir desta, sua permeabilidade), freqüentemente os modelos fenomenológicos aplicam a equação empírica de

Kozeny-Carman. Essa equação trata o meio poroso como um feixe de capilares tortuosos paralelos, representação que é totalmente inadequada para descrever a redução de permeabilidade com a deposição de partículas no espaço poroso, um processo que depende fortemente da conectividade do sistema. Além do mais, isso faz com que a precisão da estimativa piore à medida em que cresce o número de partículas depositadas.

Outras propostas relacionam a distribuição da permeabilidade ao longo da amostra, em cada instante  $t$ , ao depósito específico de partículas no meio poroso,  $\sigma$ , como na expressão

$$\frac{k(x,t)}{k_0} = \frac{1}{1 + \beta\sigma(x,t)} \quad (2.3),$$

onde  $\beta$  é uma constante que recebe a denominação de fator de dano (Pang e Sharma, 1994). Integrando-se  $k(x,t)$  entre a face de injeção e a frente de injeção, para um dado instante, obtém-se a permeabilidade média nessa região.

Apesar das limitações citadas, tais modelos podem, muitas vezes, proporcionar resultados úteis, principalmente quando se dispõe suficientemente de testemunhos e recursos experimentais para a determinação dos parâmetros empíricos utilizados (Ison e Ives, 1969; Herzig *et al.*, 1970; Gruesbeck e Collins, 1982; Soo e Radke, 1986; Soo *et al.*, 1986; Wennberg e Sharma, 1997). Uma alternativa promissora é obter tais parâmetros por intermédio de modelos de rede e usar a modelagem fenomenológica para a transferência de escala entre dados de laboratório e a injeção na escala de poços e para a mudança da geometria linear para a geometria radial de injeção.

### 2.1.2 – Modelos de análise de trajetórias

Os modelos de análise de trajetórias estudam o fluxo de partículas em meios porosos computando os percursos de partículas no interior de coletores microscópicos (geralmente esféricos, cilíndricos ou em forma de tubos com restrições, embora, a princípio, possam ser de qualquer formato). A partir da especificação do campo de fluxo em torno de um coletor, pode-se escrever equações do movimento, incluindo o balanço de todas as principais forças e momentos que agem sobre as partículas (forças e torques hidrodinâmicos, interação partícula-coletor, dupla camada iônica, forças de London – van der Waals, força gravitacional). Normalmente, a solução

dessas equações é obtida numericamente, pois a natureza complexa das várias forças atuantes impede a obtenção de soluções analíticas. A interceptação de partículas é incluída como uma condição de contorno, considerando-se que uma partícula se deposita caso seu percurso adentre uma região contida entre a superfície do coletor e uma trajetória limite.

Tipicamente, esses modelos assumem que as partículas são suficientemente pequenas para não serem aprisionadas em gargantas de poro, bloqueando-as, ou seja, assumem que não haja exclusão pelo tamanho (*straining*, ou *size exclusion*).

Entre esses modelos, há os que representam o meio poroso por intermédio de apenas um coletor individual de partículas (Yao *et al.*, 1971; Payatakes *et al.*, 1974; Mackie *et al.*, 1987), e aqueles que o fazem por uma série de elementos de leitos unitários (*Unit Bed Elements*, *UBE*) constituídos por coletores (Payatakes *et al.*, 1973; Tien e Payatakes, 1979; Chauveteau *et al.*, 1998). Os modelos *UBE* tentam levar em conta a variabilidade dos tamanhos de poros e a natureza convergente-divergente dos formatos destes. A interconectividade do meio também é considerada, embora limitadamente, já que o fluxo é restrito a células unitárias paralelas à direção macroscópica de fluxo. Assim, tais modelos não têm como incorporar componentes tão importantes como as linhas de corrente e as deposições de partículas em canais não alinhados com a direção de fluxo macroscópica (Burganos *et al.*, 1992).

Devidamente ajustados, os modelos de análises de trajetórias permitem estimar a eficiência de filtração (capacidade do meio filtrante capturar partículas), mas não se prestam a uma previsão confiável do comportamento da permeabilidade, pois, assim como os modelos fenomenológicos, calculam a queda de pressão ao longo do meio utilizando a equação empírica de Kozeny-Carman.

## **2.2 – Modelos estatísticos para o fluxo de partículas em meios porosos**

### **2.2.1 – Modelos estocásticos**

Nos modelos estocásticos, desenvolvidos por Hsu e Fan (1984) e por Fan *et al.* (1985), o fluxo de partículas em meios porosos é descrito probabilisticamente, sendo o bloqueio de um

poro aberto traduzido por um evento de “nascimento”, enquanto a desobstrução de um poro antes tamponado é computada como um evento de “morte” (que, obviamente, só pode ocorrer após o poro ter sido bloqueado, ou seja, após seu correspondente “nascimento”). São usados dois parâmetros empíricos, ajustáveis a partir de dados experimentais, sendo o primeiro relacionado à probabilidade de ocorrência de um evento de nascimento e o segundo associado à probabilidade de morte numa unidade de volume do meio poroso. Resolvendo uma equação diferencial estocástica, determina-se a probabilidade de que, em um dado momento, um determinado número de poros esteja obstruído, relacionando tal número à queda de pressão ao longo do leito filtrante e, assim, à diminuição da permeabilidade. Esta é calculada pela equação de Kozeny-Carman, o que faz recaírem sobre este método, no tocante às previsões de queda de permeabilidade, as mesmas ressalvas feitas aos dois tipos de modelos contínuos.

Embora matematicamente simples, os modelos estocásticos não levam em consideração os efeitos da morfologia do espaço poroso, nem os da distribuição de tamanhos de partículas, e também não prevêem os perfis de concentração de partículas nos efluentes.

### 2.2.2 – Modelos de rede

Os modelos de rede, introduzidos pioneiramente por Fatt (1956 a, b, c), representam simbolicamente o meio poroso por intermédio de linhas (ligações) e/ou pontos (nós), dispostos espacialmente de maneira a formarem malhas bi ou tridimensionais, regulares ou não. Essa idealização tem como base a observação dos espaços porosos de meios naturais, que consistem num arranjo de canais convergentes-divergentes, nos quais as porções mais amplas dos poros (seus “corpos”, representados pelos nós da rede) são conectados através de constrições (as “gargantas” dos poros, representadas na rede pelas ligações). Determinando os valores de resistência ao fluxo de cada um dos nós e ligações da estrutura e impondo a esta uma vazão (ou uma diferença de pressão), obtém-se, pelo balanço de massa em cada nó, um sistema de equações cuja solução numérica para as pressões (ou para as velocidades) permite o cálculo da permeabilidade do modelo. A permeabilidade da rede e a do meio real são tanto mais próximas ou mais distantes uma da outra, quanto forem respeitados pelo modelo, em maior ou menor grau,

os atributos mais importantes da estrutura porosa real: sua morfologia, topologia e propriedades de percolação (Dullien, 1992; Ioannidis *et al.*, 1997).

Além de serem capazes de incorporar as heterogeneidades do meio, na escala de poros, à determinação das propriedades macroscópicas do sistema, os modelos de rede são os únicos que levam em conta sua conectividade, o que lhes possibilita prever com maior acerto a permeabilidade e seu comportamento durante o transporte de partículas através do espaço poroso (Sahimi *et al.*, 1990). Além disso, os demais modelos concentram-se nos processos ocorridos em cada sistema meio poroso/partículas específico. Já os modelos de rede, uma vez estabelecidos parâmetros e critérios adequados para a construção da rede, a geração, a movimentação e a captura de partículas, bem como seus efeitos sobre o campo de fluxo, apresentam a considerável vantagem de se prestarem, potencialmente, à previsão do comportamento da permeabilidade em sistemas nos quais seja mantida a natureza químico-mineralógica de seus componentes, mas sejam alteradas características morfo-topológicas do espaço poroso, a distribuição de tamanhos das partículas e/ou determinadas características do fluxo, tais como sua direção e sentido (horizontal ou vertical, para cima ou para baixo) e suas condições de injeção (sob pressão ou vazão constante, bem como os próprios valores da pressão ou da vazão aplicada). A principal restrição à sua aplicação é a grande demanda computacional requerida, o que limita o tamanho da rede que pode ser processada. Essa demanda é inerente a modelagens que buscam incorporar suficientemente as características essenciais dos fenômenos em estudo, de modo a tornar exeqüível a determinação confiável das propriedades macroscópicas.

## **2.3 – A evolução dos modelos de rede para o fluxo de partículas**

### **2.3.1 – O modelo de Donaldson *et al.* (1977)**

Nesse que foi o primeiro modelo de rede a ser publicado sobre o transporte de partículas em meios porosos, os autores descreveram o meio como um feixe de tubos capilares paralelos, cuja distribuição de diâmetros corresponde à do meio real. Os efeitos da conectividade são negligenciados, o que torna esse modelo útil apenas como uma ferramenta conceitual.

### 2.3.2 – O modelo de Todd *et al.* (1984)

Os autores usaram uma rede bidimensional quadrada para estudar o dano à formação em reservatórios de petróleo. A movimentação das partículas no interior da rede era ditada por um procedimento denominado caminhada aleatória (*random walk*): ao passar por um nó da rede, uma partícula teria a mesma probabilidade de entrar em qualquer ligação que partisse desse nó, independentemente da direção desta e do campo de fluxo. Tais características fazem com que a caminhada aleatória seja válida para a descrição de processos puramente difusivos, o que a torna inadequada para modelar o fluxo de partículas não-Brownianas (Sahimi *et al.*, 1990). Outro problema do modelo original de Todd *et al.* é que não se previa a presença simultânea de várias partículas no interior da rede: apenas uma partícula era introduzida na rede de cada vez e seu trajeto acompanhado até sua captura ou sua saída da rede, o que é uma suposição irrealista, especialmente no caso de suspensões com altas concentrações de partículas, nas quais necessariamente várias delas entram simultaneamente no meio poroso.

A desconsideração do efeito do campo de fluxo na movimentação das partículas torna compreensível, pelo menos em parte, o fato de as previsões desse modelo não terem concordado quantitativamente com os dados experimentais, o que os autores atribuíram à inadequação dos dois critérios para a captura de partículas avaliados nas suas simulações: captura randômica e regra geométrica  $1/3 - 1/7$  (Abrams, 1977). Desenvolvimentos posteriores (Kumar, 1988), em redes 3D com comprimentos iguais aos das amostras de laboratório, incluíram critérios de captura hidrodinâmicos (sedimentação, inércia) e hidrodinâmico-probabilísticos. No entanto, não foram relatadas comparações dos resultados obtidos com dados experimentais.

### 2.3.3 – O modelo de Sharma e Yortsos (1987 a, b, c)

Este é um modelo híbrido, combinando equações de balanço macroscópico da população de partículas (uma abordagem contínua) com a representação do campo de fluxo no interior de uma rede de poros interconectados (uma modelagem discreta). Além de descrever a cinética de deposição, o modelo busca prever os perfis de concentração do efluente, o comportamento da permeabilidade e o coeficiente de filtração.

Embora melhor que os anteriores, esse modelo ainda sofre de limitações importantes. A taxa de deposição é calculada com o emprego de uma expressão para a transferência de massa de partículas Brownianas, que é inaplicável para partículas maiores que 2  $\mu\text{m}$ . O comportamento temporal da permeabilidade da rede foi calculado usando a Aproximação do Meio Efetivo (*Effective Medium Approximation* ou *Effective Medium Analysis*, EMA), cuja idéia central é buscar substituir um meio heterogêneo por um meio homogêneo equivalente. Assim, o meio poroso não é modelado através de uma rede onde a distribuição de tamanhos das gargantas do meio real seja reproduzida, adotando-se, em vez disso, uma mesma condutância hidráulica para todas as ligações. A EMA também assume que a velocidade do fluxo é a mesma para todas as gargantas de um determinado tamanho, independentemente de sua posição na rede. Tais hipóteses podem levar a distorções significativas nos resultados, principalmente quando o meio real tem uma ampla gama de tamanhos de gargantas de poros. Além disso, à medida em que mais poros do modelo são obstruídos, o cálculo da permeabilidade através da EMA torna-se progressivamente menos confiável. Em sistemas 3D, onde a EMA não funciona muito bem, principalmente quando a distribuição das condutâncias hidráulicas dos elementos da rede é altamente dispersa, esses problemas são ainda mais acentuados (Sahimi *et al.*, 1990; Adler e Berkowitz, 2000). Foram abrangidos dois tipos de captura de partículas: exclusão pelo tamanho (partícula maior que a garganta do poro) e deposição em camadas uniformes no interior das ligações. Desconsiderou-se, portanto, a deposição dendrítica, na qual há um empilhamento de partículas depositadas uma sobre outras, formando pontes ramificadas que atravessam os canais e podem chegar a obstruí-los totalmente. O modelo também assume que a fração de partículas excluídas pelo tamanho é a mesma ao longo de todo o comprimento do meio poroso, o que não tem nenhuma sustentação empírica.

A concordância entre as predições do modelo e dados experimentais é apenas razoável, piorando muito nos casos em que a permeabilidade decresce fortemente em relação à originalmente verificada.

#### **2.3.4 – O modelo de Khatib e Vitthal (1989)**

Este também é um modelo híbrido, no qual a EMA (ver Seção 2.3.3) é usada em conjunto com critérios de comparação entre o diâmetro médio das partículas e o dos poros, de modo a estimar a fração de poros bloqueados. Expressões oriundas da Teoria da Percolação são usadas para avaliar as quedas de permeabilidade correspondentes.

As mesmas deficiências apontadas com relação ao uso da EMA no modelo de Sharma e Yortsos são compartilhadas pelo modelo de Khatib e Vitthal. Neste modelo, além disso, os autores usaram o número de coordenação (uniforme) da rede como parâmetro de ajuste entre a permeabilidade calculada pela EMA e a permeabilidade original do meio poroso, o que os levou a encontrar números de coordenação irrealistas ( $Z=25$ ), além de estimativas da queda de permeabilidade ainda menos consistentes que as obtidas com o modelo de feixe de tubos capilares paralelos.

#### **2.3.5 – O modelo de Rege e Fogler (1987, 1988; Rege, 1988)**

Os autores usaram uma rede bidimensional com arranjo espacial regular triangular (cujo número de coordenação é 6) para estudar a filtração em leito profundo de partículas sólidas e de gotas de emulsões. O meio filtrante foi representado por ligações cilíndricas, nas quais está contido todo o volume poroso do modelo, enquanto os nós foram considerados apenas locais de encontro de ligações, aos quais não se conferiu nenhum volume e nenhuma resistência ao fluxo.

O diâmetro das ligações foi atribuído estocasticamente, de modo a reproduzir a distribuição de tamanhos de gargantas de poros, obtida por injeção de mercúrio, sendo seu desvio padrão (mas não sua média) corrigido segundo a proposta apresentada por Fatt (1956a). No artigo de 1987, os autores usaram esse mesmo procedimento estocástico para atribuir um comprimento para cada ligação, enquanto no trabalho de 1988 foi considerado que todas as ligações tinham o mesmo comprimento (na falta de um critério baseado na similaridade geométrica com o meio real, os autores arbitraram o valor desse comprimento único como sendo igual ao diâmetro médio da distribuição de tamanhos de gargantas). Rege e Fogler alegaram, baseados em um estudo de

sensibilidade, que a escolha desses comprimentos não seria um parâmetro crítico em seu modelo. Note-se que as distribuições usadas na publicação de 1987 somente têm sentido para efeito do cálculo das condutâncias hidráulicas dos elementos da rede, já que o arranjo espacial desta é suposto regular, o que tornaria geometricamente absurda, por definição, a ocorrência de distâncias variáveis entre os nós.

Emprega-se a equação de Hagen-Poiseuille para calcular a condutância hidráulica das ligações cilíndricas. A vazão volumétrica é obtida multiplicando essa condutância pela diferença entre as pressões na entrada e na saída da ligação. Aplicando a equação de conservação de massa para cada nó, chega-se a um sistema algébrico de equações lineares simultâneas. Uma vez impostas condições de contorno adequadas (no caso, a vazão total injetada e condições laterais periódicas), a resolução numérica desse sistema resulta na determinação da diferença entre as pressões nas faces de entrada e saída da rede.

O tamanho das partículas (esféricas) é gerado estocasticamente, reproduzindo a distribuição de tamanhos real (medida experimentalmente ou estimada). Em seguida, escolhe-se por qual das ligações da face de injeção cada partícula irá penetrar na rede, o que é feito atribuindo, a cada ligação que parte dessa face, uma probabilidade proporcional à vazão que por ela flui. Esse procedimento, chamado de probabilidade com viés de vazão, é adotado também sempre que uma partícula atinge um nó interno da rede, fazendo-se necessário definir qual das outras ligações do nó será escolhida para que a partícula prossiga seu percurso no interior do sistema.

A probabilidade com viés de vazão preserva o caráter estocástico da movimentação das partículas, mas incorpora a influência, empiricamente comprovada, do campo de fluxo nessa movimentação. Em comparação com a caminhada aleatória, adotada no modelo de Todd *et al.* (1984), a probabilidade com viés de vazão é um critério bastante mais adequado para a descrição da movimentação de partículas no interior de uma rede em processos convectivos. No entanto, resultados numéricos apresentados por Burganos *et al.* (1995) indicam que esse critério sub-avalia a capacidade de filtração do meio, num largo espectro de velocidades superficiais, de tamanhos de partículas e de poros. Por não serem considerados os efeitos gravitacionais sobre a movimentação das partículas, a filtração horizontal, caracterizada por uma maior taxa de

sedimentação de partículas nas partes inferiores do filtro, pode ser particularmente mal modelada pela probabilidade com viés de vazão.

Outra característica do modelo de Rege e Fogler é o uso de uma discretização no tempo suficientemente refinada, de modo que os eventos que ocorram durante um dado passo de tempo possam ser considerados simultâneos. Várias partículas (cujo número depende da concentração da suspensão e da vazão total injetada) são geradas em cada passo de tempo, adentrando a rede enquanto outras ainda movimentam-se em seu interior e algumas saem da rede. As partículas movem-se em cada canal com a velocidade média do fluido no canal, e as posições de todas as partículas no interior da rede são monitoradas ao longo de toda a simulação.

O campo de fluxo é recalculado em toda a rede ao final de cada passo de tempo em que ocorra a captura de uma ou mais partículas, o que leva a freqüentes mudanças nas probabilidades de escolha dos canais.

No trabalho de 1987, os autores só levaram em conta a captura pelo critério de exclusão pelo tamanho (diâmetro da partícula maior que o da ligação). No artigo de 1988, a esse critério foi acrescentado o da deposição, nas paredes dos elementos da rede, de partículas menores que as ligações. Para tanto, foi adotado um conceito proposto por Tien e Payatakes (1979), segundo o qual existe uma trajetória limite, a partir da qual as partículas que se aproximam da parede do canal são capturadas. À trajetória limite corresponde uma região na seção de entrada da ligação, denominada fração impactada. Assim, as partículas que ingressam na ligação através de um ponto pertencente à fração impactada são capturadas. A região impactada depende do raio da partícula,  $r_p$ , sendo expressa pelo conjunto de pontos, na face de entrada do canal, cuja distância à parede deste é inferior a  $\theta r_p$ . O parâmetro  $\theta$  ( $\theta \geq 0$ ) exprimiria a influência, sobre a trajetória limite, das diversas forças atuantes (forças hidrodinâmicas, gravitacionais e forças superficiais), bem como das dimensões do duto em relação ao tamanho da partícula. A probabilidade de captura ( $PC$ ) de uma partícula de raio  $r_p$  em um canal com raio  $R$  é dada pela probabilidade da partícula adentrar o canal num ponto pertencente à sua fração impactada. Similarmente ao critério do viés de vazão, o

modelo assume que tal probabilidade equivale à razão entre a vazão nessa região e a vazão total no duto\*. Os autores calculam esse valor por meio da expressão:

$$PC = 4 \left[ \left( \theta r_p / R \right)^2 - \left( \theta r_p / R \right)^3 \right] + \left( \theta r_p / R \right)^4 \quad (2.4).$$

Nos casos em que o produto  $\theta r_p$  for maior ou igual a  $R$ , a probabilidade de captura é igualada a 1, e a partícula é capturada. Nos outros casos, a captura é efetuada ou não, dependendo do sorteio de um número aleatório entre 0 e 1, e de sua comparação com  $PC$ .

Os fatores que afetam o valor de  $\theta$  são a velocidade do fluido, a força iônica, o pH, as propriedades do fluido, a densidade das partículas e sua concentração na suspensão injetada. O efeito da velocidade foi considerado aplicando-se expressão\*\*

$$\theta = \theta_0 \exp(-v / v_{cr}) \quad (2.5),$$

onde  $\theta_0$  é uma constante,  $v$  é a velocidade média na ligação e  $v_{cr}$  é uma velocidade crítica, que pode ser estimada a partir do ajuste de dados experimentais, em conjunto com  $\theta_0$ , de modo a fazer as previsões do modelo concordarem com os resultados obtidos naquele teste particular.

---

\* Cabe aqui uma observação. A rigor, os autores deveriam ter considerado que a posição mais externa que o centro de uma partícula pode atingir, à entrada da ligação, dista  $r_p$  da parede da ligação. Assim, seria necessário descontar, tanto da vazão total no duto, quanto da vazão na zona impactada, a vazão correspondente à região entre a parede do duto e a circunferência de raio  $(R - r_p)$ . A probabilidade de captura é, então, dada pela seguinte expressão (agora com  $\theta \geq 1$ ), em substituição à Equação 2.4:

$$PC = \frac{4(\theta^2 - 1)(r_p / R)^2 - 4(\theta^3 - 1)(r_p / R)^3 + (\theta^4 - 1)(r_p / R)^4}{1 - 4(r_p / R)^2 + 4(r_p / R)^3 - (r_p / R)^4} \quad (2.4a).$$

\*\* Pelo mesmo motivo, para o efeito da velocidade sobre  $\theta$ , seria coerente substituir 2.5 por

$$\theta = \sqrt{1 + (\theta_0^2 - 1) \exp(-v / v_{cr})} \quad (2.5a),$$

com  $\theta_0 \geq 1$ . A dedução da Equação 2.5a encontra-se no Apêndice.

A dimensão característica da ligação é atualizada de maneira a fazer com que o aumento da resistência ao fluxo da ligação seja equivalente ao causado pela partícula depositada. A queda de pressão devida especificamente à deposição de uma partícula é calculada usando uma expressão proposta por Happel e Brenner (1983), sendo função do perfil de distribuição das velocidades na seção transversal da ligação quando da deposição. Segundo Sahimi *et al.* (1990), o uso dessa expressão não é adequado à modelagem do fenômeno em questão (só o seria para uma partícula distante da parede do canal).

Rege e Fogler tratam de maneira diversa a deposição de partículas sólidas e a que ocorre com gotículas de uma fase líquida emulsionada, dada a observação de que a morfologia de deposição tem, em cada um desses casos, características específicas. A deposição de partículas sólidas pode ocorrer por superposição de camadas uniformes ou por empilhamento localizado de partículas. Já as gotículas de uma emulsão depositar-se-iam de maneira uniforme nas paredes sólidas dos dutos, formando uma camada única, não ocorrendo, portanto, a superposição de gotículas umas sobre as outras (Soo e Radke, 1986). No modelo de Rege e Fogler, são duas as conseqüências dessas diferentes morfologias de deposição:

- no caso das emulsões, testa-se se a superfície interna da ligação já está totalmente recoberta por partículas, caso em que assume-se que a probabilidade de captura por deposição no interior dessa ligação é nula;
- considera-se que uma gotícula da emulsão, quando depositada, fica sempre em contato com a parede da ligação, enquanto o depósito de uma partícula sólida ocorre numa posição intermediária entre a parede e o centro da ligação (para representar o empilhamento de partículas umas sobre as outras). Dessa forma, como a velocidade do fluido é menor próxima às paredes e maior no centro do duto, o efeito da deposição das partículas sólidas sobre a resistência ao fluxo da ligação e, conseqüentemente, sobre a alteração da dimensão característica desta, é maior do que o atribuído às gotículas líquidas, ainda que ambas tenham o mesmo tamanho.

Quanto ao primeiro desses pontos, cabe ressaltar que os autores não fizeram qualquer referência à relação entre a superfície específica do meio simulado e a do modelo de rede, o que fragiliza a representatividade deste. A adequação da modelagem da deposição das partículas

sólidas, tratada no segundo ponto, também é duvidosa, já que a escolha da posição de deposição intermediária entre as paredes e o centro das ligações não pode ser considerada correta, pelo menos na fase inicial da deposição (os próprios autores o reconhecem). Também não se justifica sua aplicação a situações as mais diversas, principalmente nos casos em que as partículas sólidas sejam muito menores que as ligações e haja uma tendência à deposição em camadas uniformes.

Não é considerada a possibilidade de livramento de partículas e sua reincorporação ao fluxo após a deposição, fenômeno que pode tornar-se importante, principalmente na simulação de experimentos à vazão de injeção constante, numa fase do processo em que haja um número significativo de partículas depositadas. O aumento das forças hidrodinâmicas sobre essas partículas pode chegar ao ponto de superar as forças de aprisionamento.

Os autores não se preocupam com a reprodução, pelo modelo, das características morfotopológicas do meio real, excetuando a distribuição do tamanho de gargantas de poros. Desse modo, nem a porosidade da rede, nem sua permeabilidade são sequer calculadas (no trabalho de 1987, isso seria mesmo impossível, pois, como referido anteriormente, naquele caso a geometria do modelo permaneceu indefinida pela adoção de comprimentos variados de ligações, ou seja, distâncias variadas entre os nós do modelo, o que contradiz o pressuposto do arranjo regular da rede). Por isso, a razão de permeabilidades que o modelo fornece é calculada indiretamente, equivalendo ao quociente da diferença original de pressão entre a entrada e a saída da rede, pela diferença de pressão observada após a injeção de um dado número de volumes porosos, quando uma determinada quantidade de partículas estiver capturada.

Como citado no Capítulo 1, o transporte de partículas em meios porosos é um fenômeno de percolação. Assim sendo, é pertinente a observação, feita por Imdakm e Sahimi (1991), de que grandes diferenças nos limites de percolação afetam qualitativa e quantitativamente os valores das razões de permeabilidades da rede durante a simulação. O limite de percolação em ligações de uma rede triangular 2D, como a usada nesse modelo, vale aproximadamente  $p_{cb} = 0,35$ . Já o de uma rede cúbica 3D, com o mesmo número de coordenação ( $Z = 6$ ), vale aproximadamente  $p_{cb} = 0,25$ .

As predições do modelo concordam razoavelmente bem com os dados experimentais apresentados, o que Sahimi *et al.* (1990) qualificam como “relativo sucesso (...) devido, ao menos em parte, ao uso dos parâmetros ajustáveis”  $\theta_0$  e  $v_{cr}$ .

A grande virtude do trabalho de Rege e Fogler é a plena utilização do caráter estatístico de um modelo de rede, tendo sido adotados critérios de geração, movimentação e captura de partículas baseados na observação dos fenômenos em sistemas reais, em escalas que permitem sua incorporação pelo modelo. Por essa consistência e por sua eficiência computacional, esse modelo tem servido de base a trabalhos com características variadas, desde a seleção de partículas para a obstrução temporária de formações em reservatórios de petróleo visando prevenir danos por invasão de fluidos e sólidos (Wenrong *et al.*, 1996), até pesquisas sobre o transporte e deposição de partículas em meios porosos, e sua visualização em micromodelos transparentes 2D (Gohr Pinheiro, 1996).

Vale citar que o trabalho de Gohr Pinheiro (1996) contém alguns elementos diferenciados, entre os quais destacam-se o formato retangular das seções transversais dos nós e ligações da rede, além da introdução de um critério de reincorporação ao fluxo de partículas anteriormente depositadas, através da definição de uma velocidade de livramento  $v_R$ , acima da qual as últimas partículas depositadas são liberadas e o fluxo é sucessivamente recalculado até que a velocidade média na ligação volte a ficar abaixo de  $v_R$ . Nas ligações onde a velocidade for maior que  $v_R$ , não ocorrem deposições.

### **2.3.6 – O modelo de Sahimi e Imdakm (1991; Imdakm e Sahimi, 1991)**

Em seu modelo, Sahimi e Imdakm usaram uma rede cúbica tridimensional (com número de coordenação 6). Às ligações (cilíndricas) foi atribuído todo o volume poroso do modelo, enquanto os nós foram considerados sem volume, como no modelo de Rege e Fogler (1988). Também como naquele modelo, os diâmetros das ligações foram atribuídos estocasticamente, obedecendo à distribuição de tamanhos de gargantas de poros, determinada por injeção de mercúrio. Quanto ao comprimento das ligações, este foi assumido como uniforme e calculado de maneira a reproduzir a porosidade do meio real. Obviamente, como os próprios autores

reconhecem, tal procedimento resulta num valor maior que o do comprimento médio dos poros num meio real, o que, ainda segundo os autores, não origina erros importantes.

A determinação do campo de fluxo na rede, a geração e movimentação das partículas em seu interior, bem como a captura pelo critério de exclusão pelo tamanho (neste tipo de captura, não é prevista a possibilidade de livramento da partícula) são similares às do modelo de Rege e Fogler, o que não ocorre com outras características importantes do modelo tratado nesta seção.

Para a captura de partículas por deposição nas paredes dos elementos da rede, o modelo de Sahimi e Imdakm executa a análise da trajetória da partícula no interior da ligação. A partícula (ou, mais precisamente, seu centro) é posicionada por sorteio em um ponto do segmento de reta formado pela interseção do plano de entrada da ligação com o plano vertical que passa pelo eixo do duto. No percurso das partículas ao longo da ligação, não são considerados os seus movimentos angulares em relação ao plano vertical axial. A trajetória de cada partícula é calculada através do balanço das principais forças e torques que agem sobre a partícula, como resultado do fluxo (forças hidrodinâmicas), da diferença de densidade entre a partícula e o fluido (forças gravitacionais) e da interação entre a partícula e a parede do duto (forças devidas à dupla camada elétrica, forças de atração de London - van der Waals).

Para simular o efeito da rugosidade da parede da ligação, impedindo que, no modelo, uma partícula (esférica) toque a parede do duto e prossiga rolando livremente até a saída deste, foram geradas saliências com alturas determinadas, uniformemente espaçadas ao longo da superfície interna das ligações. Assume-se que a presença das saliências não afeta a condutância hidráulica da ligação, mas tão somente a interceptação das partículas. Caso a trajetória da partícula toque alguma dessas saliências, o modelo testa se o balanço de forças e torques em presença da saliência resulta ou não na fixação da partícula. O balanço é refeito, para cada partícula depositada, toda vez que o campo de fluxo da rede é atualizado, a fim de verificar se os novos valores das forças hidrodinâmicas são ou não suficientes para livrá-la, reincorporando-a ao fluxo.

Para cada ligação obstruída por exclusão pelo tamanho ou para cada cinco partículas depositadas, o campo de fluxo na rede é recalculado. Nas ligações onde ocorre a deposição de

partículas, usa-se uma expressão proposta por Goldman *et al.* (1967) para determinar a queda local de pressão originada. Um novo raio efetivo, correspondente ao raio do duto que produziria uma resistência ao fluxo equivalente, é então atribuído à ligação. A permeabilidade do modelo é calculada pela solução do sistema de equações lineares simultâneas resultante do balanço de massa em cada nó, considerando os comprimentos da rede nas direções transversal e longitudinal, a vazão total ou as diferenças de pressão entre as faces de entrada e saída. No entanto, conforme já mencionado, os comprimentos das ligações da rede são inerentemente alongados neste modelo. Não se pode, portanto, comparar a permeabilidade da rede com a do meio real, mas apenas as respectivas relações entre a permeabilidade original e as permeabilidades medidas durante a injeção, em função do número de volumes porosos injetados.

Neste modelo, assim como no de Rege e Fogler, há a possibilidade de diferenciar-se a modelagem segundo a especificidade de cada uma das duas morfologias de deposição: a das partículas sólidas e a das gotas em emulsão.

O modelo de Sahimi e Imdakm também não se preocupa com a reprodução das características morfo-topológicas do meio real, exceção feita à distribuição de tamanhos de gargantas de poros (obtida por injeção de mercúrio, sem qualquer correção, ainda que tosca, como a usada por Rege e Fogler) e à porosidade. Além disso, nada é dito sobre o número de coordenação da rede em comparação com o do meio original. Conforme comentado anteriormente, Imdakm e Sahimi (1991) fizeram uma observação oportuna, ao comparar o limite de percolação em ligações de sua rede 3D cúbica ( $p_{cb} \approx 0.25$ ) com o da rede de ligações 2D triangular, adotada no modelo de Rege e Fogler ( $p_{cb} \approx 0.35$ ), ambas tendo o mesmo número de coordenação ( $Z = 6$ ), sugerindo que tal fato comprometeria os resultados do modelo 2D. Porém, o próprio modelo de Sahimi e Imdakm é passível de sofrer a mesma crítica, pois os autores continuam a desconsiderar o limite de percolação do meio real, que só seria obtido caso o modelo fosse construído com o número de coordenação médio real (enquanto os autores, independentemente do meio estudado, adotam o número de coordenação 6, ou seja, o número de coordenação máximo de uma rede cúbica regular infinita, considerando ativos todos os seus nós e ligações).

Os autores atribuem a seu modelo a virtude de dispensar o uso de parâmetros ajustáveis, o que é correto, pelo menos em alguma medida, pois resta o problema dos critérios para a determinação dos valores da altura e da frequência espacial das protuberâncias usadas para representar a rugosidade do meio. Em Sahimi e Imdakm (1991) o valor “típico” da altura  $h$  das saliências é dado por sua relação com o raio  $R$  do duto, segundo a desigualdade  $h/R \leq 0.05$ , enquanto em Imdakm e Sahimi (1991) foi adotado para  $h$  um valor de aproximadamente  $70\text{Å}$  (ordem de grandeza que os autores atribuem a medições com microscópio eletrônico de varredura). A falta de critérios mais objetivos pode levar a resultados fracos e talvez indique a necessidade de ajustar os valores dessas variáveis.

Observe-se, ainda, que a sofisticação da modelagem da deposição leva à necessidade de uma extensa caracterização experimental do fluido, das partículas e do meio, incluindo determinações da heterogeneidade das cargas superficiais das partículas e do meio, das densidades das partículas, da constante dielétrica do fluido, das espécies iônicas presentes e suas respectivas concentrações, entre outras.

As predições do modelo concordam bastante bem com os dados experimentais apresentados, o que, como enfatizam os autores, não é sua contribuição principal, dado que outros simuladores também podem fazê-lo com o ajuste de alguns poucos parâmetros. O maior mérito deste modelo é a inclusão de todos os mecanismos relevantes, na escala de poros, para os processos de transporte de partículas, o que permite a simulação do efeito isolado de cada uma das variáveis consideradas, possibilitando melhorar, com relativa rapidez e economia, o conhecimento disponível sobre vários fenômenos envolvidos nesses processos.

### **2.3.7 – O modelo de Burganos et al. (1995)**

Esse é um modelo destinado à simulação da deposição de partículas em leitos de grãos empacotados (*packed beds*), para processos de filtração com sentido macroscópico de fluxo horizontal, vertical ascendente ou vertical descendente, sendo cada um desses três casos discutidos separadamente pelos autores.

É constituído por uma rede cúbica 3D, cuja principal especificidade é o uso de ligações com formato sinusoidal, longitudinalmente, visando dar conta do carácter convergente-divergente do espaço poroso, associado a taxas de filtração mais elevadas do que as modeladas com ligações cilíndricas. A condutância hidráulica de cada ligação é obtida por simulação numérica. Da mesma forma que no modelo de Rege e Fogler (e também no de Sahimi e Imdakm), a permeabilidade da rede é calculada numericamente através da solução de um sistema de equações lineares simultâneas, cada uma representando o balanço de massa em um nó da rede, com adequadas condições de contorno.

O critério de movimentação das partículas adotado, através do qual é escolhida a ligação por onde a partícula que se encontra em um nó prossegue seu caminho na rede, considera o efeito da componente gravitacional sobre as partículas, e não só o da vazão, como o modelo de Rege e Fogler (e também o de Sahimi e Imdakm). Segundo os autores, esse procedimento, chamado de probabilidade com viés de taxa de transporte de partículas, mostrou resultados mais consistentes que os da probabilidade com viés de vazão, que tende a sub-avaliar sensivelmente a capacidade de filtração do meio, para um largo espectro de tamanhos de partículas e de poros, velocidades superficiais e diferenças de densidades entre as partículas e o fluido. Por sua capacidade de considerar os efeitos gravitacionais sobre a movimentação das partículas, a probabilidade com viés de taxa de transporte de partículas é particularmente mais representativa, relativamente ao viés pela vazão, para a filtração horizontal, caso em que, sendo as partículas mais densas que o fluido, a captura destas ocorre preferencialmente nas partes inferiores do filtro (obviamente, quando as partículas são menos densas, sua captura se dá nas partes superiores do filtro).

Simulações de trajetórias de partículas-teste de tamanho uniforme proporcionaram estimativas diretas das taxas de deposição local e total para distribuições de tamanhos de poros discretas e contínuas. Foram necessárias simulações diferentes e independentes para cada tamanho de partícula presente no sistema. Alternativamente, pode-se simular a trajetória de cada partícula em cada elemento da rede para identificar se ela é ou não capturada. Na prática, porém, devido à intensa demanda computacional, os autores limitaram suas simulações a meios com tamanhos de poros e gargantas uniformes ou com distribuição bi-modal.

A determinação das trajetórias das partículas no interior das ligações com formato sinusoidal foi feita com base num trabalho de Paraskeva *et al.* (1991), levando em conta forças e torques hidrodinâmicos, a gravidade, a força de London - van der Waals e as forças devidas à dupla camada iônica. A posição de entrada da partícula na ligação é definida por um critério que atribui a cada ponto uma probabilidade proporcional à sua taxa local de transporte de partículas. Nesse modelo, permite-se que as partículas desenvolvam trajetórias plenamente tridimensionais, mas, uma vez depositadas, não mais ocorre livramento das partículas. Essas são diferenças importantes com relação ao modelo de Sahimi e Imdakm, que assumia uma distribuição de probabilidade uniforme em toda a seção de entrada do poro e restringia o percurso das partículas aos planos verticais axiais dos dutos, além de, por outro lado, possibilitar o livramento e reincorporação ao fluxo de partículas capturadas por deposição.

Burganos *et al.* não apresentam comparações com resultados experimentais, apenas uma análise de sensibilidade das variáveis do modelo e comparações entre seus resultados e os obtidos com a aplicação de critérios usados em modelos anteriores. O escopo de seu trabalho não é a previsão do comportamento da permeabilidade, mas a determinação de parâmetros macroscópicos de filtração (coeficiente de filtração, eficiência do filtro) e sua comparação com os de modelos UBE de análise de trajetórias (ver Seção 2.1.2). Assim, os autores assumem que as suspensões são diluídas e as partículas são muito menores que as constrições das ligações da rede (não há, portanto, exclusão pelo tamanho), sendo também negligenciadas as alterações da condutância hidráulica das ligações devidas à deposição de partículas (a permeabilidade da rede é, portanto, considerada inalterada durante toda a simulação).

Ao que tudo indica, o que se ganha nesse modelo com a representação do espaço poroso por ligações com formato convergente-divergente, não compensa o que se perde com o acréscimo da demanda computacional. Por outro lado, o modelo traz contribuições importantes ao demonstrar a melhor adequação do critério de viés de transporte de partículas para a escolha das ligações da rede por onde elas passarão, bem como para a definição da posição da partícula na entrada da ligação, que influencia fortemente sua trajetória limite e, conseqüentemente, sua probabilidade de captura.

## Capítulo 3

### Caracterização Morfo-topológica do Meio Poroso

Um sistema poroso é composto por espaços alargados, denominados “poros” (ou “corpos de poros”), conectados entre si por espaços mais estreitos, ou constrições, denominados “gargantas” ou “gargalos” entre poros. Os termos poro e garganta correspondem aos termos nó e ligação, respectivamente, usualmente aplicados nos modelos de rede. Por definição, cada poro é mais largo que qualquer das gargantas que o conectam a poros adjacentes, mas o tamanho do menor poro de um meio poroso não é, necessariamente, maior que o da garganta mais aberta desse meio.

O tamanho de uma garganta pode ser definido em termos de uma dimensão característica, relacionada à menor seção transversal entre os dois poros conectados. Essa definição depende da figura geométrica a ser aplicada na modelagem das gargantas: caso essa figura seja circular, por exemplo, pode-se adotar como dimensão característica da garganta o diâmetro do círculo inscrito no plano de menor seção transversal entre os poros ligados; caso essa figura seja retangular, essa dimensão característica pode ser definida como o lado menor do retângulo com área equivalente à da menor seção transversal entre o par de poros ligados, estabelecendo-se uma relação fixa entre os lados maior e menor do retângulo.

Já o tamanho de um poro pode ser definido em termos de uma dimensão característica relacionada ao volume delimitado pelo arcabouço sólido e pelos planos de menor dimensão transversal das suas conexões com os poros a ele diretamente ligados. Analogamente às

gargantas, a definição da dimensão característica dos poros depende do sólido geométrico a ser aplicado na sua modelagem: caso esse sólido seja esférico, por exemplo, pode-se adotar como dimensão característica do poro o diâmetro de uma esfera inscrita no espaço delimitado conforme acima descrito; caso esse sólido seja cúbico, essa dimensão característica pode ser definida como o lado do cubo com volume igual ao acima descrito.

Outras características relevantes de um sistema poroso são o grau de conectividade entre os poros (traduzido pela distribuição do número de gargantas entre os poros e seus vizinhos, denominado número de coordenação), a correlação local dos tamanhos de gargantas com os dos poros que elas ligam, a correlação espacial dos tamanhos de poros e gargantas, levando a uma maior ou menor tendência à formação de agrupamentos (*clusters*) predominantemente compostos por poros maiores ou por poros menores, a rugosidade das superfícies sólidas e a existência ou não de orientação direcional preferencial dos corpos e das gargantas dos poros.

Nos modelos anteriormente publicados para o transporte de partículas em meios porosos, quando muito considerava-se uma distribuição dos tamanhos das gargantas de poros, interpretada a partir de curvas de pressão capilar, ignorando-se totalmente diversas outras importantes características morfo-topológicas específicas dos meios estudados, tais como a distribuição dos tamanhos de poros e o número de coordenação médio. Para obter uma modelagem mais representativa, o presente trabalho incorpora tais características, o que acarreta, como contrapartida imediata, a necessidade de determiná-las em cada sistema analisado.

Neste capítulo, é feita uma breve exposição crítica das modelagens anteriores, do ponto de vista da caracterização morfo-topológica (Seção 3.1), após o que são descritas duas alternativas adotadas no presente trabalho para a obtenção das características citadas: a primeira, por intermédio da reconstrução estocástica virtual de meios porosos (Seção 3.2); a segunda, usando ensaios de porosimetria de mercúrio interpretados convencionalmente, aplicando-lhes em seguida algumas correções simples, e conjugando os resultados com estimativas provenientes de observações petrográficas de meios porosos naturais, bem como de análises de seccionamento serial e dos próprios resultados de reconstruções estocásticas virtuais de meios porosos (Seção 3.3).

Os produtos dessas operações são usados para a construção do modelo de rede, com base no qual é feita a simulação do comportamento da permeabilidade absoluta durante processos de injeção de fluidos com partículas em suspensão. Estes temas são tratados no Capítulo 4.

### **3.1 – A caracterização morfo-topológica nos modelos anteriormente publicados**

Apesar do título desta seção, desde logo é conveniente ressaltar que, com relação aos modelos de rede para o transporte de partículas anteriormente publicados, não se pode falar propriamente de caracterização morfo-topológica do meio poroso, pois nenhuma caracterização topológica foi aplicada ao meio: naqueles modelos, foram adotadas redes com todos os nós e ligações abertos, resultando em um mesmo número de coordenação (o número de coordenação máximo da rede) para todo e qualquer meio. Assim, o número de coordenação ficava determinado somente pela dimensionalidade e pelo tipo de estrutura de rede escolhida, em vez das características específicas do meio modelado. Tal simplificação prejudica fortemente a representatividade dos resultados daqueles modelos, pois sabe-se que os diferentes graus de conectividade e situações de acessibilidade do sistema real são determinantes no transporte de partículas com obstrução de parcelas do espaço poroso, que constitui um fenômeno de percolação, embora com características que o diferenciam dos processos classicamente estudados na Teoria da Percolação (Imdakh e Sahimi, 1987).

Ressalve-se que, a rigor, do ponto de vista teórico, o único desses trabalhos em que a simplificação mencionada é justificável, no que se refere aos seus efeitos sobre as propriedades simuladas, é o de Gohr Pinheiro (1996), dado que, nesse caso, o meio físico representado é um micromodelo artificial, com geometria regular e características de construção controladas, que são adequadamente reproduzidas pela rede adotada.

Já quanto às considerações de ordem morfológica, os modelos anteriores restringiram-se, se tanto, à distribuição dos tamanhos de gargantas entre poros, sendo esta adotada arbitrariamente (Kumar, 1988; Meloy *et al.*, 1991; Burganos *et al.*, 1992; Gohr Pinheiro, 1996) ou proveniente de ensaios de injeção de mercúrio (Rege e Fogler, 1987 e 1988; Imdakh e Sahimi, 1987 e 1991;

Kumar, 1988). Tradicionalmente, os resultados da porosimetria de mercúrio são interpretados modelando o meio poroso como um feixe de tubos capilares tortuosos de seção circular, ligando diretamente faces opostas do sólido poroso (Figura 3.1). No trabalho pioneiro que publicou sobre a modelagem de meios porosos por redes, Fatt (1956 a, b, c) mostrou que as distribuições de tamanhos de gargantas assim deduzidas da injeção de mercúrio atribuem volumes aparentes maiores para os poros pequenos e menores para os poros grandes, além do estreitamento da distribuição, com relação às características reais do meio poroso. Por um lado, isso ocorre porque a pressão capilar necessária para o mercúrio invadir uma garganta é governada pela abertura desta, e não pelas dimensões dos corpos dos poros ligados, que definem o volume invadido. Por outro, os efeitos citados devem-se também ao fato de que, nos meios porosos reais, existem poros grandes cercados por poros pouco conectados ou com gargantas pequenas, o que dificulta o seu acesso. O modelo de feixe de tubos capilares implica na acessibilidade total de cada um dos poros desde a superfície externa do meio, o que não ocorre na realidade.

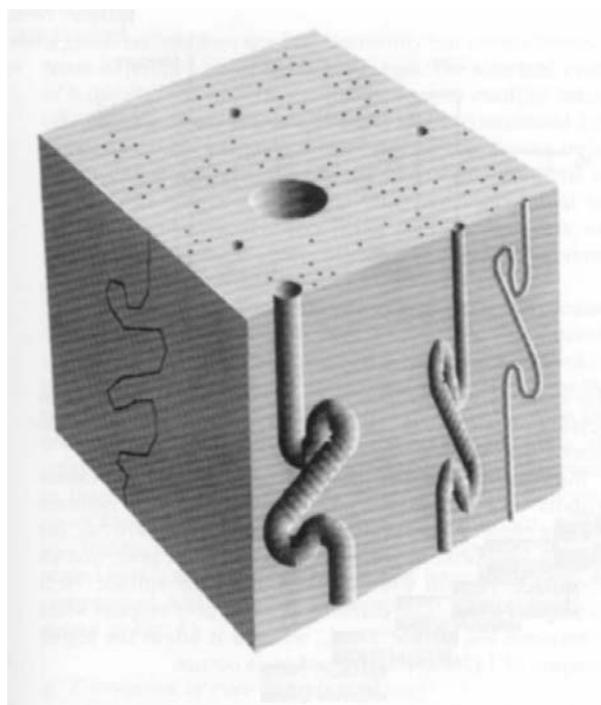


Figura 3.1: Representação de como seria o meio poroso modelado segundo a interpretação tradicional da porosimetria de mercúrio (extraído de Matthews *et al.*, 1995)

Outra deficiência comum nos modelos anteriores para o transporte de partículas é que todo o volume poroso era concentrado nas ligações da rede, ou seja, nos elementos que representam as gargantas dos poros, desconsiderando, desse modo, a distribuição de tamanhos dos corpos de poros e sua relação com os tamanhos das gargantas e com o número de conexões aos poros vizinhos. Essa falta de analogia com os meios reais impedia que as permeabilidades destes pudessem ser estimadas pelos modelos, tornando ainda necessária a aplicação de um fator de ajuste de volumes para simular escoamentos em que a exclusão pelo tamanho é o mecanismo de captura predominante (Rege e Fogler, 1987) e privando de sentido físico as considerações quanto aos efeitos da velocidade de fluxo sobre a deposição de partículas nos modelos.

### **3.2 – Caracterização morfo-topológica pela reconstrução estocástica virtual**

As propriedades espaciais observadas em superfícies polidas (lâminas delgadas) do meio poroso podem servir de base à obtenção de suas características morfo-topológicas tridimensionais. Usando-se microscópios eletrônicos de varredura ou óticos, tais superfícies são percorridas e a geometria interna do sistema é registrada em imagens digitalizadas. Através da aplicação de técnicas de análise de imagens e simulação estocástica, são geradas estruturas porosas tridimensionais virtuais reproduzindo propriedades estatísticas das seções do meio real. Esse processo recebe a denominação de reconstrução estocástica virtual do meio poroso (Joshi, 1974; Quiblier, 1984; Adler *et al.*, 1990; Fernandes, 1994; Liang, 1997).

Pesquisadores da Universidade de Waterloo, no Canadá, têm investigado métodos para desenvolver a reconstrução virtual de meios porosos. A partir das informações geométricas e topológicas obtidas no meio reconstruído, são elaborados modelos de rede reproduzindo a distribuição do tamanho de poros e de gargantas, bem como o número de coordenação médio do meio real. Diversas propriedades petrofísicas desse meio são estimadas, entre elas a permeabilidade absoluta (Ioannidis e Chatzis, 1993; Ioannidis *et al.*, 1997). Todas essas ferramentas foram integradas num programa denominado *Virtual Core Lab (VCLab)*.

A seguir (Seções 3.2.1 e 3.2.2), são resumidamente descritos os fundamentos constituintes dessa metodologia.

### 3.2.1– Aquisição e binarização das imagens

O processo de análise das imagens inicia-se com a obtenção das micrografias das seções polidas de rocha e sua discretização em células elementares (*pixels*, em 2D), através da digitalização, atribuindo-se a cada *pixel* o valor numérico referente ao seu tom de cinza, numa escala de 256 tons, sendo o valor 0 associado ao preto e o 255 ao branco.

Sobre essa imagem digitalizada, opera-se uma transformação global de modo a separar os *pixels* correspondentes aos poros (a todos os quais é atribuído o valor 0) daqueles que representam o substrato sólido do meio (que assumem o valor 255). Tal operação, realizada por intermédio da definição de um limite de separação na escala de níveis de cinza, recebe o nome de binarização. Operações similares são realizadas quando da aquisição de imagens coloridas, caso em que a cada *pixel* estão associadas três intensidades, correspondentes às cores fundamentais do espectro (vermelho, amarelo e verde), sendo definido um limite de separação entre as fases poro/sólido para cada cor.

A figura 3.2 mostra uma imagem colorida, adquirida com um microscópio ótico em uma lâmina petrográfica de uma amostra de arenito Berea. A figura 3.3 mostra a imagem binarizada correspondente à da figura 3.2.

Cabe observar que o tamanho do *pixel* depende do aumento no qual as imagens são obtidas no microscópio, e que a binarização pode ser bastante complicada, devido a efeitos de profundidade e a variações no contraste das mesmas fases em diferentes regiões da imagem. Discussões mais aprofundadas sobre essas questões e seus efeitos sobre os resultados da caracterização do meio e as estimativas das propriedades petrofísicas daí decorrentes são encontradas em Fernandes (1994) e em Gasperi (1999).

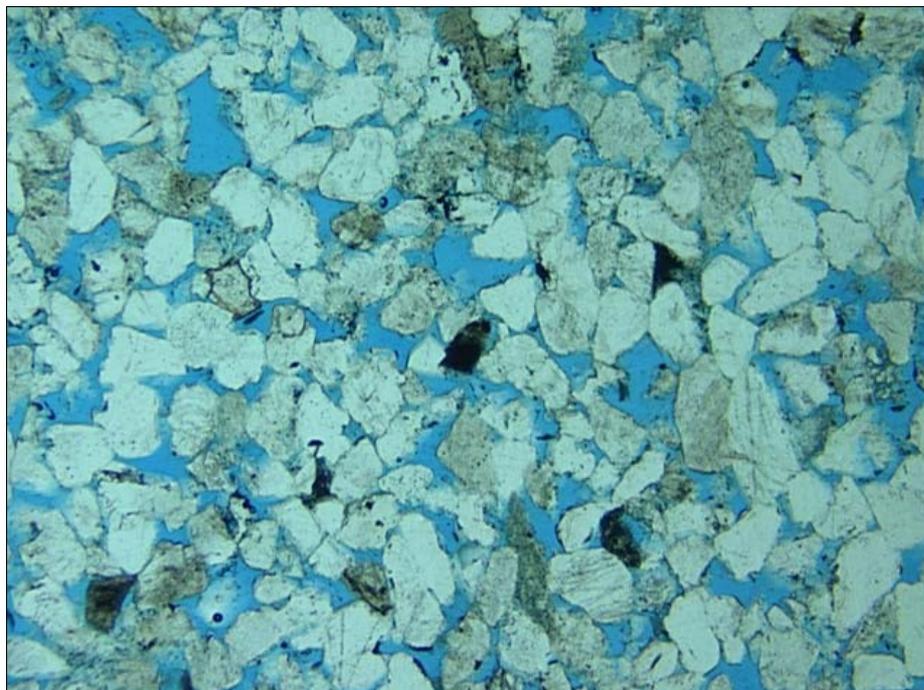


Figura 3.2: Imagem adquirida por microscópio óptico, com aumento de 25 vezes, em lâmina delgada do arenito Berea

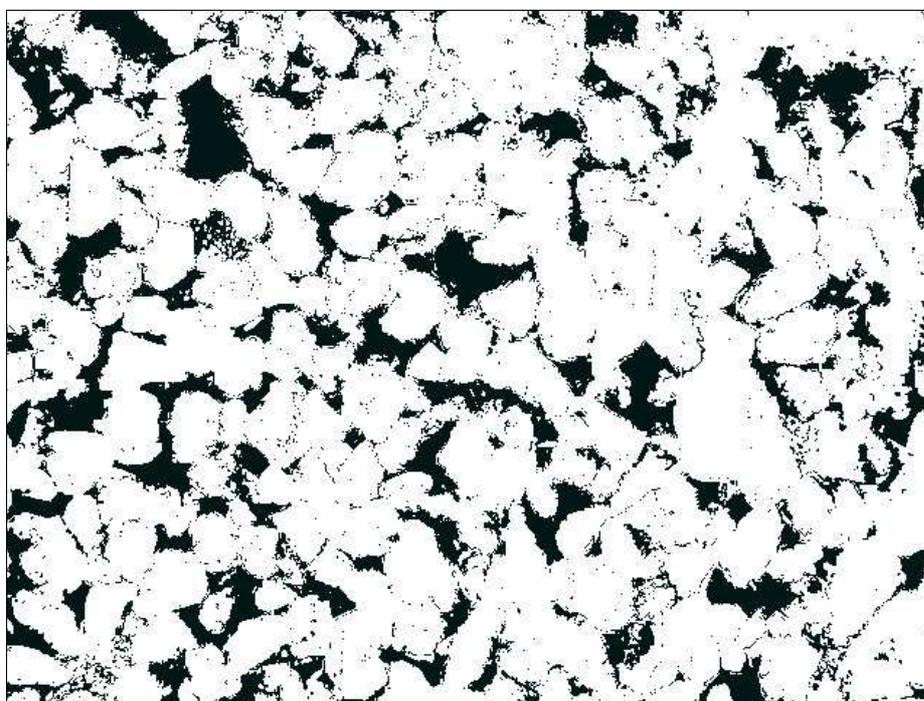


Figura 3.3: Imagem binarizada correspondente à figura 3.2

### 3.2.2 – Hipóteses e definições básicas

A simulação estocástica da estrutura porosa baseia-se nas hipóteses de homogeneidade estatística e de isotropia do meio, em decorrência das quais, segundo Ioannidis *et al.* (1995), pode-se considerar que a complexidade da microestrutura porosa é suficientemente descrita pelos dois primeiros momentos estatísticos da função de fase,  $P(\mathbf{x})$ , definida por

$$P(\mathbf{x}) = \begin{cases} 1, & \text{se } \mathbf{x} \text{ pertence ao espaço poroso} \\ 0, & \text{em caso contrário} \end{cases} \quad (3.1),$$

onde  $\mathbf{x}$  denota um vetor de posição no plano da imagem, com relação a uma origem arbitrária. No caso de imagens digitalizadas, o vetor  $\mathbf{x}$  é definido pelas coordenadas  $(x_1, x_2)$  do ponto, sendo  $x_1$  e  $x_2$  inteiros e múltiplos da unidade elementar de medida, o *pixel*.

Sendo  $P(\mathbf{x})$  uma função indicatriz, que assume somente os valores 0 ou 1, seu momento estatístico de primeira ordem, constituído por sua esperança matemática (média), corresponde à própria porosidade da rocha,  $\phi$ , medida na imagem binarizada,

$$\phi = \langle P(\mathbf{x}) \rangle \quad (3.2),$$

onde o símbolo  $\langle \rangle$  denota a média estatística para o domínio da imagem considerada.

O momento estatístico de segunda ordem da função de fase pode ser expresso por sua função de autocorrelação a dois pontos,  $R_{pp}(\mathbf{u})$ , definida para cada vetor deslocamento arbitrário  $\mathbf{u}$  no plano da imagem como

$$R_{pp}(\mathbf{u}) = \frac{\langle [P(\mathbf{x}) - \phi][P(\mathbf{x} + \mathbf{u}) - \phi] \rangle}{\langle [P(\mathbf{x}) - \phi]^2 \rangle} \quad (3.3).$$

Dada a hipótese da isotropia do meio, a autocorrelação depende apenas da norma  $\hat{u}$  do vetor  $\mathbf{u}$ , podendo ser reescrita como

$$R_{pp}(u) = \frac{\langle [P(x_1, x_2) - \phi][P(x_1 + \hat{u}, x_2) - \phi] \rangle - \phi^2}{\phi - \phi^2} \quad (3.4).$$

A função covariograma,  $C_{pp}(\hat{u})$ , é definida como (Fernandes, 1994)

$$C_{pp}(\hat{u}) = \langle [P(x_1, x_2) P(x_1 + \hat{u}, x_2)] \rangle \quad (3.5).$$

O covariograma expressa a probabilidade de duas células elementares, separadas por uma distância  $\hat{u}$ , pertencerem à fase poro. Em outras palavras, expressa a correlação espacial do sistema poroso. Seus valores variam desde a porosidade  $\phi$ , para deslocamento nulo, até  $\phi^2$ , para deslocamentos grandes. Para os mesmos casos, a autocorrelação assume, respectivamente, os valores 1 e 0.

### 3.2.3 – O método JQA

O processo de reconstrução estocástica virtual de meios porosos foi proposto originalmente por Joshi (1974) para a geração de sistemas bidimensionais, tendo sido estendido por Quiblier (1984) e Adler (1990) para estruturas tridimensionais. Essa abordagem, doravante denominada método JQA, consiste de três etapas principais:

- a- Geração de números,  $x$ , segundo uma distribuição Gaussiana com média 0 e variância 1, e sua atribuição aleatória às locações  $(i, j, k)$  de uma matriz tridimensional. Os elementos de tal conjunto  $X(x)$  de números não possuem qualquer correlação espacial entre si;
- b- Aplicação de um filtro linear  $X(x) \longrightarrow Y(x)$ . Considera-se uma vizinhança  $(i+r, j+s, k+t)$  correspondente à distância além da qual a função de autocorrelação torna-se desprezível. Os valores  $x(i+r, j+s, k+t)$  são linearmente combinados de modo a formar um novo número  $y(i, j, k)$ , definido por

$$y(i, j, k) = \sum_{r,s,t} a(r, s, t) \cdot x(i+r, j+s, k+t) \quad (3.6).$$

Pode-se demonstrar que, a exemplo de  $X(x)$ , o conjunto  $Y$ , constituído por esses números  $y(i, j, k)$ , também segue uma distribuição Gaussiana, mas diferentemente de  $X(x)$  seus elementos são espacialmente correlacionados. Sua autocorrelação pode ser expressa como uma função dos coeficientes  $a(r, s, t)$ . Assim, uma escolha conveniente desses coeficientes pode gerar qualquer autocorrelação que se deseje para o conjunto  $Y$ .

- c- Aplicação de um filtro não-linear  $Y(x) \longrightarrow Z(x)$ , através do qual o conjunto Gaussiano  $Y$  é transformado no conjunto  $Z$ , de natureza binária, cuja porosidade  $\phi$  e autocorrelação  $R_{pp}$  correspondem aos valores médios dessas funções nas imagens do meio real. A função densidade de probabilidade desse conjunto é o mesmo das imagens binarizadas: uma função degrau, que assume o valor 0, se a distribuição de probabilidade acumulada for menor que  $\{\phi / [\phi (1-\phi)]^{1/2}\}$ , e o valor 1, nos outros casos.

Antes de realizar a simulação, é necessário determinar os parâmetros apropriados, o que é feito numa ordem inversa aos passos acima enumerados: primeiramente, determinam-se os coeficientes do filtro não-linear; em seguida, calcula-se a função de autocorrelação do conjunto  $Y$ ; finalmente, os coeficientes do filtro linear podem ser determinados através da solução de um extenso sistema de equações não-lineares, o que constitui a fase que apresenta maiores dificuldades em todo o processo.

Para maiores detalhes sobre o método JQA, recomenda-se, além dos trabalhos dos seus próprios autores, a tese de Fernandes (1994).

### 3.2.4 – O método da transformada discreta de Fourier (DFT)

Algumas propriedades matemáticas da transformada discreta de Fourier encontram larga aplicação na análise e processamento de imagens. Dada uma função real definida no domínio do espaço bidimensional, sua transformada discreta de Fourier é uma função complexa definida no domínio da frequência. O módulo dessa transformada é denominado o espectro de Fourier da função original, enquanto o quadrado desse módulo é definido como o espectro de potência da função original. No espectro de potência, estão contidas informações relacionadas tanto ao arranjo espacial dos objetos componentes da imagem, quanto ao tamanho e forma desses objetos. Uma propriedade importante para a aplicação na reconstrução estocástica virtual de meios porosos é que a transformada de Fourier da função de autocorrelação equivale ao espectro de potência da função original.

No método DFT (Gutjahr, 1989) realiza-se, no domínio da frequência, uma amostragem aleatória do espectro de potência (obtido pela aplicação da transformada de Fourier à função de autocorrelação). Cria-se, assim, um conjunto não correlacionado que, submetido à transformada inversa de Fourier, retorna o campo correlacionado  $Y$  no domínio do espaço. Esses procedimentos substituem a aplicação do filtro linear (passo  $b$  da seção anterior) com maior eficiência, do ponto de vista computacional, proporcionando um ganho expressivo em tempo de CPU (Ioannidis *et al.*, 1995; Liang, 1997).

No entanto, a aplicação do método DFT em sistemas 3D é limitada, dada a quantidade de memória residente requerida. Ioannidis *et al* (1995) mencionam que a geração de um meio sintético composto por  $400 \times 400 \times 400$  *voxels* (células elementares em 3D) solicita exorbitantes 512 MB de memória residente para o armazenamento de valores com 4 *bytes* de tamanho.

Maiores detalhes sobre o método DFT podem ser encontrados em Ioannidis *et al* (1995) e em Liang (1997).

### 3.2.5 – O método híbrido

O programa *VCLab* utiliza um método híbrido DFT - Filtro Linear, buscando combinar os aspectos mais vantajosos de cada um deles. Assim como nos casos anteriormente citados, a simulação inicia-se com a determinação dos coeficientes do filtro não-linear. Para obter, em seguida, a transformada de Fourier da função de autocorrelação do campo  $Y$ , é conveniente expressar essa função analiticamente. Isso é feito aproximando-a por uma soma ponderada das autocorrelações correspondentes aos modelos Gaussiano e exponencial, cada qual ajustada à autocorrelação de  $Y$ . Após isso, o método DFT é usado para gerar seções  $(x, y)$  consecutivas, obedecendo, uma a uma, à função de autocorrelação estipulada. A correlação na direção  $z$  é imposta pela aplicação do Filtro Linear a esse conjunto de seções.

Por fim, estabelecem-se os valores-limites para binarizar os dados, de modo a gerar uma realização estocástica homogênea e isotrópica com a mesma porosidade e autocorrelação médias das imagens do meio real.

### 3.2.6 – Estabelecimento da continuidade das fases e filtragem para suavização

Na realização estocástica resultante do procedimento descrito não há uma perfeita continuidade em cada uma das fases (poro e não-poro), restando grupos de *voxels* referentes ao substrato sólido totalmente circundados por *voxels* correspondentes a poros, e/ou vice-versa, independentemente do fato de existirem ou não poros isolados no meio real. Esses agrupamentos isolados são componentes não-percolantes, que contam para a porosidade total, mas não para a porosidade interconectada, não contribuindo, portanto, para o fluxo. O *VCLab* usa um algoritmo denominado *Cluster Multiple Labelling* (Hoshen e Kopelman, 1976) para a aglutinação dos *voxels* de cada fase, tornando-as totalmente contínuas.

Além disso, aplica-se ao modelo um filtro de suavização, que retira as rugosidades mais grosseiras na interface sólido/poro, de modo a facilitar a etapa posterior de caracterização dos elementos constituintes do espaço poroso (poros e gargantas).

Essa realização estocástica não deve ser encarada como a reprodução verdadeira do meio poroso original, embora as aparências das estruturas engendradas sejam visualmente bastante realistas. Por outro lado, o fato de se preservar a porosidade e a autocorrelação medidos resulta numa conectividade intrínseca entre os poros do meio reconstruído, diferenciando esse modelo das redes de percolação usuais, nas quais, conforme já ressaltado, a interconectividade é representada por um mesmo número de coordenação para toda a rede.

### 3.2.7 – Caracterização morfo-topológica do sistema poroso virtualmente reconstruído

As distribuições de tamanhos de poros e gargantas, bem como a do número de coordenação da estrutura porosa, não podem ser extraídas diretamente da observação das seções bidimensionais do meio estudado. Vem daí a necessidade de gerar estocasticamente uma realização tridimensional do meio. A obtenção das distribuições citadas requer a individualização dos poros e das gargantas que compõem o sistema poroso reconstruído.

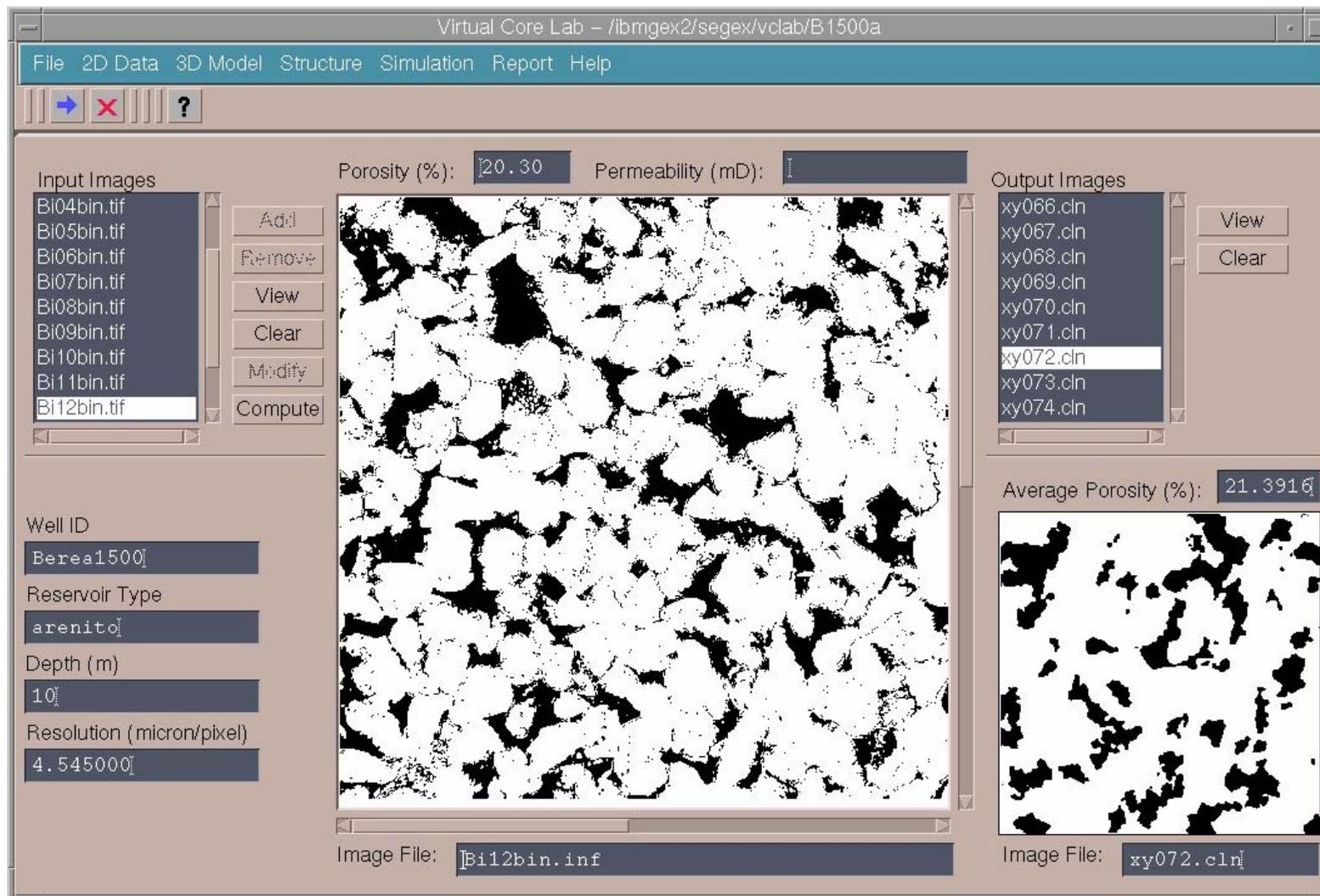


Figura 3.4: Interface gráfica do programa *VCLab*: à esquerda, a mesma imagem binarizada da Figura 3.3; à direita, menor, uma das 256 seções transversais do meio reconstruído

Os posicionamentos das gargantas são definidos como aqueles onde se verificam mínimos locais das áreas das seções transversais dos elementos constituintes da estrutura porosa. A determinação dessas posições é feita através de uma varredura do espaço poroso, na qual são comparados os valores das dimensões das interseções entre os canais do sistema poroso e planos seqüenciais orientados em nove direções distintas (Zhao *et al.*, 1994).

Os corpos de poros individuais são definidos como as regiões delimitadas pelo arcaibouço sólido e pelas gargantas. Do mesmo modo, fica determinado o número de coordenação de cada poro, ou seja, o número de gargantas a ele associado. A totalização dessas operações no volume do meio reconstruído gera as seguintes informações, a serem usadas na construção da rede adotada no presente trabalho, conforme descrita no Capítulo 4:

- freqüência acumulada, em número, dos volumes dos corpos de poros;
- freqüência acumulada, em número, das áreas das gargantas entre poros;
- freqüência dos números de coordenação dos poros.

### **3.3 – Avaliação alternativa das características morfo-topológicas do meio poroso**

Conforme relatado na Seção 3.1, as distribuições de “diâmetros” de gargantas resultantes da interpretação convencional de curvas de pressão capilar correspondentes ao processo de drenagem primária (a injeção de mercúrio em rochas sedimentares, por exemplo) são distorcidas em relação às distribuições reais. A rigor, o que se obtém com esse tipo de interpretação é a distribuição das parcelas do volume poroso correspondentes a poros acessíveis através de gargantas com aberturas de determinados tamanhos. Como a acessibilidade dos poros também é influenciada pelo tamanho das amostras, os resultados experimentais mais próximos à realidade são aqueles obtidos em amostras de menores dimensões, desde que ainda na faixa do Volume Elementar Representativo (REV, Bear, 1988) que, por sua vez, depende do grau de heterogeneidade associado ao meio poroso na escala da amostra ensaiada).

Mishra e Sharma (1988) propuseram uma correção desses efeitos, porém partindo da definição de uma “função de acessibilidade” do meio. Dada a impossibilidade de avaliar essa função diretamente no meio poroso real, a conectividade deste foi representada pelos autores por intermédio de uma trama (*lattice*) de Bethe. A trama de Bethe é uma estrutura infinitamente ramificada, sem nenhum circuito fechado, com um mesmo número de coordenação em todos os nós. Lapidus *et al.* (1985) usaram uma rede cúbica regular para determinar distribuições de tamanhos de gargantas e de poros a partir de resultados de porosimetria com injeção e ejeção de mercúrio. A restrição a esses trabalhos é que, conforme comentado anteriormente, a determinação do número de coordenação da rede somente em função da estrutura e dimensionalidade desta não é totalmente adequada à simulação de processos de percolação, sendo necessário seu estabelecimento com base na conectividade específica do sistema poroso representado.

Matthews *et al.* (1995) propuseram um modelo mais promissor, em que uma rede cúbica regular, com 10 X 10 X 10 nós, gerada estocasticamente, com uma dada interconectividade, é usada para simular as curvas de injeção de mercúrio em diversos meios porosos. Modificações são aplicadas às distribuições inicialmente arbitradas de diâmetros de gargantas e de tamanhos de poros, bem como ao número de coordenação médio da rede, até que os resultados da simulação sejam satisfatoriamente ajustados aos dados experimentais. Porém, a forma log-linear adotada por Matthews *et al.* para as distribuições de diâmetros de gargantas é arbitrária, além do que a interpretação chega a resultados distintos dependendo do critério de ajuste assumido.

O trabalho de Du (1996) tenta superar essas restrições aplicando expressões da teoria da percolação para, a partir da porosimetria de mercúrio, obter a distribuição de tamanhos de gargantas de poros (quanto à distribuição de tamanhos dos corpos dos poros, o autor conclui que esta não afeta os resultados obtidos, o que é questionável, pois o procedimento adotado para construir o modelo de rede usado pode estar mascarando efeitos existentes). Não é assumida qualquer forma *a priori* para a distribuição de tamanhos de gargantas e a conectividade do meio é levada em consideração, mas os métodos propostos para estimá-la restringem-se a fotomicrografias de seções delgadas ou de imagens de microscópio eletrônico de varredura, e dados de adsorção-desorção de gás no meio poroso (estes últimos, para materiais microporosos), o que torna mais dispendiosa a caracterização do meio e tem resultados bastante discutíveis.

Foram, também, relatadas dificuldades para chegar à distribuição de tamanhos na faixa das gargantas pequenas, no caso de valores altos do número de coordenação. Além disso, como o próprio autor reconhece, faltou a confrontação dos resultados do algoritmo proposto com dados experimentais.

As ressalvas feitas aos trabalhos citados resultam, em última instância, de que, conforme demonstraram Yu e Warldaw (1991), a partir de somente uma curva de drenagem primária podem ser geradas múltiplas interpretações da estrutura porosa, muito diferentes umas das outras. Segundo esses autores, a possibilidade de convergência para uma única interpretação requer o levantamento de uma série de curvas, incluindo a de drenagem primária, as de embebição a partir de, no mínimo duas saturações iniciais (sendo uma delas a saturação irreduzível do fluido molhante), duas curvas de drenagem secundária, além de curvas ascendentes e descendentes de ciclos internos de histerese (*scanning curves*). Ainda assim, seria necessário associar a esses dados informações suplementares provenientes da análise de imagens para a avaliação da frequência de tamanhos de poros, das formas típicas que estes apresentam e de seu grau de correlação espacial (com a consequente formação de *clusters* de poros grandes e de poros pequenos). Com a exigência de obter toda essa gama de informações, o custo dessa modelagem subiria muito, o que significaria a perda de uma de suas principais vantagens relativas aos ensaios laboratoriais para a medição direta dos efeitos do fluxo de partículas sobre o comportamento da permeabilidade do meio. Na revisão que publicaram em 1995, Celia *et al.* também identificaram basicamente essas mesmas lacunas nas modelagens já propostas.

De forma geral, as mesmas restrições feitas aos resultados de porosimetria por injeção de mercúrio (ver Seção 3.1) podem ser dirigidas também à obtenção das características de interesse através de métodos que envolvem o levantamento de isotermas de sorção (Wall e Brown, 1981; Mason, 1988, Zgrablich *et al.*, 1991). Métodos avançados, como o seccionamento serial (Koplik *et al.*, 1984; Kwiecien *et al.*, 1990) e a microtomografia computadorizada (Flannery *et al.*, 1987; Dunsmuir *et al.*, 1991; Spanne *et al.*, 1994; Paiva, 1995; Hazlett, 1997; Coles *et al.*, 1998) permitem uma descrição pormenorizada do espaço poroso, mas também são caras e não estão extensivamente disponíveis, além de, no caso da microtomografia, possuírem uma resolução espacial insatisfatória.

Na falta de qualquer outra metodologia bem estabelecida e amplamente aceita, a alternativa adotada neste trabalho foi o uso de alguns procedimentos que permitem uma melhor estimativa das distribuições de tamanhos de gargantas e de poros, além do número de coordenação médio do sistema poroso, sem requererem a aplicação de ferramentas caras e sofisticadas.

Fatt (1956a) propôs correções para as citadas distorções nas distribuições de tamanhos de gargantas de poros, geradas pela interpretação convencional das curvas de injeção de mercúrio (no referido artigo, os fundamentos dessas correções são objeto de uma discussão mais aprofundada, que não cabe aqui reproduzir). Tais propostas, enumeradas a seguir, foram adotadas no presente trabalho. Fatt concluiu que as distribuições, em número, dos diâmetros de gargantas, calculadas com base no modelo de feixe de capilares, têm uma dispersão aproximadamente duas vezes menor que a real. Além disso, sua média é ligeiramente menor que a real, numa proporção que depende não só da dispersão corrigida da distribuição, mas também da conectividade do meio. Para valores típicos desses parâmetros medidos em rochas-reservatório, a seqüência de operações abaixo relacionadas resulta numa distribuição de tamanhos de gargantas que pode ser utilizada na simulação que se pretende realizar:

- a- calcular a distribuição de tamanhos de gargantas de poros usando o modelo de feixe de capilares;
- b- caso a distribuição disponível seja em volume, transformá-la para distribuição em número (supondo que os dutos de seção circular que representam as gargantas têm comprimentos inversamente proporcionais a seus diâmetros);
- c- determinar a média e o desvio padrão dessa distribuição em número;
- d- multiplicar por 2 o desvio padrão e dividir por 0,85 a média da distribuição obtida conforme o item c.

Para estimar as distribuições de tamanhos de corpos de poros, partiu-se de um conjunto de observações provenientes de um grande número de resultados de caracterização do espaço poroso por intermédio da reconstrução estocástica virtual usando o *VCLab*, além de resultados da reconstrução, a partir do seccionamento serial, de meios porosos ideais com empacotamento

regular, de pacotes de esferas de vidro com empacotamento aleatório e de arenito Berea (Yanuka *et al.*, 1986). Foi assim observado que as razões entre o menor poro e a menor garganta valem em torno de 1,5 vezes as razões entre o maior poro e a maior garganta. Para os valores intermediários, é adotada uma interpolação linear para esse fator de multiplicação (entre 1 e 1,5). O produto dos tamanhos de gargantas por esse fator é usado como uma primeira estimativa dos tamanhos de poros para a estruturação da rede, conforme descrita na Seção 4.2, em cujo processo determina-se a distância  $c_t$  entre os centros dos nós da rede. Para pacotes aleatórios de esferas de igual diâmetro, a distância média entre os centros dos corpos de poros corresponde a, aproximadamente, 4/5 do raio das esferas (Bryant *et al.*, 1993). Analogamente, o quociente entre 4/5 do raio médio dos grãos e  $c_t$  é multiplicado pelos valores correspondentes à primeira estimativa dos tamanhos de poros, anteriormente determinada, chegando-se assim à distribuição de tamanhos de poros a ser usada nas simulações.

A estimativa do número de coordenação médio é feita por intermédio de uma correlação empírica proposta por Ridgway e Tarbuk (1967) para pacotes aleatórios de esferas, que Yanuka *et al.* (1986) demonstraram concordar bastante bem com os dados obtidos em meios porosos reconstruídos através de seccionamento serial (inclusive para o Arenito Berea, que não é um meio inconsolidado). Nessa correlação, o número de coordenação médio do sistema poroso,  $Z$ , é calculado a partir de sua porosidade,  $\phi$ , pela expressão

$$1 - \phi = 1,072 - 0,11937 Z + 0,00431 Z^2 \quad (3.7).$$

Sintetizando, este procedimento alternativo gera as mesmas informações obtidas com base na reconstrução estocástica virtual, listadas na Seção 3.2.7, quais sejam:

- a frequência acumulada, em número, dos tamanhos dos corpos de poros;
- a frequência acumulada, em número, dos tamanhos das gargantas entre poros;
- o número de coordenação médio dos poros.

Tais informações são usadas na construção, conforme descrita no Capítulo 4, da rede adotada nas simulações realizadas no presente trabalho.

## Capítulo 4

### O Modelo de Rede para o Escoamento de Fluidos Particulados em Meios Porosos

Este capítulo descreve o modelo de rede usado para simular o escoamento de fluidos particulados em meios porosos e seu efeito sobre a permeabilidade. Inicialmente, são apresentados os procedimentos adotados para a construção do modelo de rede. Em seguida, discutem-se os seguintes tópicos, que compõem a simulação do escoamento de fluidos particulados na rede:

- a determinação do campo inicial de pressões e o cálculo da permeabilidade absoluta original;
- a geração de partículas na face de injeção e sua movimentação no interior da rede;
- os critérios para a captura de partículas nos elementos da rede;
- os efeitos decorrentes da captura de partículas sobre o campo de pressões no sistema.

Cada um dos itens acima relacionados é apresentado de modo a fundamentar a escolha feita entre as alternativas existentes, confrontando-a com as adotadas em modelos similares anteriormente publicados.\*

---

\* Somente são incluídos na comparação os modelos anteriores cujos critérios de movimentação de partículas tenham sido definidos através da consideração de um viés baseado nas propriedades de transporte das ligações.

A não inclusão dos modelos com movimentação totalmente aleatória de partículas no interior da rede decorre do fato de estes serem adequados somente para a simulação de processos eminentemente difusivos, conforme comentado na Seção 2.3.2.

#### 4.1 – Pressupostos gerais

O simulador ora proposto considera que o escoamento de fluidos particulados no interior de meios porosos pode ser modelado como um escoamento incompressível de fluidos Newtonianos em regime laminar.

Assume-se que o escoamento seja eminentemente convectivo, o que implica que as partículas sejam suficientemente grandes para que os efeitos do movimento Browniano (de caráter difusivo) não sejam importantes. Outro pressuposto é que a concentração das partículas presentes seja suficientemente baixa, de tal forma que se possa desprezar os efeitos da interação entre as partículas em suspensão e, assim, tratar cada uma delas independentemente. Considera-se, também, que as partículas são homogêneas e indeformáveis, e que não floculam nem se fragmentam, ou seja, que a distribuição do tamanho de partículas mantém-se inalterada durante todo o processo.

O meio poroso é considerado homogêneo na escala supra-poro e indeformável frente à ação das tensões geradas pelo campo de fluxo. Além disso, presume-se que ele não contenha, originalmente, finos mobilizáveis, e ainda que estes não possam ser gerados no interior do próprio meio, por interação com o fluido, durante o processo.

Por fim, ressalte-se que a simulação aqui tratada restringe-se ao interior do meio poroso, não sendo incorporados os efeitos da formação de reboco externo ao meio na face de injeção.

#### 4.2 – Construção do modelo de rede

O modelo de rede, usado para simular o comportamento do fluxo no meio poroso real, é constituído por uma malha cúbica regular, na qual os poros são representados pelos nós, cada um dos quais é conectável a, no máximo, seis nós vizinhos, através das seis ligações (gargantas) que lhes correspondem.

Como observado por Imdakm e Sahimi (1991), poder-se-ia usar uma rede irregular, do tipo Voronoi, cuja geometria melhor se aproximasse da observável em um meio poroso natural. Isso, porém, não é necessário: há estudos demonstrando que, para fins práticos, os processos de transporte e as propriedades efetivas obtidas em redes regulares equivalem às de redes irregulares, desde que a dimensionalidade e o número de coordenação médio sejam idênticos nos dois casos (Jerauld *et al.*, 1984 a, b; Constantinides e Payatakes, 1989). A adoção de malhas regulares dá origem a sistemas de equações cujas matrizes de coeficientes são matrizes de banda, mais eficientemente invertíveis e que exigem menor espaço de memória computacional para seu armazenamento. Assim sendo, preferiu-se trabalhar com uma malha regular.

O modelo ora apresentado trabalha com o número de coordenação médio do meio poroso, o que o diferencia dos simuladores análogos anteriormente publicados (Rege e Fogler, 1988; Imdakm e Sahimi, 1991; Burganos *et al.*, 1995), que fixaram o número de coordenação como o máximo da rede adotada (ver Tabela 4.1). Conforme observado no Capítulo 2 (Seções 2.3.5 e 2.3.6), isso pode ter um efeito substancial nos resultados obtidos, dado que o processo simulado é fortemente influenciado pelas propriedades de percolação da rede que, por sua vez, são determinadas pelo número de coordenação e pela dimensionalidade do modelo.

Tabela 4.1: Comparação entre os números de coordenação do modelo atual e os dos anteriormente publicados

Modelo	Dimensionalidade	Tipo de rede	Z (nº de coordenação)
Rege e Fogler (1988)	2D	Regular triangular	fixo, $Z = 6$
Imdakm e Sahimi (1991)	3D	Cúbica regular	fixo, $Z = 6$
Burganos <i>et al.</i> (1995)	3D	Cúbica regular	fixo, $Z = 6$
Gohr Pinheiro (1996)	2D	Quadrada	fixo, $Z = 4$
Este modelo	3D	Cúbica regular	variável, $Z = Z_{medido}$

O modelo de rede é gerado em duas etapas distintas: a primeira refere-se às características estruturais do modelo, definindo o tamanho da rede (número de nós, transversalmente e longitudinalmente à direção macroscópica de fluxo) e as parcelas ativa e inativa dos elementos da rede (por conseguinte, sua interconectividade – em outras palavras, sua topologia); a segunda diz respeito à atribuição de forma geométrica e de tamanhos aos poros (nós) e gargantas (ligações) que compõem a rede (em outras palavras, sua morfologia). Ambas as etapas, a seguir expostas com maior detalhe, são executadas segundo os procedimentos prescritos por Ioannidis e Chatzis (1993) e por Ioannidis *et al.* (1997), cuja diretriz básica é a incorporação das características microscópicas da estrutura porosa necessárias e suficientes à simulação consistente e eficiente de diversas propriedades macroscópicas, entre as quais a permeabilidade absoluta, que é a mais relevante para o presente trabalho.

#### 4.2.1 – Geração dos elementos estruturais da rede (padrões topológicos)

O primeiro passo a ser dado na geração do modelo de rede é a definição do seu tamanho e dos seus elementos ativos e inativos. O tamanho da rede (número de nós em cada direção) está associado a um compromisso entre, por um lado, a representatividade do modelo e, por outro, o tempo de processamento e a memória computacional disponível. A rigor, somente poderia ser considerada plenamente representativa uma rede cujos comprimentos em cada direção fossem os mesmos da amostra usada durante os ensaios laboratoriais para a obtenção dos parâmetros de ajuste (tema que será discutido mais adiante). Esse tamanho, no entanto, é geralmente impraticável, pois exigiria uma enorme quantidade de memória residente e de tempo de processamento para a resolução de gigantescos sistemas de equações. Diante disso, optou-se por realizar as simulações em redes de, no máximo,  $30 \times 30 \times 30$  nós, que é o tamanho de rede adotado no programa *VCLab* e é maior que o tamanho dos modelos análogos anteriormente publicados.

Para a obtenção de uma rede com as características topológicas especificadas, aplicam-se conceitos baseados na Teoria da Percolação, particularmente em processos de percolação em sítios correlacionados por ligações (Chatzis e Dullien, 1982; Diaz *et al.*, 1987).

De acordo com os princípios atinentes a esses processos, os nós da rede, todos considerados originalmente fechados, são rotulados, aleatoriamente, com índices de 1 até o número de classes de nós,  $N_c$ , arbitrado. Em seguida, a partir do índice 1, incrementa-se passo a passo o índice de referência e determinados nós da rede vão sendo abertos, obedecendo ao seguinte critério: consideram-se abertos os nós com rótulo inferior ou igual ao índice de referência e que estejam conectados à face de entrada da rede. As ligações entre dois nós vizinhos são abertas a partir de quando ambos os nós são abertos. Assim, os nós com rótulos inferiores ao índice de referência, mas pertencentes a agrupamentos circundados por nós e ligações ainda fechados, também são considerados fechados, dado que não atendem ao critério da conexão com a face de injeção da rede. Para compatibilizar as características estruturais da rede com o estabelecimento de condições de contorno laterais periódicas, os nós das faces laterais opostas são rotulados identicamente (ou seja, cada par de faces laterais opostas contém nós com os mesmos rótulos) e, quando um nó de uma face lateral da rede é aberto, considera-se simultaneamente aberto o nó que lhe corresponde na face oposta.

A partir do ponto em que o limite de percolação é atingido (isto é, quando pelo menos um nó da face de saída da rede é aberto, formando um caminho contínuo de nós e ligações abertos entre as faces de injeção e de saída), passa-se a calcular o número de coordenação médio dos nós abertos (ou seja, a razão entre o número total de ligações abertas e o número total de nós abertos). O processo de incremento do índice de referência e de abertura de nós e ligações prossegue até o número de coordenação da rede coincidir com o número de coordenação médio do meio poroso, determinado segundo os procedimentos descritos no Capítulo 3.

Os procedimentos acima descritos, adotados para a geração dos elementos estruturais (topologia) da rede, desde a definição do número de nós em cada direção até a ativação de seus nós e ligações, de modo a atingir o número de coordenação desejado, estão representados esquematicamente no fluxograma da Figura 4.1.

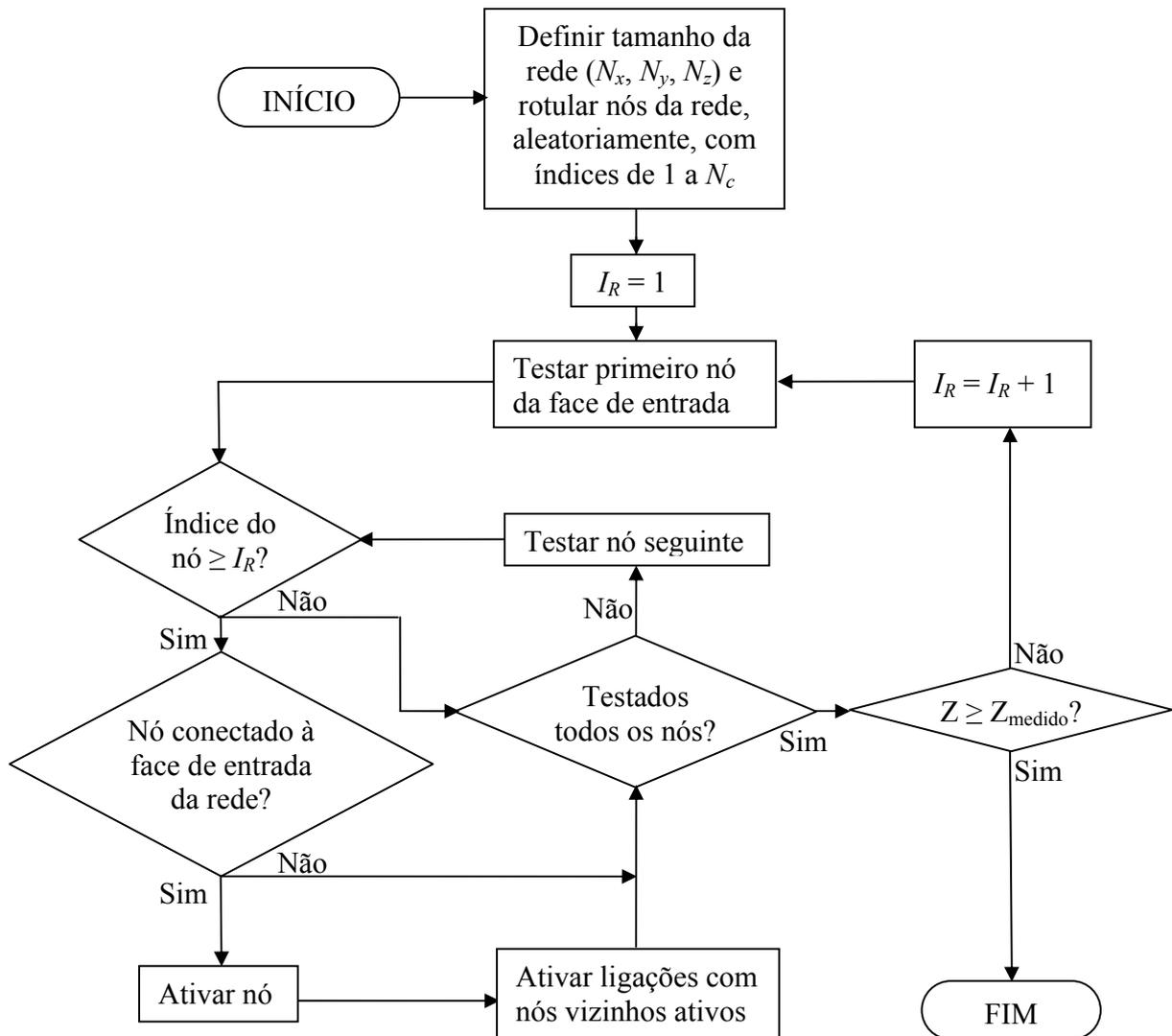


Figura 4.1: Fluxograma representando a geração dos elementos estruturais da rede

#### 4.2.2 – Atribuição da forma geométrica e das dimensões características aos elementos da rede (padrões morfológicos)

Os nós ativos da rede, que fazem o papel dos corpos dos poros, são representados geometricamente por cubos, enquanto as ligações ativas, que assumem o lugar das gargantas entre poros, são representadas por prismas com seção transversal retangular (Figura 4.2).

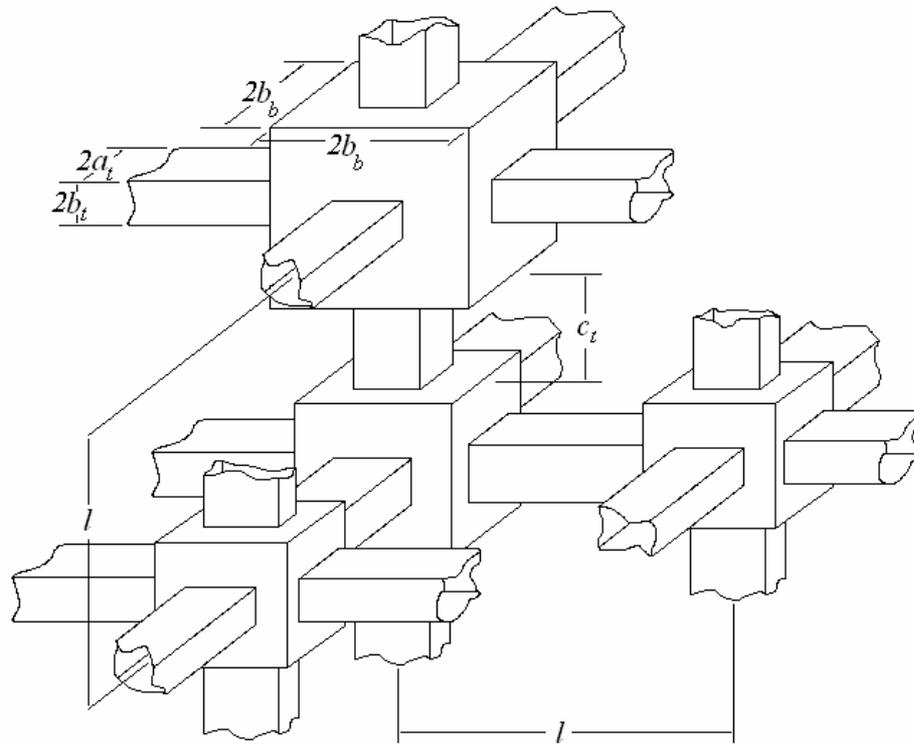


Figura 4.2: Esquema do modelo de rede de poros, representando os nós (poros) como sendo cubos e as ligações (gargantas) como prismas retangulares

A forma geométrica cúbica dos nós foi arbitrada por conveniência, já que não exerce qualquer influência na modelagem, bastando que a distribuição dos volumes de poros avaliada no meio seja reproduzida na rede. Por outro lado, é fundamental que o modelo represente adequadamente a geometria das gargantas existentes nos meios porosos reais, pois esta tem forte influência na captura de partículas em decorrência da exclusão pelo tamanho (retenção de partículas maiores que a abertura da garganta). Nos modelos de rede anteriormente publicados, as seções transversais das ligações eram circulares\* e, portanto, toda partícula capturada por exclusão pelo tamanho fechava total e definitivamente a correspondente ligação. Porém,

---

\* A única exceção, com relação a esse aspecto, é a tese de Gohr Pinheiro (1996), em que, tanto no meio real (um micromodelo 2D) quanto na rede, as ligações possuíam seção transversal retangular. No entanto, nesse caso a forma das ligações tinha uma influência menos pronunciada sobre o processo, já que todas as partículas eram muito menores que as aberturas das ligações, não ocorrendo, portanto, exclusão pelo tamanho.

examinando-se moldes de poros de rochas siliciclásticas, observa-se que as gargantas apresentam-se sob a forma de fendas, com maiores ou menores extensões laterais (Wardlaw e Cassan, 1979). Neste trabalho, foram adotadas ligações com seções transversais retangulares, julgadas mais representativas da geometria real das gargantas. Assim, no que se refere ao mecanismo de exclusão pelo tamanho, o fechamento de uma ligação por uma só partícula aconteceria apenas quando esta fosse maior que ambos os lados do retângulo. Nos outros casos, o fechamento total da ligação por esse mecanismo dependeria da captura de mais de uma partícula.

As dimensões características dos nós e ligações abertos da rede são atribuídas de modo a reproduzir, respectivamente, as distribuições de tamanhos de poros e de gargantas do meio real, determinadas segundo um dos métodos descritos no Capítulo 3.

A dimensão característica de um nó,  $b_p$ , corresponde à metade do comprimento da aresta do cubo que representa o corpo do poro. Caso a rede seja gerada com os dados da análise de imagens, usando os resultados do *VCLab*, a distribuição da dimensão característica dos nós é obtida pelo processo delineado na Seção 3.2, a partir da distribuição do volume dos poros,  $V_b$ , medida no meio reconstruído, aplicando-se a expressão

$$b_p = \frac{1}{2} V_b^{1/3} \quad (4.1).$$

Por sua vez, a dimensão característica da abertura de uma ligação,  $b_t$ , corresponde à metade do lado menor do retângulo da seção transversal da garganta entre poros. Quando a rede é gerada com os dados da análise de imagens, usando os resultados do *VCLab*, a distribuição da dimensão característica das ligações é obtida pelo processo delineado na Seção 3.2, a partir da distribuição da área das gargantas,  $A_t$ , medida no meio reconstruído. Nesse caso, aplica-se a expressão

$$b_t = \frac{1}{2} \left( \frac{A_t}{\psi} \right)^{1/2} \quad (4.2),$$

sendo  $\psi$  a razão de aspecto (relação entre o lado maior e o lado menor do retângulo). Como simplificação, assume-se que todas as ligações da rede têm a mesma razão de aspecto,  $\psi$ .

A obtenção alternativa das distribuições das dimensões características dos nós e das ligações, a partir dos dados de porosimetria de mercúrio, foi detalhada na Seção 3.3.

As dimensões características são atribuídas aos elementos ativos da rede segundo o esquema da percolação em sítios correlacionados por ligações. As aberturas das ligações ativas da rede não são distribuídas aleatoriamente, mas são correlacionadas aos tamanhos dos pares de nós que elas ligam, estabelecendo-se um viés através do qual os poros maiores tendem a ser unidos pelas ligações mais abertas. Por sua vez, a atribuição dos tamanhos dos nós também é submetida a um viés, de modo que os maiores poros são localizados com maior probabilidade naqueles nós onde o número de coordenação é mais alto. Segundo Ioannidis e Chatzis (1993), esses procedimentos baseiam-se em observações da estrutura porosa de rochas-reservatório, que mostram haver uma tendência de que os poros maiores tenham mais conexões com poros vizinhos, e de que as aberturas das conexões sejam maiores quando os poros ligados são grandes e menores quando estes são pequenos.

De acordo com a definição das gargantas como entidades geométricas sem volume, os nós concentram todo o volume poroso da rede,  $VP$ . A distância entre os centros dos nós,  $l$ , constante em toda a malha (como já mencionado, trata-se de uma rede regular), é ajustada de modo que a porosidade da rede seja igual à do meio poroso real que se está modelando. Considera-se um comprimento único para todas as ligações,  $c_l$ , calculado como a diferença entre  $l$  e o dobro da dimensão característica média dos nós da rede.

A seqüência delineada para a geração dos padrões morfológicos da rede é esquematizada no fluxograma da Figura 4.3.

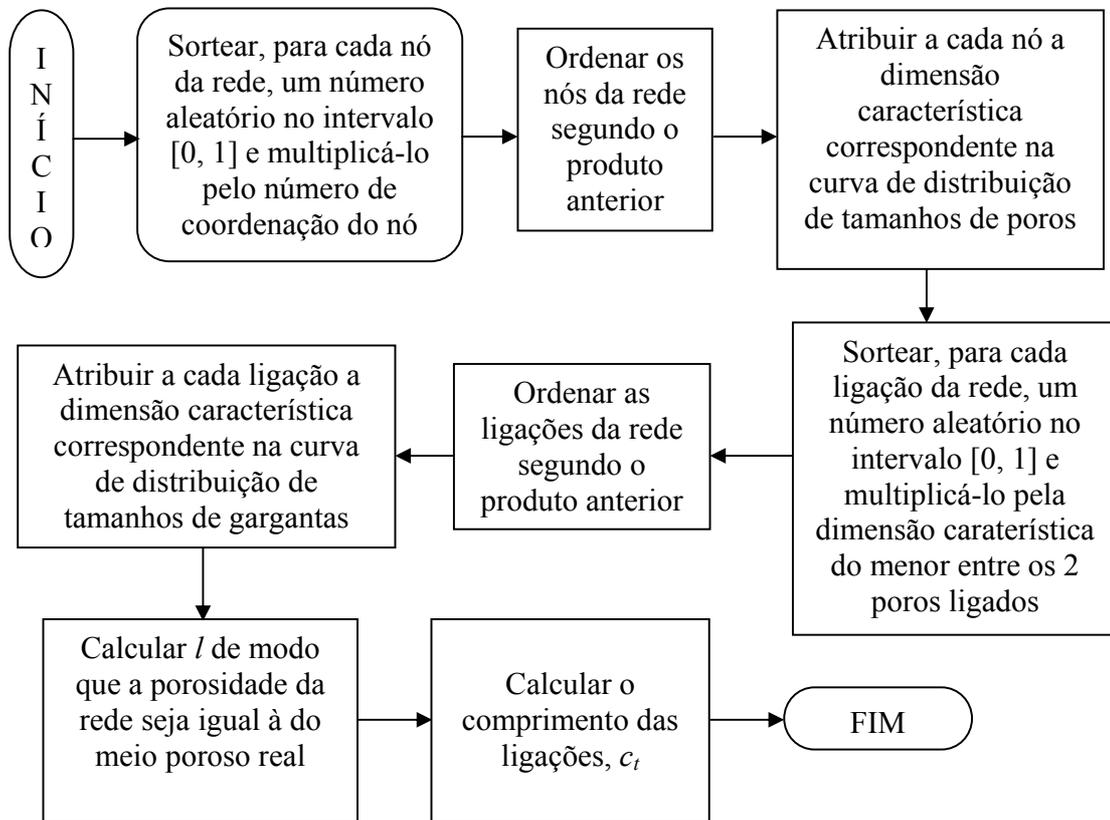


Figura 4.3: Fluxograma representando a geração dos padrões morfológicos da rede

### 4.3 – Simulação do escoamento de fluidos particulados na rede

#### 4.3.1 – Determinação do campo inicial de fluxo e cálculo da permeabilidade original da rede

Para calcular a permeabilidade total da rede, é necessário computar a condutância hidráulica (equivalente à razão vazão/diferença de pressão) dos seus elementos e aplicar em todos os nós o correspondente balanço de massa. Dadas as dimensões dos poros comparadas às das gargantas, desconsidera-se a condutância hidráulica dos nós.

A condutância hidráulica,  $g_{ij}$ , da ligação entre um nó ativo,  $i$ , e seu vizinho,  $j$ , é calculada por intermédio da equação de Poiseuille para o escoamento laminar de um fluido Newtoniano

com viscosidade  $\mu$ , em um duto com seção transversal retangular, sendo  $2b_t$  o comprimento do lado menor e  $\psi$  a razão de aspecto (Duncan *et al.*, 1972):

$$g_{ij} = \frac{4 \psi b_t^4}{3 \mu c_t} \left\{ 1 - \frac{192}{\psi \pi^5} \sum_{i=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{\tanh[(i\pi/2)\psi]}{i^5} \right\} \quad (4.3).$$

A equação de Poiseuille é aplicável às ligações da rede, pois as dimensões dessas ligações são muito maiores que a escala característica de comprimento associada ao fluido, acima da qual o fluido pode ser tratado como um meio contínuo. Segundo Fiete (1997), para fluidos Newtonianos tal escala de comprimento é da ordem de poucos Å.

Aplica-se a cada nó da rede o princípio da conservação da massa, segundo o qual é nula a soma algébrica das vazões de todas as ligações entre um nó  $i$  e todos os nós  $j$  a ele conectados:

$$\sum_j g_{ij} \Delta P_{ij} = 0 \quad (4.4),$$

sendo  $\Delta P_{ij}$  a diferença entre a pressão do nó  $i$  e a do nó  $j$ . Constrói-se, assim, um sistema de equações lineares, tendo como incógnitas as pressões nos respectivos nós. Os nós ativos da face de entrada estão conectados a uma fonte cuja pressão é  $P_{inj}$ , enquanto os nós ativos da face de saída estão conectados a um sumidouro cuja pressão é  $P_{sai}$ . Por simplicidade, dado que o escoamento é incompressível,  $P_{sai}$  é igualada a zero. Condições de contorno periódicas são impostas às faces externas da rede paralelas à direção macroscópica de fluxo. Para aumentar a eficiência computacional da resolução do sistema linear resultante, foram escritas equações (embora redundantes) também para os nós inativos (fechados), de modo a obter uma matriz dos coeficientes de banda e simétrica, com seis diagonais superiores não nulas e outras tantas inferiores, além da diagonal principal. Isso também permite o armazenamento de toda a matriz de coeficientes em apenas sete vetores, o que significa uma substancial economia de memória.

O sistema de equações é resolvido implicitamente, aplicando o método dos gradientes conjugados, com pré-condicionamento da matriz dos coeficientes. Esse método mostra-se eficiente na solução de grandes sistemas dispersos de equações lineares, com matrizes dos coeficientes positivas definidas (Cunha, 1993).

Uma vez estabelecidas as pressões em cada nó do modelo, calcula-se a vazão volumétrica macroscópica na rede,  $W$ , somando as vazões em todas as ligações partindo da face de injeção (ou da face de saída) para os nós internos adjacentes. A permeabilidade absoluta do modelo é calculada pela simples aplicação da Lei de Darcy à rede de poros:

$$k = \frac{W \mu (N_x - 1)}{N_y N_z l (P_{inj} - P_{sai})} \quad (4.5),$$

onde  $N_x$ ,  $N_y$  e  $N_z$  são, respectivamente os números de nós na direção paralela ( $x$ ) e nas direções transversais ( $y$  e  $z$ ) ao fluxo macroscópico.

Observe-se que, a cada valor da razão de aspecto das ligações ( $\psi > 1$ ) aplicado na Equação 4.3, corresponde um valor diferente da permeabilidade original do modelo. Adota-se o mesmo valor de  $\psi$  para todas as ligações da rede, podendo este ser um valor típico (no VCLab, por exemplo,  $\psi = 6$ ), ou o valor que torna a permeabilidade original do modelo igual à do meio real.

#### 4.3.2 – Geração das partículas na face de injeção

Assume-se que as partículas têm formato esférico. Seus diâmetros efetivos são gerados aleatoriamente, de tal maneira que reproduzem a distribuição experimental de diâmetros de partículas. Ressalte-se que essa distribuição, tanto quanto as de tamanhos de poros e gargantas, é considerada como característica intrínseca de cada sistema, não sendo elas tratadas, portanto, como variáveis ajustáveis que visem reproduzir os dados experimentais.

Uma quantidade fixa de partículas é gerada a cada passo de tempo. Após o fechamento de certo número de ligações ou a deposição de uma determinada quantidade de partículas, os coeficientes do sistema de equações são atualizados, incorporando os efeitos das partículas capturadas, e a permeabilidade da rede é novamente determinada. Recalculam-se seguidamente os passos de tempo, de modo a compatibilizá-los com o número de partículas geradas, a concentração da suspensão e a condição estabelecida para a injeção simulada (pressão ou vazão constante). O número de partículas a serem geradas por passo de tempo, bem como o número de ligações fechadas e o de partículas capturadas, após os quais o campo de fluxo deve ser

recalculado, dependem das características específicas do sistema simulado e são definíveis no início de cada execução do programa. Desde que adotados valores razoáveis para essas variáveis, pode-se assumir que eventuais modificações no campo de pressão do modelo durante o passo de tempo assim definido são suficientemente pequenas para que a simulação da movimentação e da captura de partículas durante seu transcurso não sofra distorções sensíveis. Observe-se que o procedimento descrito permite um refinamento da discretização no tempo tal que, em termos práticos, os eventos que ocorrem durante qualquer passo de tempo podem ser considerados como simultâneos. Desse modo, a simulação é feita tratando o processo transiente como uma sucessão de estados estacionários.

Em cada ligação que une os nós da face de injeção com os do interior da rede ocorre uma vazão diferente. Essa vazão é usada como viés na escolha da ligação por onde cada partícula é introduzida na rede: quanto maior a vazão numa ligação, maior a probabilidade de sua escolha. Tal procedimento, proposto por Rege e Fogler (1987), preserva o caráter estocástico da posição de ingresso das partículas na rede, além de garantir, durante toda a simulação, a uniformidade da concentração local de partículas na suspensão injetada. Critérios diferentes do aqui adotado foram usados no modelo de Burganos *et al.* e no de Imdakm e Sahimi, e são discutidos a seguir.

No modelo de Imdakm e Sahimi (1991), o nó de entrada é escolhido de modo aleatório, sem o viés pela vazão, acima citado. Na prática, esse critério implica que a vazão não determina o número de partículas injetado através de cada ligação, mas sim a concentração de partículas na sua entrada, sendo essa concentração tanto menor quanto maior for a vazão na ligação. Isso não tem qualquer fundamento, teórico ou empírico.

No lugar do viés pela vazão, o modelo de Burganos *et al.* (1995) submete a probabilidade de escolha de uma ligação ao viés pela taxa de transporte de partículas, sendo esta definida por

$$N_i = c_0 \int_0^{R_i - r_p} 2\pi(v_x + u_\infty)r dr \quad (4.6),$$

onde  $c_0$  é a concentração de entrada (comum a todas as ligações da face de injeção);  $R_i$  é o raio da boca da  $i$ -ésima ligação da face de entrada (no modelo referido, conforme citado na Seção 2.3.7,

as ligações têm formato sinusoidal, longitudinalmente, com seções transversais circulares mais largas nas extremidades e mais estreitas no centro);  $r_p$  é o raio da partícula;  $v_x(r)$  é a componente da velocidade na direção média de fluxo na boca da ligação e  $u_\infty$  é a velocidade-limite da partícula por ação puramente gravitacional. Essa velocidade-limite é dada por

$$u_\infty = \frac{2(\rho_p - \rho)r_p^2 g}{9\mu} \quad (4.7),$$

onde  $\rho_p$  é a densidade da partícula,  $\rho$  é a densidade do líquido suporte e  $g$  é a aceleração da gravidade.

Na determinação da probabilidade de escolha de cada ligação para o ingresso de partículas na rede, o uso da Equação 4.6 para calcular a taxa de transporte de partículas é incorreto, pois resultaria que partículas maiores que uma ligação nunca pudessem a obstruí-la (já que, como o limite superior de integração naquela equação subtrai o raio da partícula do raio da boca da ligação, esta sequer teria possibilidade de ser escolhida para a entrada da partícula). No modelo de Burganos *et al.*, cujas partículas, por hipótese, são muito menores que as constrições dos elementos da rede, esse equívoco tem efeito pouco pronunciado. Em situações mais genéricas, nas quais podem estar presentes partículas da mesma ordem de grandeza das aberturas das gargantas, o correto é definir o limite superior de integração na Equação 4.6 como o raio total da boca da ligação, sem descontar o raio da partícula. No caso da face de injeção, onde todas as ligações que conectam seus nós aos nós internos da rede têm a mesma direção (a direção macroscópica de fluxo), a inclusão do termo gravitacional na Equação 4.6 é indiferente. Desconsiderando, portanto, os efeitos gravitacionais, a integral daí resultante nada mais é que a vazão na ligação, ou seja, o critério que ora está sendo adotado.

#### 4.3.3 – Movimentação das partículas

Assume-se que a velocidade de movimentação das partículas numa ligação é igual à velocidade média do fluido nessa ligação, desconsiderando as distorções nas linhas de fluxo causadas pela presença das partículas (Ramachandran *et al.*, 1998). Para corpos esféricos movendo-se em canais cilíndricos, Leichtberg *et al.* (1976) mostraram que a diferença entre a

velocidade da partícula e a velocidade média do fluido é desprezível, mesmo para razões de diâmetros esfera/duto da ordem de 0,95.

Durante um passo de tempo, considera-se a movimentação simultânea e independente de todas as partículas no interior da rede, cada uma das quais viaja uma distância diferente, que é função das velocidades nas ligações por onde ela se move. Por isso, a posição de cada uma das partículas é continuamente monitorada durante todo o processo.

Quando uma partícula percorre todo o comprimento de uma ligação sem ser capturada e chega ao nó seguinte, a ligação por onde ela vai continuar seu caminho é escolhida estocasticamente, de acordo com um viés ditado pela taxa de transporte de partículas. Essa taxa de transporte é calculada pela soma algébrica de dois termos:

- a - o produto da área transversal da ligação pela componente de  $u_{\infty}$  na direção da ligação, sendo  $u_{\infty}$  a velocidade-limite de sedimentação gravitacional da partícula imersa no fluido suporte (determinada pela Equação 4.7);
- b - a vazão total na ligação (sem descontar a vazão na camada de espessura  $r_p$ , como era feito na Equação 4.6).

Segundo Burganos *et al.* (1995), quando a diferença de densidades entre as partículas e o fluido é grande, o termo gravitacional pode ter efeitos substanciais sobre a probabilidade de escolha das ligações, principalmente para fluxo macroscópico horizontal e a baixas velocidades. Como  $u_{\infty}$  tem direção vertical, somente as ligações verticais serão afetadas por esse termo. Quando a ligação conduzir a um nó de uma camada inferior na rede, o termo gravitacional tem o mesmo sinal da diferença entre a densidade das partículas e a do fluido. Já quando a ligação for com um nó da camada superior, o sinal será oposto ao da diferença de densidades.

Deve-se observar que, coerentemente com as condições de contorno laterais periódicas estabelecidas na construção da rede, cada vez que uma partícula "sai" da rede por uma face lateral, essa mesma partícula "reentra" na rede pelo nó correspondente na face lateral oposta, a partir de onde ela prossegue sua movimentação.

#### 4.3.4 – Critérios para a captura de partículas nos elementos da rede

Na simulação, consideram-se os seguintes mecanismos para a captura de partículas nos elementos da rede: adesão à superfície sólida das ligações por interação de natureza elétrica e/ou molecular; exclusão pelo tamanho, quando a partícula é maior que a abertura da garganta entre poros; sedimentação ou assentamento gravitacional, em virtude da diferença entre a densidade das partículas e a do fluido.

A modelagem da exclusão pelo tamanho é a mais simples: escolhida a ligação por onde a partícula prosseguirá seu percurso, a partir do nó onde ela está localizada (inclusive os da face de injeção), compara-se a abertura da ligação escolhida (ou seja, o lado menor da seção transversal retangular) com o diâmetro da partícula. Se o diâmetro da partícula for menor que a abertura da ligação, a partícula entra; caso contrário, a partícula é fixada na entrada da ligação.

A complexidade aumenta quando se trata da determinação das probabilidades de captura por sedimentação da partícula ou por deposição devida à interação entre a partícula e a superfície interna das ligações. Imdakm e Sahimi (1991) calculam a trajetória de cada partícula no plano vertical axial das ligações, na parede interna das quais introduzem saliências transversais, que podem ou não aprisionar a partícula, a depender do equilíbrio de forças e torques que agem sobre ela. Burganos *et al.* (1995) realizam a análise das trajetórias 3D das partículas nas ligações sinusoidais e consideram a partícula capturada quando a trajetória toca a parede da ligação. Ambos os modelos estão descritos com maiores detalhes no Capítulo 2.

As duas abordagens citadas têm o mérito principal de incorporar os mais importantes fatores que influenciam a deposição das partículas. Tornam possível, por exemplo, considerar a alteração das características das superfícies do meio, devida às partículas depositadas no decorrer do processo, que podem ocasionar uma mudança progressiva da eficiência de filtração dos coletores durante o escoamento do fluido particulado. Por outro lado, aplicam todo esse detalhamento da análise em redes cujas características morfo-topológicas são pouco representativas do meio real. Além disso, naqueles modelos a determinação das trajetórias e do balanço de forças e torques referentes a cada partícula aumenta ainda mais fortemente a demanda

computacional, num processo em que esta já é intensa, por envolver sucessivas soluções de grandes sistemas de equações lineares, o acompanhamento da movimentação e a contabilização do número de partículas capturadas em cada mecanismo, além do cálculo e atualização dos efeitos da captura sobre as condutâncias hidráulicas dos elementos da rede. Burganos *et al.* são forçados a reconhecer o peso desse fator, limitando suas simulações a soluções monodispersas (com um só tamanho de partículas) e a redes com somente dois tamanhos de ligações (distribuição discreta bimodal).

No presente trabalho, optou-se por uma adaptação da abordagem de Rege e Fogler (1988), baseada no conceito de trajetória limite de captura, proposto por Tien e Payatakes (1979). Os cálculos envolvidos são bastante simplificados, com a introdução de parâmetros ( $\theta$  e  $v_{cr}$ ) obtidos por intermédio de ajuste a dados experimentais. A exigência desse ajuste não prejudica as aplicações práticas do modelo, já que usualmente as simulações são acompanhadas de ensaios laboratoriais. Além disso, a partir da determinação de certas características das partículas, do fluido e do meio poroso, é possível que se chegue a elaborar correlações empíricas utilizáveis na estimativa, *a priori*, dos parâmetros de ajuste do modelo (a tentativa de estabelecimento dessas correlações não faz parte do escopo definido para o presente trabalho). Uma descrição geral básica dessa abordagem, bem como a definição dos parâmetros de ajuste  $\theta$  e  $v_{cr}$ , encontram-se na Seção 2.3.5. Para a relação entre  $\theta$  e a velocidade de fluxo em cada ligação, foi adotada a Equação 2.5a.

Quatro características importantes, detalhadas nas seções subseqüentes, foram modificadas em relação aos critérios que Rege e Fogler propuseram originalmente para a captura das partículas por deposição:

- a - além dos aspectos hidrodinâmicos considerados no modelo de Rege e Fogler, os efeitos gravitacionais foram adequadamente incorporados aos cálculos de probabilidade de captura por deposição nas ligações da rede (Seção 4.3.5);
- b - na Seção 4.3.6, é apresentada a expressão deduzida para calcular a probabilidade de captura por deposição na geometria retangular da seção transversal das ligações da rede (no trabalho de Rege e Fogler, as ligações eram cilíndricas);

- c - aplicou-se uma correção à superfície específica da rede para compatibilizá-la à superfície específica do meio poroso, o que pode tornar-se importante na simulação da deposição de gotículas líquidas nas ligações da rede, quando do escoamento de emulsões (Seção 4.3.7);
- d - foi considerada a possibilidade de captura de partículas por deposição dentro dos nós da rede, e não somente nas suas ligações (Seção 4.3.8).

#### 4.3.5 – A componente gravitacional na probabilidade de captura nas ligações

A incorporação da componente gravitacional nos critérios de movimentação e de captura de partículas permite a diferenciação entre processos de injeção em que a direção macroscópica de fluxo é vertical para cima, vertical para baixo ou horizontal, o que é verificado em sistemas reais (Burganos *et al.*, 1995). Se considerada independentemente das outras forças agindo sobre as partículas, a componente gravitacional, devida à diferença de densidades entre as partículas e o fluido suporte, causa o desvio vertical das trajetórias das partículas nas ligações horizontais: se as partículas são mais densas que o fluido, suas trajetórias tendem a ser descendentes; caso contrário, para partículas menos densas que o fluido, verificam-se trajetórias ascendentes.

O critério de deposição de partículas adotado por Rege e Fogler não levava em conta a componente gravitacional na probabilidade de captura, estabelecendo uma coroa circular como o lugar geométrico das posições-limite de ingresso de uma partícula em cada ligação. A probabilidade de captura era, portanto, calculada considerando haver simetria dessas posições-limite em relação ao centro da entrada das ligações, mesmo no caso de ligações horizontais.

Os trabalhos de Paraskeva *et al.* (1991) e de Burganos *et al.* (1992, 1993, 1995) incorporaram a componente gravitacional à análise de trajetórias em ligações longitudinalmente sinusoidais com seção transversal circular. Esses autores demonstraram que, nas ligações não-verticais, as posições-limite são tão menos simétricas em relação ao centro da entrada da ligação, quanto menor a inclinação do eixo da ligação com relação à horizontal. Isso pode ter considerável efeito sobre a captura de partículas por deposição nos elementos da rede, especialmente para grandes diferenças de densidade e/ou para fluxo com direção macroscópica horizontal.

Adaptando os critérios de Rege e Fogler à forma retangular das seções transversais das ligações e incorporando os resultados de Burganos *et al.* quanto à componente gravitacional, propõe-se a seguinte expressão para a probabilidade de captura de partículas nas ligações:

$$PC = 1 - \frac{4 \int_{a=0}^{\psi b_i - \theta r_p} \int_{b=0}^{b_i - \theta r_p} (v_x + u_\infty \cos \varphi) db da}{4 \int_{a=0}^{\psi b_i - r_p} \int_{b=0}^{b_i - r_p} (v_x + u_\infty \cos \varphi) db da} \quad (4.8),$$

onde  $\varphi$  é o ângulo que o eixo da ligação faz com o plano horizontal e  $a$  e  $b$  são as coordenadas de cada ponto do domínio de integração, respectivamente na direção do lado maior e do menor da seção retangular, tomando-se como origem do par de coordenadas o ponto central do retângulo.

Observe-se que, conforme expresso na Equação 4.8, a influência da componente gravitacional sobre a probabilidade de captura só é considerada para as ligações horizontais, já que nas verticais ela tem a mesma direção do escoamento, não contribuindo para desviar a partícula no sentido da parede da ligação.

Por outro lado, o efeito gravitacional sobre a velocidade da partícula na direção longitudinal das ligações verticais pode influenciar o cálculo do parâmetro  $\theta$ , por meio da Equação 2.5a. O valor da velocidade da partícula a ser usado nessa equação é o da velocidade média do fluido na ligação vertical, somado ou subtraído (caso a aceleração da gravidade tenha o mesmo sentido ou o sentido contrário ao da movimentação do fluido na ligação, respectivamente) à velocidade-limite de sedimentação gravitacional da partícula, calculada pela Equação 4.7.

#### 4.3.6 – A probabilidade de captura em ligações com seção transversal retangular

A Equação 4.8 pode ser simplificada reescrita como:

$$PC = 1 - \frac{(Q + G)_{ret-\theta r_p}}{(Q + G)_{ret-r_p}} \quad (4.9),$$

onde  $Q$  refere-se à componente hidrodinâmica da taxa de transporte das partículas,  $G$  à sua componente gravitacional, o subscrito  $ret-\theta r_p$  indica que os limites de integração descontam uma

camada de espessura  $\theta r_p$  de cada meio lado da seção transversal retangular e o subscrito *ret- $r_p$*  indica que os limites de integração descontam uma camada de espessura  $r_p$  de cada meio lado da seção transversal retangular. As expressões para calcular cada uma dessas parcelas são dadas pelas Equações 4.11 a 4.14.

O parâmetro  $\theta$  assume valores maiores que 1, refletindo em que medida a atração ou a repulsão entre a superfície interna das ligações e as partículas favorece ou dificulta a deposição da partícula no interior da ligação. Quanto maior for  $\theta$ , maior será a probabilidade de captura por deposição.

Nos casos em que o produto  $\theta r_p$  for maior ou igual a  $b_t$ , a probabilidade de captura (*PC*) é igualada a 1 e a partícula é inevitavelmente capturada por deposição na ligação. Nos outros casos, a captura é efetuada ou não, dependendo do sorteio de um número aleatório entre 0 e 1, e sua comparação com *PC*: se a probabilidade de captura for maior ou igual ao número sorteado, a partícula é depositada na ligação; caso contrário, considera-se que a partícula atravessa a ligação até seu extremo oposto, com a velocidade média do fluido.

Para o escoamento de Poiseuille em dutos com seção transversal retangular, a velocidade em cada ponto da seção é dada por:

$$v_x(a,b) = \frac{b_t^2}{3\mu} \left( \frac{\Delta P}{c_t} \right) \left\{ 1 - \frac{48}{\pi^3} \sum_{i=1,3,5,\dots}^{\infty} \left[ (-1)^{\frac{i-1}{2}} \frac{\cos[(i\pi/2)(a/b_t)]}{i^3} \frac{\cosh[(i\pi/2)(b/b_t)]}{\cosh[(i\pi/2)(a_t/b_t)]} \right] \right\} \quad (4.10).$$

Integrando  $v_x$  nos limites impostos no numerador do último termo de 4.8, resulta:

$$Q_{ret-\theta r_p} = \frac{4}{3} \frac{b_t^4}{\mu} \left( \frac{\Delta P}{c_t} \right) \left\{ \left[ \psi - (1+\psi)(\theta r_p/b_t) + (\theta r_p/b_t)^2 \right] + \right. \\ \left. - \frac{192}{\pi^5} \sum_{i=1,3,5,\dots}^{\infty} \left\{ \frac{(-1)^{\frac{i-1}{2}}}{i^5} \frac{\text{sen}[(i\pi/2)(1-\theta r_p/b_t)] \text{senh}[(i\pi/2)(\psi - \theta r_p/b_t)]}{\cosh[(i\pi/2)\psi]} \right\} \right\} \quad (4.11).$$

Fazendo o mesmo relativamente ao denominador do último termo de 4.8, vem:

$$Q_{ret-r_p} = \frac{4 b_t^4}{3 \mu} \left( \frac{\Delta P}{c_t} \right) \left\{ \left[ \psi - (1 + \psi) \left( r_p / b_t \right) + \left( r_p / b_t \right)^2 \right] + \right. \\ \left. - \frac{192}{\pi^5} \sum_{i=1,3,5,\dots}^{\infty} \left\{ \frac{(-1)^{\frac{i-1}{2}}}{i^5} \operatorname{sen}[(i\pi/2)(1 - r_p / b_t)] \frac{\operatorname{senh}[(i\pi/2)(\psi - r_p / b_t)]}{\cosh[(i\pi/2)\psi]} \right\} \right\} \quad (4.12).$$

Integrando  $u_\infty$  nos limites impostos no numerador do último termo de 4.8, resulta:

$$G_{ret-\theta r_p} = 4(a_t - \theta r_p)(b_t - \theta r_p)u_\infty \cos \varphi \quad (4.13).$$

Fazendo o mesmo relativamente ao denominador do último termo de 4.8, vem:

$$G_{ret-r_p} = 4(a_t - r_p)(b_t - r_p)u_\infty \cos \varphi \quad (4.14).$$

#### 4.3.7 – O efeito da superfície específica do meio poroso na deposição de gotículas líquidas

Conforme relatado na Seção 2.3.5, o escoamento de emulsões em meios porosos tem características peculiares: observações empíricas de Soo e Radke (1986) mostraram que as gotículas de uma emulsão depositam-se de maneira uniforme nas paredes sólidas dos poros, formando uma camada única, não ocorrendo a superposição de gotículas umas sobre as outras. Para simular adequadamente esse tipo de deposição, antes de atribuir uma probabilidade de captura por deposição a cada gotícula que entra numa ligação, torna-se necessário testar se outras gotículas anteriormente capturadas recobriram ou não totalmente a superfície interna da ligação. Em caso afirmativo, a probabilidade de captura por deposição no interior dessa ligação é anulada.

Esses efeitos são fortemente dependentes da superfície específica do meio poroso. Assim, sua modelagem exige que se defina uma relação consistente entre a superfície específica do meio poroso e a da rede. No presente modelo, definiu-se a superfície disponível para deposição, em cada ligação, como a área interna original desta, multiplicada pela razão entre a superfície específica do meio poroso e a superfície específica da rede.

#### 4.3.8 – Captura de partículas por deposição nos poros

Conforme citado anteriormente, a ligação por onde cada partícula prosseguirá seu caminho na rede, a partir do nó onde se encontra, é escolhida segundo um viés ditado pela taxa de fluxo das partículas, que incorpora a componente gravitacional. Assim sendo, existe a possibilidade de que essa escolha recaia sobre uma ligação fechada, pois a componente gravitacional tem sempre a mesma direção e sentido, independentemente do campo de fluxo local. Tal possibilidade é tanto maior quanto maior for a diferença de densidades entre as partículas e o fluido suporte, e tanto menor quanto maiores forem a velocidade de injeção e o número de coordenação do meio.

Na modelagem ora proposta, esse evento corresponde ao caso em que, simultaneamente:

- não haja escape, através de ligações horizontais, do nó onde a partícula se encontra;
- a ligação vertical no sentido da componente gravitacional seja uma ligação inativa ou tenha sido bloqueada anteriormente por outras partículas;
- a componente hidrodinâmica do fluxo na ligação vertical restante seja menor, em valor absoluto, e tenha sentido contrário ao da componente gravitacional.

Nessas circunstâncias, considera-se que o campo gravitacional leva à deposição de partículas dentro dos poros, numa quantidade que pode ser expressiva, principalmente quando a direção macroscópica de fluxo é horizontal, caso em que a concentração efluente diminui sensivelmente. Tais resultados são coerentes com observações feitas em sistemas reais a baixas vazões e com diferenças de densidades significativas (Burganos *et al.*, 1995). Porém, essa deposição não gera qualquer efeito sobre o campo de pressões (mesmo porque, conforme visto na Seção 4.3.1, a parcela de contribuição dos poros à resistência ao fluxo não é considerada).

Também pode ocorrer que, no interior de uma região de nós e ligações ativas da rede, não haja escoamento do fluido, seja em virtude do tamponamento de gargantas que dão acesso à região afetada, seja pelo simples fato de que essa região dá acesso a poros "sem saída" (*dead end pores*). No primeiro caso, há interrupção da continuidade dos caminhos anteriormente existentes entre esses poros/gargantas e a face de entrada do modelo, ficando aprisionadas no interior dessa

região todas as partículas que, ocasionalmente, ali estejam no momento do bloqueio. No segundo, são capturadas todas as partículas que penetrarem nessa ramificação da rede (em alguma de suas ligações verticais, por força da componente gravitacional). Assim como na deposição por sedimentação gravitacional no interior dos poros, essas modalidades de captura não geram modificações no campo de pressões da rede.

#### 4.3.9 – Efeitos da deposição de partículas nas ligações sobre o campo de pressões

Para determinar os efeitos da captura por deposição nas ligações, adotou-se a formulação de Imdakm e Sahimi (1991). O aumento da resistência ao fluxo ocasionado pela força de arraste exercida pelo fluido sobre a partícula corresponde ao que seria observado caso a abertura da ligação fosse reduzida. Contrariamente ao modelo de Rege e Fogler, no presente trabalho nenhuma modificação na modelagem é feita para diferenciar a deposição em camadas uniformes da deposição com empilhamento de partículas, considerando-se que esses efeitos podem ser traduzidos, em cada caso, por diferentes valores do parâmetro de ajuste,  $\theta$ .

O valor da alteração, devida à deposição da partícula, da queda de pressão ao longo da ligação é estimado usando os resultados de um trabalho de O'Neil (1968), segundo os quais a força de arraste  $F$  em uma esfera em contato com um plano, aplicada por um fluido viscoso cujo movimento, na ausência da esfera, poderia ser considerado um fluxo cisalhante linear, é dada por:

$$F = 6 f \pi r_p^2 \mu \dot{V} \quad (4.15),$$

onde  $f$  é uma constante, cujo valor foi determinado por O'Neil ( $f = 1.7009$ ), e  $\dot{V}$  é a taxa de variação da velocidade do fluido com relação à distância ao plano.

Embora, num escoamento incompressível de fluidos Newtonianos em regime laminar, o perfil da distribuição de velocidades na seção transversal da ligação seja parabólico (fluxo de Poiseuille), assume-se como uma boa aproximação a força de arraste calculada pela Equação 4.15, válida para um perfil linear das velocidades.

Como o perfil de velocidades numa seção retangular não é isotrópico, e diante da impossibilidade de estimar *a priori* a morfologia da deposição das partículas, considerou-se que a taxa de variação da velocidade corresponde à razão entre a velocidade máxima na ligação,  $V_{max}$ , e o raio do círculo cuja área equivale à da seção transversal da ligação, ou seja:

$$\dot{V} = \frac{V_{max}}{2b_t\sqrt{\psi/\pi}} \quad (4.16),$$

onde

$$V_{max} = \frac{b_t^2}{3\mu c_t} \Delta P \left[ 1 - \frac{48}{\pi^3} \sum_{i=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{(-1)^{\frac{i-1}{2}}}{i^3 \cosh[(i\pi/2)\psi]} \right] \quad (4.17).$$

A força contraposta ao fluxo depois da deposição,  $X$ , corresponde à soma dessa força antes da deposição (que é o produto da diferença de pressões na ligação pela sua área transversal) e a força contraposta ao fluxo devida à deposição da partícula (dada pela Equação 4.15). Assim,

$$X = 4\psi b_{td}^2 \Delta P_d = 4\psi b_{ta}^2 \Delta P_a + 10.2054\pi r_p^2 \mu \dot{V} \quad (4.18),$$

onde, respectivamente:  $b_{ta}$  e  $b_{td}$  são a dimensão característica equivalente da ligação antes e depois da deposição;  $\Delta P_a$  e  $\Delta P_d$  são a queda de pressão antes e depois da deposição.

A nova dimensão característica da ligação,  $b_{td}$ , pode ser determinada assumindo que a vazão anterior à deposição,  $Q_a$ , não é afetada significativamente pela deposição da partícula (até porque esta é considerada relativamente pequena, uma vez que seu diâmetro é menor que a abertura da ligação). Assim,  $b_{td}$  é determinada por:

$$b_{td} = \sqrt{\frac{3Q_a \mu c_t}{X} \left[ 1 - \frac{192}{\psi \pi^5} \sum_{i=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{\tanh[(i\pi/2)\psi]}{i^5} \right]^{-1}} \quad (4.19).$$

Conforme observado por Imdakm e Sahimi (1991), esse valor é considerado uma aproximação razoável de  $b_{td}$ , sendo a estimativa exata da nova dimensão característica da ligação um problema altamente complexo.

Deve-se observar, ainda, que a Equação 4.19 é deduzida considerando-se que a forma retangular das ligações com a deposição das partículas é conservada, ou seja, que as partículas depositam-se em camadas mais ou menos uniformes. Além disso, inerente a essa formulação, está a pressuposição de que a razão de aspecto das ligações,  $\psi$ , também é mantida a mesma durante o processo.

#### 4.3.10 – Efeitos da exclusão de partículas pelo tamanho sobre o campo de pressões

Quando uma partícula é capturada por exclusão pelo tamanho, na entrada de uma ligação, duas hipóteses podem ocorrer: se o diâmetro da partícula é maior ou igual ao lado maior da entrada da ligação (retangular), considera-se que a ligação é totalmente obstruída, anulando-se sua condutância hidráulica; caso o diâmetro da partícula seja menor que o lado maior da entrada da ligação, há uma obstrução parcial dessa entrada.

São dois os efeitos da obstrução parcial da entrada da ligação. O primeiro é a redução do lado maior da entrada da ligação, que passará a ser usado na comparação com o diâmetro de outras partículas que venham a ser capturadas futuramente na mesma entrada. Essa redução é computada subtraindo, do lado maior da entrada da ligação, o diâmetro da partícula. O segundo efeito é o da redução da condutância hidráulica da ligação, traduzido pela atualização da sua dimensão característica. Por tratar-se de um problema ainda mais complexo que o da deposição no interior da ligação, sem qualquer menção na literatura pesquisada, esse efeito é incorporado através da mesma abordagem simplificada usada para a captura por deposição no interior da ligação.

Uma visão geral do modelo proposto para a simulação do escoamento de fluidos particulados na rede é dada pelo fluxograma da Figura 4.4.

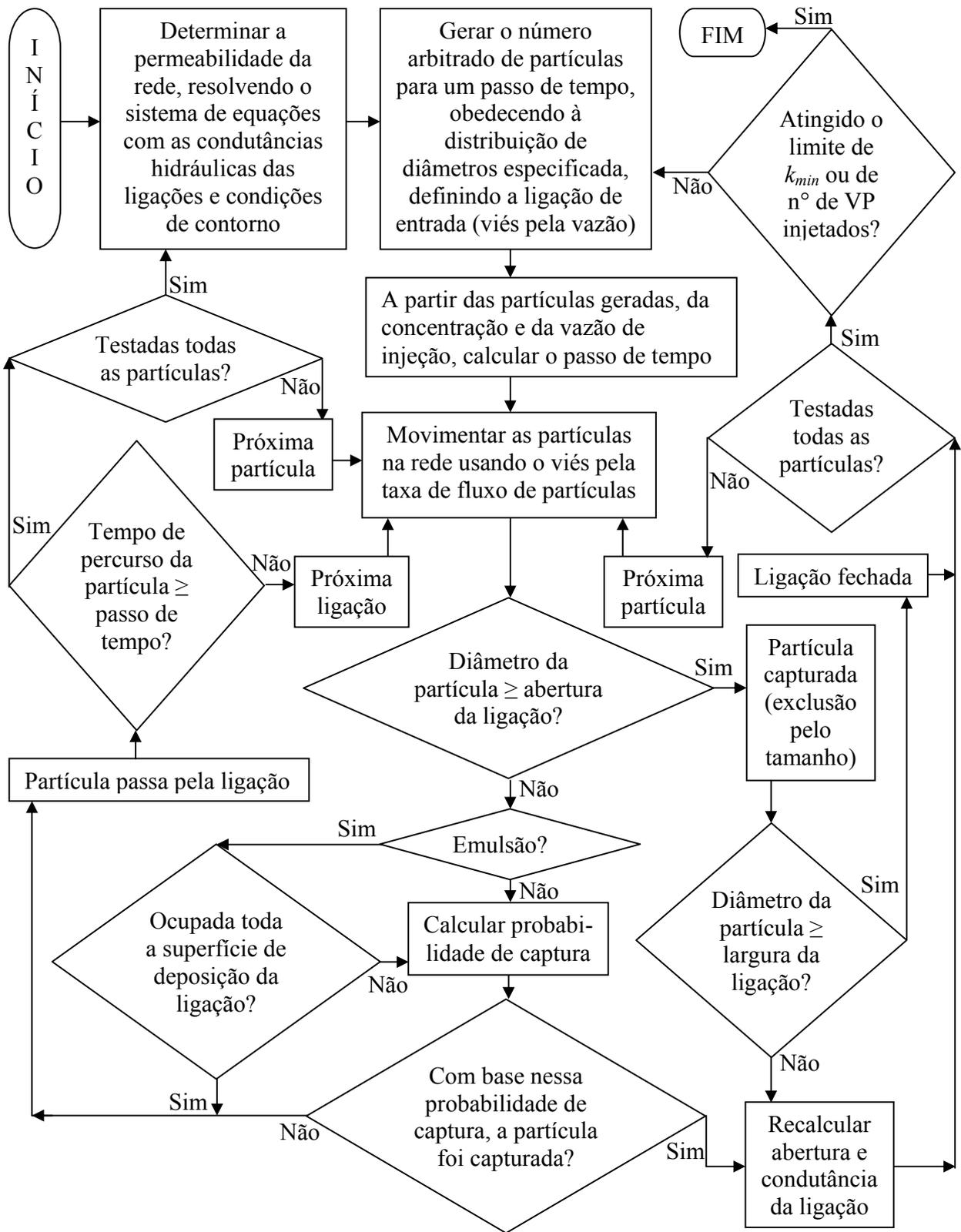


Figura 4.4: Fluxograma da simulação do escoamento de fluidos particulados na rede

## Capítulo 5

### Sensibilidade do Modelo às Variáveis Envolvidas

Neste capítulo, são examinadas as respostas do simulador a mudanças nas variáveis que o compõem: o tamanho da rede; o número de coordenação médio,  $Z$ ; as diferentes distribuições de tamanhos de partículas, relativamente à distribuição de tamanhos de gargantas de poros; os dois parâmetros de ajuste,  $\theta$  e  $v_{cr}$ ; a razão de aspecto,  $\psi$ , das seções transversais das ligações (lado maior/lado menor do retângulo); as condições de contorno adotadas para o escoamento (vazão ou pressão constante); a densidade das partículas em relação à do fluido suporte e o sentido de fluxo (por cuja combinação expressam-se os efeitos gravitacionais); a concentração de partículas nas suspensões injetadas; o tipo de partícula (sólida ou líquida) e as diferentes morfologias de deposição características de cada um desses tipos; no caso de partículas líquidas, a superfície específica do meio poroso.

As simulações realizadas têm natureza estocástica, desde a construção da rede até os critérios de geração, movimentação e captura de partículas. Atribui-se o nome de realização a cada uma das várias rodadas do simulador executadas sob idênticas condições e dados de entrada, mas com diferentes sementes para os geradores internos de números pseudo-aleatórios.

Para o estudo da sensibilidade do modelo às variáveis, construiu-se uma rede fixando-se arbitrariamente distribuições normais truncadas para as dimensões características de gargantas e de poros. Distribuições normais truncadas também foram adotadas para as partículas, nos casos das suspensões polidispersas. A Tabela 5.1 apresenta os valores da média, do desvio padrão e dos

limites superior e inferior de truncamento dessas distribuições normais, representadas graficamente na Figura 5.1 (poros e gargantas) e na Figura 5.2 (partículas).

Tabela 5.1: Dimensões características de poros e gargantas e diâmetros de partículas

Distribuição Normal	Média ( $\mu\text{m}$ )	Desvio padrão ( $\mu\text{m}$ )	Truncamento inferior ( $\mu\text{m}$ )	Truncamento superior ( $\mu\text{m}$ )
Poros	10	3,3	0,5	20
Gargantas	1	0,33	0,05	2
Partículas A	1	0,5	0	4
Partículas B	1	0,25	0	2,6
Partículas C	0,5	0,25	0	2,2

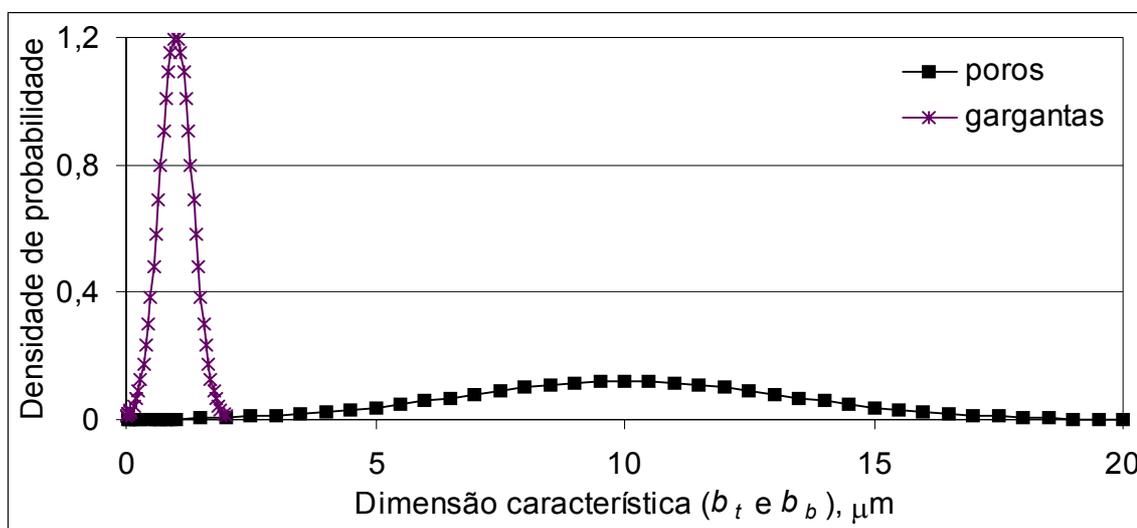


Figura 5.1: Distribuições das dimensões características de poros ( $b_b$ ) e gargantas ( $b_t$ )

Todas as simulações foram realizadas em redes construídas com  $\phi = 0,2$ . A não ser quando explicitamente indicado, os parâmetros adotados são: número de coordenação médio,  $Z = 4$ ; razão de aspecto,  $\psi = 6$ ;  $\rho_p = \rho$  (não há efeitos gravitacionais);  $v_{cr} \gg v$  (probabilidade de captura independente da velocidade); viscosidade do fluido,  $\mu = 1$  cP; injeção a vazão constante (velocidade

aparente de 20 cm/h). Um microcomputador com processador Pentium III de 450 MHz, com 228 MB de RAM, em ambiente Windows NT, foi utilizado para processar todas as simulações.

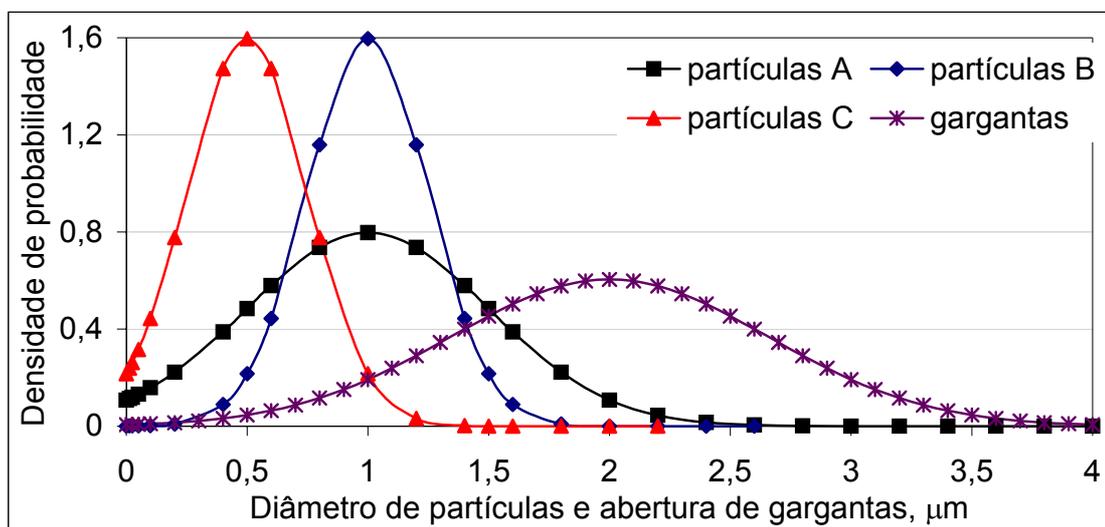


Figura 5.2: Distribuições de diâmetros de partículas comparadas à de abertura das gargantas

### 5.1 – A influência do tamanho da rede

Conforme citado na Seção 4.2.1, as simulações foram realizadas em redes de, no máximo,  $30 \times 30 \times 30$  nós. Em todas as simulações foram mantidos os 30 nós na direção longitudinal, pois esta é a mais crítica na modelagem, dado que relaciona-se ao perfil de penetração e captura das partículas e, por conseguinte, à redução da permeabilidade da rede. Já a simulação em redes com 30 nós nas direções transversais mostrou-se, em vários casos, proibitivamente demorada. A influência da redução do número de nós transversais da rede sobre os resultados das simulações parece, a princípio, não ser importante, pois a imposição de condições de contorno laterais periódicas equivale à repetição lateral infinita de cada seção da rede, transversalmente à direção macroscópica de fluxo. Porém, essa expectativa não foi confirmada: nas simulações realizadas em redes transversalmente menores, os valores da permeabilidade original calculados diminuíram um pouco (Tabela 5.2), mas foram muito expressivas as diferenças da queda média de permeabilidade pela captura de partículas (Figura 5.3) e da dispersão entre as curvas das várias realizações, esta com uma tendência não tão clara (Figura 5.4). Esses resultados foram obtidos

considerando-se somente a captura de partículas por exclusão pelo tamanho ( $\theta = 1,0$ ), mas podem ser generalizados para outros mecanismos de captura. Os parâmetros de simulação usados foram: partículas com 2,5  $\mu\text{m}$  de diâmetro (suspensão monodispersa); concentração injetada de 200 ppm.

Tabela 5.2: Permeabilidade original (mD) em realizações da rede com diferentes números de nós

Número da realização	Redes 30 x 30 x 30	Redes 20 x 20 x 30	Redes 15 x 15 x 30
1	9,90	10,33	9,63
2	9,75	9,03	9,42
3	10,05	9,49	9,58
4	10,25	9,84	9,32
5	9,70	10,66	9,66
6	10,42	9,55	9,28
7	10,55	10,00	9,66
8	10,12	9,85	9,87
Média	10,09	9,84	9,55
Desvio padrão	0,3053	0,5072	0,1988

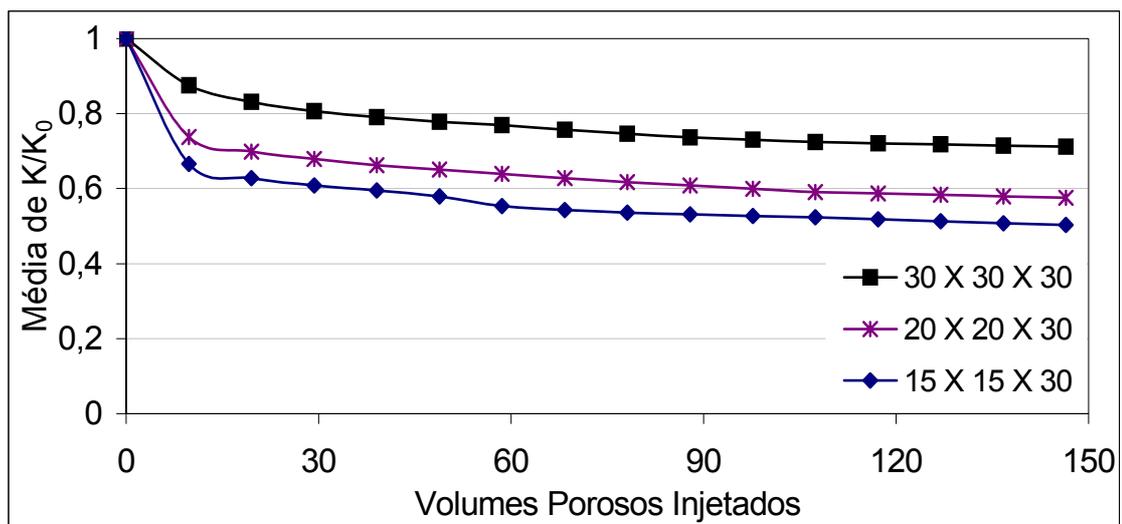


Figura 5.3: Médias da queda de permeabilidade para vários tamanhos de rede (8 realizações)

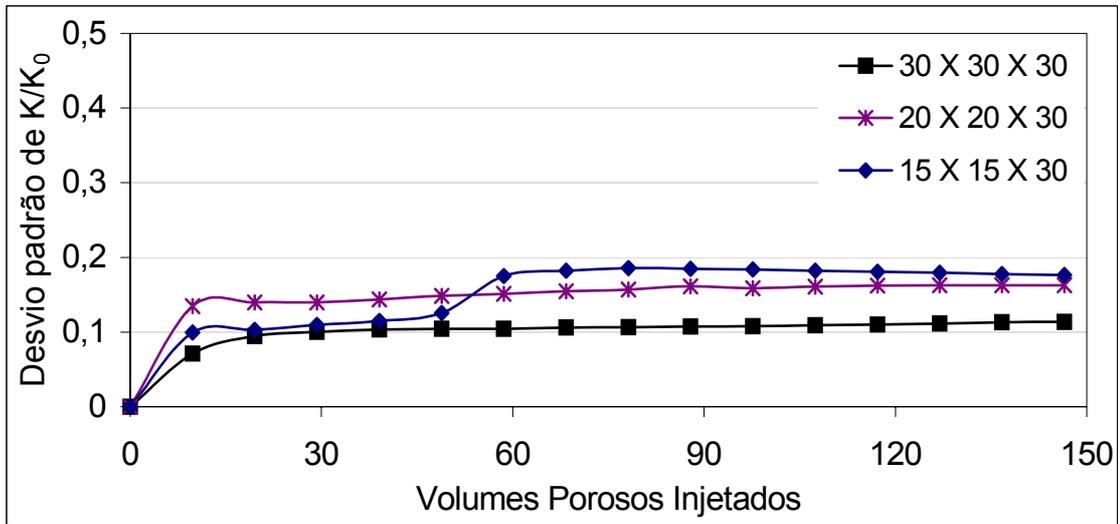


Figura 5.4: Desvios padrão da queda de permeabilidade para vários tamanhos de rede (8 realizações)

Outras simulações, com os mesmos parâmetros das anteriores (diâmetro, densidade e concentração de partículas), foram efetuadas em uma rede com  $10 \times 10 \times 30$  nós e em uma segunda rede, com  $20 \times 20 \times 30$  nós, gerada pela superposição lateral da primeira rede em ambas as direções transversais, mantendo-se a disposição espacial dos elementos da rede (Figura 5.5) e as dimensões características de cada um deles.

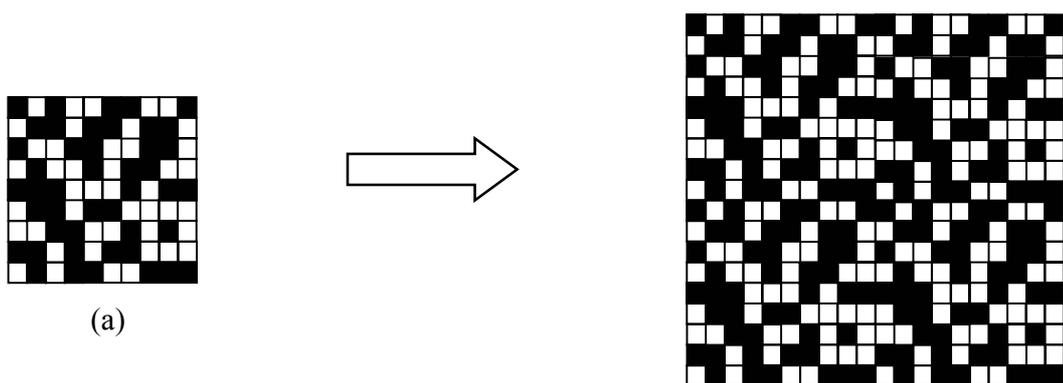


Figura 5.5: Representação, em forma de malha, de uma seção da rede com  $20 \times 20$  nós (b) gerada por superposição lateral de uma seção com  $10 \times 10$  nós (a)

Ao contrário do verificado anteriormente, quanto às diferenças entre as curvas médias de queda de permeabilidade em função dos tamanhos das redes (Figura 5.3), as curvas de queda de permeabilidade para a rede com  $10 \times 10 \times 30$  nós praticamente coincidiram com as da rede com  $20 \times 20 \times 30$  nós (Figura 5.6). Como era de se esperar, a permeabilidade original nessas duas redes foi exatamente a mesma (8,16 mD), valor este que também confirma a tendência, anteriormente assinalada, de queda da permeabilidade com a diminuição do tamanho da rede (Tabela 5.2).

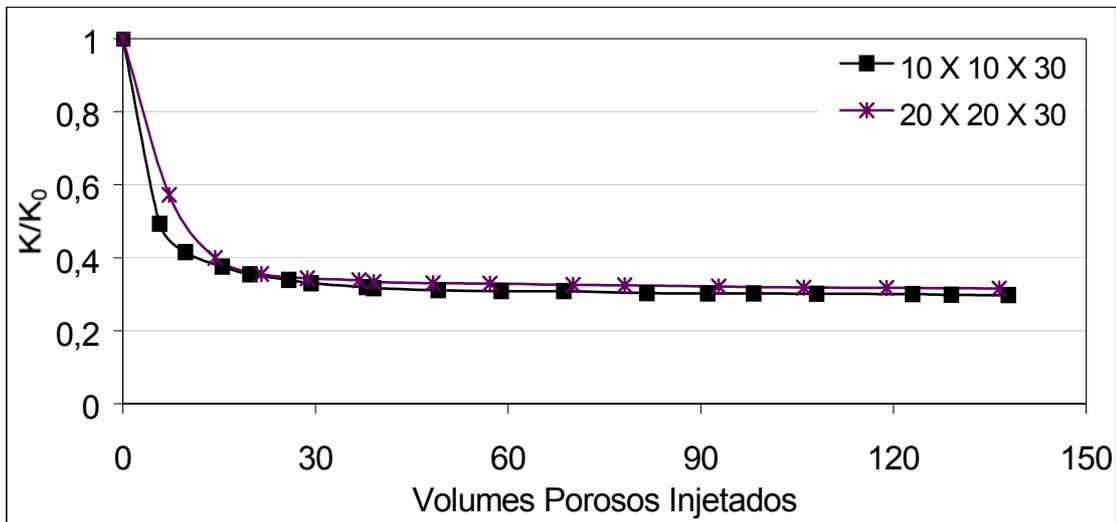


Figura 5.6: Queda de permeabilidade em uma rede com  $10 \times 10 \times 30$  nós, comparada à de outra com  $20 \times 20 \times 30$  nós, gerada pela superposição lateral da primeira

Afora a consistência da aplicação das condições de contorno laterais periódicas, esses resultados indicam que não é especificamente o tamanho da rede que está na origem das diferenças antes assinaladas: tais resultados podem estar refletindo a influência de correlações espaciais características de cada realização da rede, oriundas do processo (descrito na Seção 4.2) por intermédio do qual esta é estruturada e seus elementos constituintes são dimensionados. Nesse processo, foi visto que o tamanho de cada ligação está correlacionado ao do menor dos dois nós interligados. Além disso, correlações espaciais dos tamanhos de poros vizinhos ou dos tamanhos de gargantas próximas também são geradas. Está fora do escopo deste trabalho a

determinação e o estudo sistemático das correlações espaciais em modelos de rede, sua influência sobre as propriedades modeladas e sua conjugação às correlações espaciais intrínsecas de meios porosos. Esses temas vêm recebendo atenção na literatura especializada, particularmente em trabalhos voltados à simulação de processos multifásicos (Wardlaw *et al.*, 1987; Constantinides e Payatakes, 1989; Jerauld e Salter, 1990; Tsakiroglou e Payatakes, 1991; Bryant *et al.*, 1996; Du, 1996; Mathews, *et al.*, 1997; Xu *et al.*, 1997). De todo modo, quando o alcance das citadas correlações é da mesma ordem de grandeza do comprimento da rede na direção correspondente, é sabido que seu efeito pode tornar-se relevante (Lantuéjoul, 1991). Embora os resultados relatados sugiram que certas propriedades (a permeabilidade original, no contexto aqui tratado) são menos suscetíveis a correlações espaciais que o modelo possa conter, outras podem ser fortemente afetadas, como parece ser o caso da queda da permeabilidade em virtude da captura de partículas.

A discussão precedente fornece importantes elementos a serem considerados na definição do tamanho da rede usado nas simulações. Buscou-se um critério que traduzisse o compromisso entre, por um lado, a diminuição do tempo das simulações para viabilizar sua execução e, por outro, a redução da variabilidade das respostas (ou seja, o aumento da representatividade e da estabilidade estatística das realizações). À exceção do estudo do efeito do número de coordenação médio da rede, que foi realizado em redes com  $30 \times 30 \times 30$  nós, foram escolhidas redes com  $20 \times 20 \times 30$  nós para todas as simulações posteriores, número esse que poderia ter sido aumentado caso se tivesse optado pelo uso de recursos computacionais mais intensivos (se disponíveis). Para uma quantificação aproximada da necessidade computacional que isso poderia implicar, é interessante citar o trabalho de Lee *et al.* (1995) que, para a modelagem de escoamentos multifásicos por intermédio de modelos de rede, em função de considerações similares às acima apresentadas quanto ao tamanho da rede, relatam a adoção de processamento paralelo massivo para simulações em redes com  $64 \times 64 \times 128$  nós.

Outra questão relevante deriva da suposição, fundamentada no processo de geração da rede, de que os alcances das correlações espaciais da rede são os mesmos para todas as suas realizações (mantidos o número de coordenação médio e as distribuições de tamanhos de poros e de gargantas). Assim sendo, a influência das correlações sobre as propriedades estudadas é característica de cada tamanho de rede. A consequência disso é que só são comparáveis os

resultados de simulações realizadas com redes exatamente do mesmo tamanho. Daí decorre, ainda, que os parâmetros de ajuste são, em cada caso, indissociáveis do tamanho de rede no qual foram determinados. É, portanto, incorreto tentar explorar a faceta preditiva do modelo partindo de parâmetros de ajuste determinados em redes com um dado tamanho e simulando o caso objeto de estudo em uma rede de tamanho diferente.

No transcurso da análise dos resultados das simulações, percebeu-se que o comportamento observado em uma realização ocorre qualitativamente também nas outras. Assim, para todos os demais fatores a seguir analisados, é suficiente verificar o que ocorre com os resultados em uma realização da rede, não sendo necessário tornar a executar simulações análogas em diversas outras realizações. Por isso, definido o tamanho da rede, uma das realizações desta foi arbitrariamente escolhida para as simulações.

## **5.2 – A influência do número de coordenação médio (conectividade) da rede**

O número de coordenação médio da rede representa a interconectividade do sistema poroso da rocha. Nas simulações realizadas para avaliar seu efeito, foi considerada somente a captura de partículas por exclusão pelo tamanho (a incorporação da captura por deposição não alteraria, em essência, seu comportamento). Adotou-se o valor de 100 ppm para a concentração de partículas. Essas simulações foram efetuadas em uma rede com  $30 \times 30 \times 30$  nós e seus resultados estão nas Figuras 5.7 a 5.9. A resposta qualitativa obtida em cada realização da rede repete-se também em diversas outras realizações, cujos resultados, por serem redundantes, não são aqui relatados.

Observe-se a forte influência da variação do número de coordenação sobre as simulações. Como essas figuras referem-se exclusivamente ao mecanismo de exclusão pelo tamanho, confirma-se a expectativa de que o impacto mais intenso recaia sobre sistemas com partículas maiores. Na rede com  $Z = 3$ , o bloqueio por partículas de  $3 \mu\text{m}$  de diâmetro fez a rede atingir seu limite de percolação (Figura 5.9), tendo a permeabilidade sido totalmente colapsada após a injeção de pouco mais de 50 volumes porosos de fluido (talvez o mesmo também ocorresse no sistema com partículas de  $2,5 \mu\text{m}$  de diâmetro, caso a simulação tivesse ido adiante).

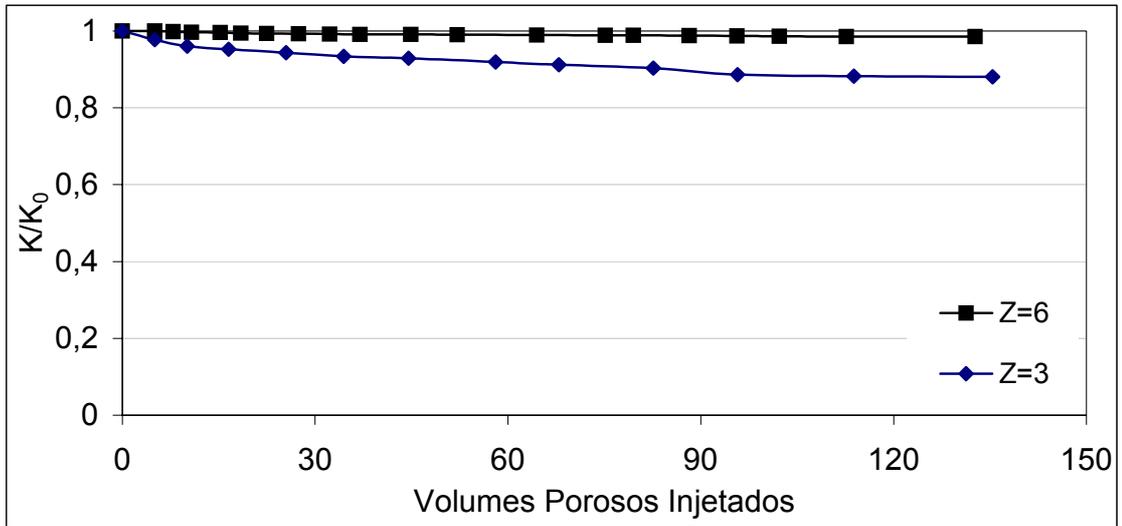


Figura 5.7: Comparação entre o comportamento da permeabilidade em redes com número de coordenação médio  $Z = 6$  e com  $Z = 3$ , para partículas de  $2 \mu\text{m}$

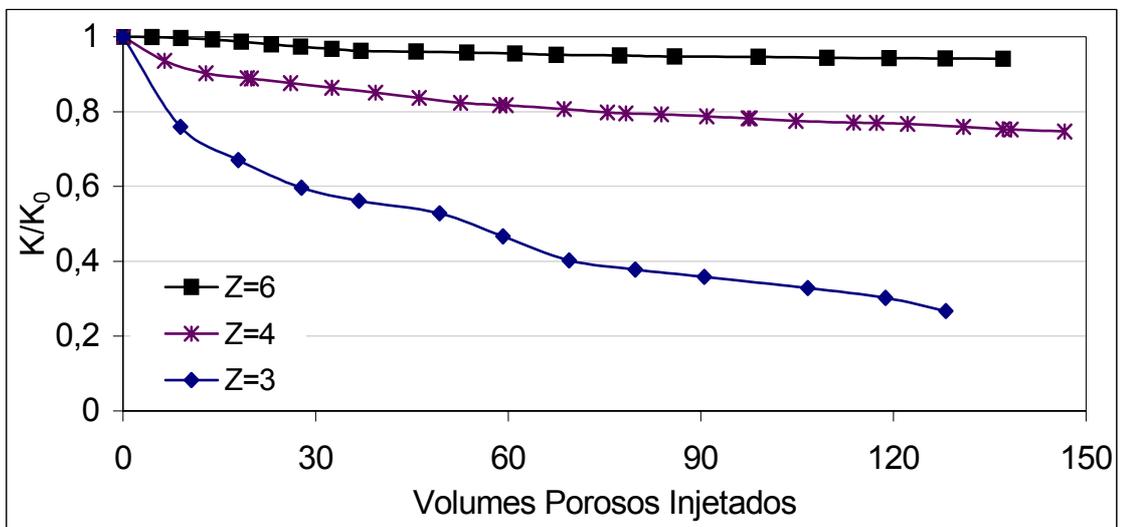


Figura 5.8: Comparação entre o comportamento da permeabilidade em redes com número de coordenação médio  $Z = 6$ , com  $Z = 4$  e com  $Z = 3$ , para partículas de  $2,5 \mu\text{m}$

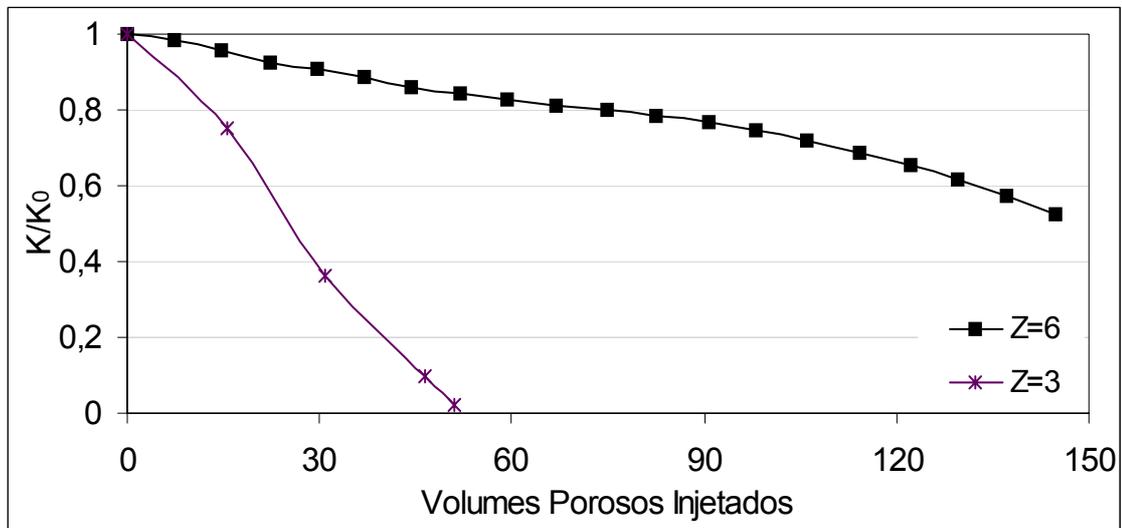


Figura 5.9: Comparação entre o comportamento da permeabilidade em redes com número de coordenação médio  $Z = 6$  e com  $Z = 3$ , para partículas de  $3 \mu\text{m}$

### 5.3 – A influência do parâmetro $\theta$ e das distribuições de tamanhos de partículas

A seguir, são relatados os resultados de simulações realizadas com suspensões monodispersas (todas as partículas do mesmo tamanho) e polidispersas. Para as suspensões monodispersas, os resultados de processos de captura de partículas por exclusão pelo tamanho são comparados com os devidos à deposição nas ligações. Para as suspensões polidispersas, os efeitos do mecanismo de exclusão pelo tamanho, agindo isoladamente, são comparados com os desse mecanismo combinado com o da deposição.

#### 5.3.1 – Suspensões monodispersas

No caso das suspensões monodispersas, comparam-se inicialmente os resultados de simulações para partículas de  $0,099 \mu\text{m}$  de diâmetro (somente deposição, já que a menor abertura de garganta mede  $0,1 \mu\text{m}$ ), com os obtidos para partículas de  $2,5 \mu\text{m}$  de diâmetro (somente exclusão pelo tamanho,  $\theta = 1$ ). Para confrontar os resultados da captura por exclusão pelo tamanho com os da deposição, pode ser usado um dos seguintes critérios: adotar, nas simulações da deposição, a mesma concentração mássica da exclusão pelo tamanho, ou adotar a mesma

concentração em número de partículas. Como o volume das partículas (e, conseqüentemente, sua massa) é proporcional à terceira potência do diâmetro, uma suspensão de partículas de 2,5  $\mu\text{m}$  cuja concentração seja de 200 ppm em massa tem o mesmo número de partículas que uma suspensão de partículas de 0,099  $\mu\text{m}$  cuja concentração seja de 0,0124 ppm em massa. Os resultados das simulações encontram-se na Figura 5.10. Como parâmetro de deposição das partículas de 0,099  $\mu\text{m}$ , utilizou-se  $\theta = 50$ , de modo a garantir que nenhuma dessas partículas deixasse de ser capturada por esse mecanismo nas ligações da rede.

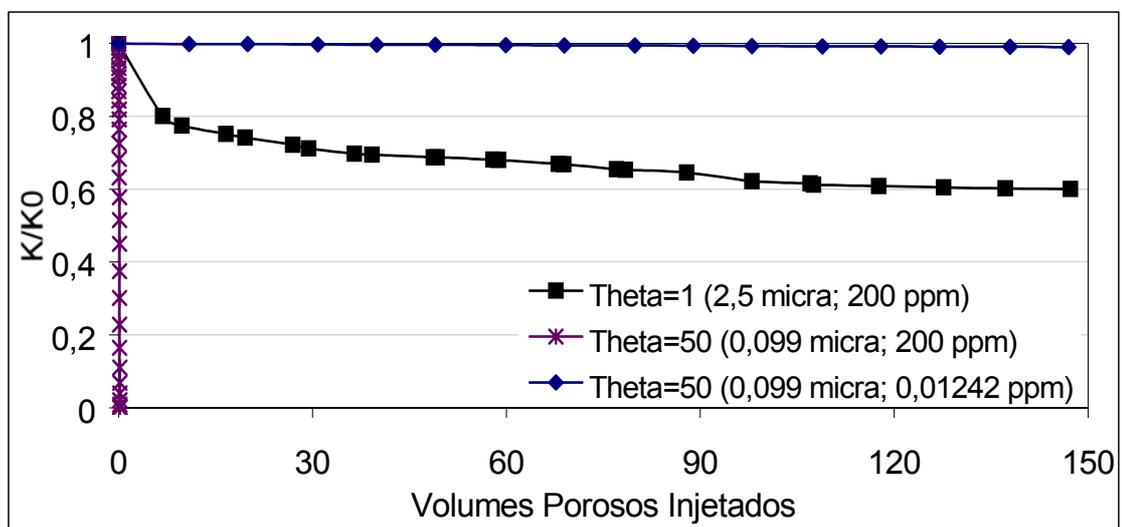


Figura 5.10: Suspensão monodispersa: queda da permeabilidade devida à exclusão pelo tamanho (partículas de 2,5  $\mu\text{m}$ ,  $\theta = 1$ ) e devida à deposição (partículas de 0,099  $\mu\text{m}$ ,  $\theta = 50$ )

As duas curvas de deposição ( $\theta = 50$ ) mostradas na Figura 5.10, cada qual correspondendo a uma concentração das partículas, apresentam comportamentos opostos. Porém, a simples multiplicação do número de volumes porosos injetados pela razão entre essas concentrações faz ambas as curvas praticamente coincidirem. Esse é um resultado esperado: por um lado, observa-se que as várias simulações executadas com iguais parâmetros na mesma realização da rede dão resultados quase idênticos (o que atesta a estabilidade estatística das simulações em cada realização); por outro, a concentração de partículas define o volume de líquido que acompanha as partículas que entram na rede, sendo a quantidade, os diâmetros e a natureza eletro-química das partículas, e não o volume da fase líquida, que definem o grau e o efeito das capturas sobre o

campo de pressões na rede. Assim, a concentração age como um coeficiente ligado linearmente ao número de volumes porosos injetados correspondente a cada grau de obstrução da rede de poros por partículas capturadas.

Os resultados de outras simulações são comparados na Figura 5.11, mostrando a influência da exclusão pelo tamanho agindo isoladamente ( $\theta = 1$ ) e da sua atuação conjunta com o mecanismo de deposição ( $\theta > 1$ ). Note-se que, para  $\theta$  imediatamente superior a 1, há uma acentuada sensibilidade das curvas de queda de permeabilidade por captura de partículas, enquanto essas curvas sofrem muito pouca variação para valores de  $\theta$  maiores que 1,5. Quando se varia o tipo de distribuição dos tamanhos de partículas ou de gargantas, a relação entre esses tamanhos, a razão de aspecto das ligações,  $\psi$ , ou o número de coordenação,  $Z$ , são obtidos outros valores de  $\theta$  acima dos quais diminui drasticamente a sensibilidade das curvas de queda de permeabilidade. No entanto, esse mesmo padrão qualitativo do comportamento da sensibilidade é generalizadamente observado para amplas faixas dessas variáveis.

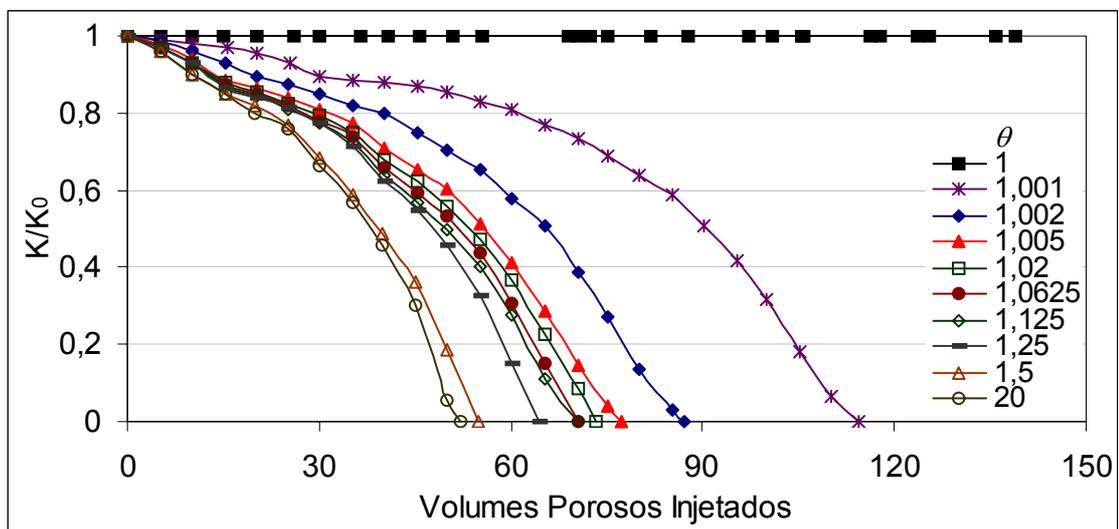


Figura 5.11: Suspensão monodispersa: queda de permeabilidade correspondente a diversos valores de  $\theta$ , para partículas com diâmetro de  $1 \mu\text{m}$

A Figura 5.12 apresenta outros interessantes resultados, levando em conta os efeitos do diâmetro das partículas. Conforme a expectativa, quando somente o mecanismo de exclusão pelo

tamanho é levado em conta ( $\theta = 1$ ), a queda de permeabilidade ocasionada por partículas com diâmetro  $d_p = 1 \mu\text{m}$ , é menor que a obtida com  $d_p = 1,5 \mu\text{m}$ . Contrariamente, porém, ao que uma análise ligeira prognosticaria, quando o mecanismo de deposição também é considerado (no caso, com  $\theta = 1,5$ ), o efeito das partículas menores é mais acentuado do que o das partículas maiores.

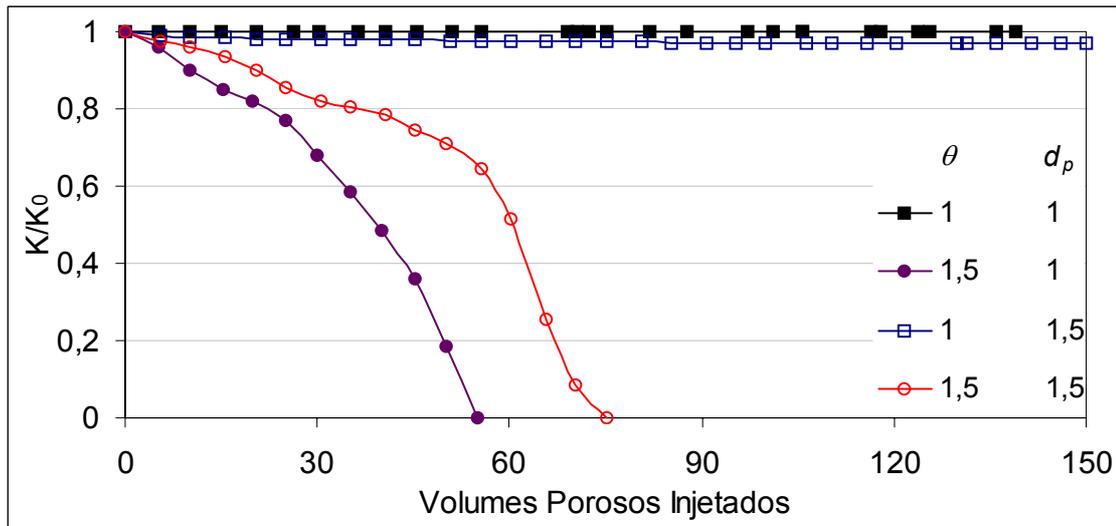


Figura 5.12: Suspensão monodispersa: queda de permeabilidade ocasionada por partículas com diâmetro  $d_p = 1 \mu\text{m}$ , comparada à obtida com  $d_p = 1,5 \mu\text{m}$  ( $\theta = 1$  e  $\theta = 1,5$ )

Ainda que inesperado, esse resultado decorre de alguns aspectos da modelagem que guardam coerência com fenômenos empiricamente observados. Primeiramente, o efeito da captura de uma partícula pelo mecanismo da exclusão pelo tamanho é muito mais acentuado do que o efeito da captura dessa mesma partícula por deposição em outra ligação cuja vazão fosse a mesma. Essa diferença de efeitos chega a um extremo quando uma ou mais partículas (no caso, até 6 partículas, se for considerado que a razão de aspecto convencionalmente usada foi  $\psi = 6$ ), capturadas devido à exclusão pelo tamanho, fecham totalmente a ligação. É necessário um número muito maior de partículas para obstruir totalmente uma ligação somente por deposição. Em segundo lugar, quanto maior for uma partícula, maior será sua probabilidade de captura por deposição numa ligação entre poros. Essas duas características do modelo explicam os resultados obtidos, que é possível estender ao que ocorre em meios porosos reais: para um mesmo grau de afinidade eletrostática entre as partículas e as superfícies internas do meio poroso (ou seja, para

um mesmo  $\theta$ ), as partículas maiores têm uma maior probabilidade de serem capturadas por deposição, o que pode evitar que elas prossigam seu caminho no sistema poroso e venham a ser capturadas devido à exclusão pelo tamanho e, assim, gerar uma maior queda de permeabilidade. Também não se deve esquecer que, quanto menores os diâmetros das partículas presentes, maior é o seu número numa suspensão com a mesma concentração em massa. No exemplo da Figura 5.12, o número de partículas com diâmetro  $d_p = 1 \mu\text{m}$  é 3,375 vezes maior do que o de partículas com  $d_p = 1,5 \mu\text{m}$ .

### 5.3.2 – Suspensões polidispersas

Nas suspensões polidispersas, a média dos diâmetros das partículas nas distribuições A e B é de  $1 \mu\text{m}$ . As curvas referentes a essas distribuições e a uma suspensão monodispersa (M1) com  $d_p = 1 \mu\text{m}$  estão na Figura 5.13. Os desvios-padrão são  $0,5 \mu\text{m}$  (A),  $0,25 \mu\text{m}$  (B) e  $0 \mu\text{m}$  (M1). Na distribuição C, a média dos diâmetros das partículas é de  $0,5 \mu\text{m}$  e o desvio-padrão é de  $0,25 \mu\text{m}$ , igual ao da distribuição B. Os resultados obtidos com as distribuições B e C estão na Figura 5.14. Adotou-se a concentração em massa de  $100 \text{ ppm}$  para as partículas nas suspensões injetadas.

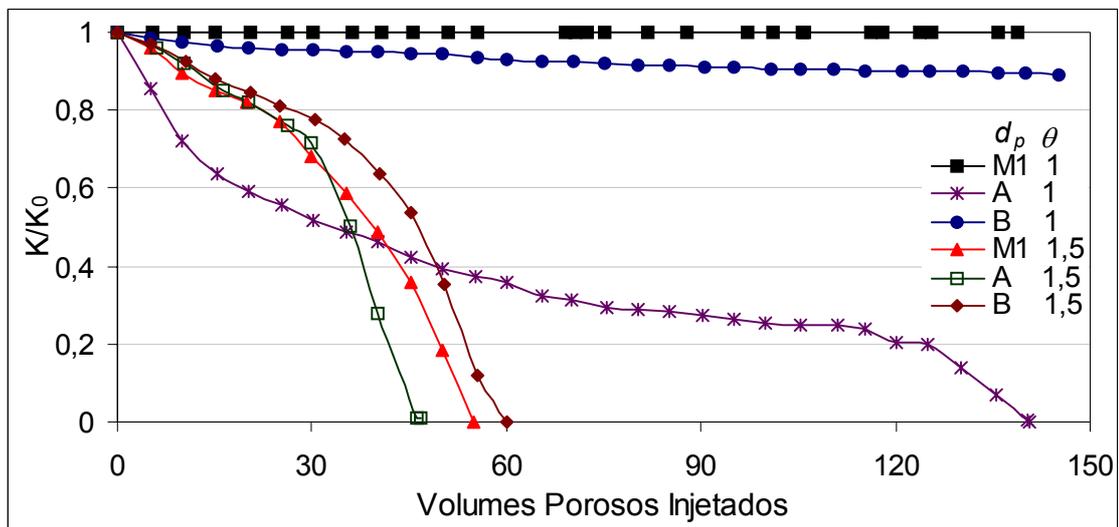


Figura 5.13: Efeito do desvio-padrão das distribuições de tamanhos de partículas sobre a queda de permeabilidade ( $\theta = 1$  e  $\theta = 1,5$ )

Comparando-se as curvas da Figura 5.13 referentes somente ao mecanismo de captura por exclusão pelo tamanho ( $\theta = 1$ ), verifica-se que, quanto maior o desvio-padrão da distribuição de partículas, maior a queda de permeabilidade. Com o aumento do desvio-padrão, aumenta o volume médio das partículas. Portanto, para a mesma concentração em massa, diminui o número das partículas injetadas (as suspensões com distribuição A e B têm, respectivamente, cerca de 7,8 e 3,1 vezes menos partículas que a M1). Por outro lado, porém, o tamanho e a frequência de geração de partículas maiores também aumenta, o que é determinante para o número de partículas capturadas devido à exclusão pelo tamanho e seu efeito sobre a permeabilidade.

Quando a captura por deposição ( $\theta = 1,5$ ) também é considerada, a interpretação dos resultados é menos imediata. Primeiramente, observa-se a fase inicial da injeção da suspensão A, quando a queda de permeabilidade é menor para  $\theta = 1,5$  do que para  $\theta = 1$ . Além disso, assim como no caso das suspensões monodispersas, não há uma tendência clara da queda de permeabilidade em função do valor do desvio-padrão da distribuição de tamanhos de partículas, nem do valor da média dessa distribuição, conforme mostram as curvas da Figura 5.14. Para identificar os elementos que dão origem a esses efeitos, valem as mesmas considerações feitas a respeito dos resultados representados na Figura 5.12 (Seção 5.3.1) e no parágrafo anterior.

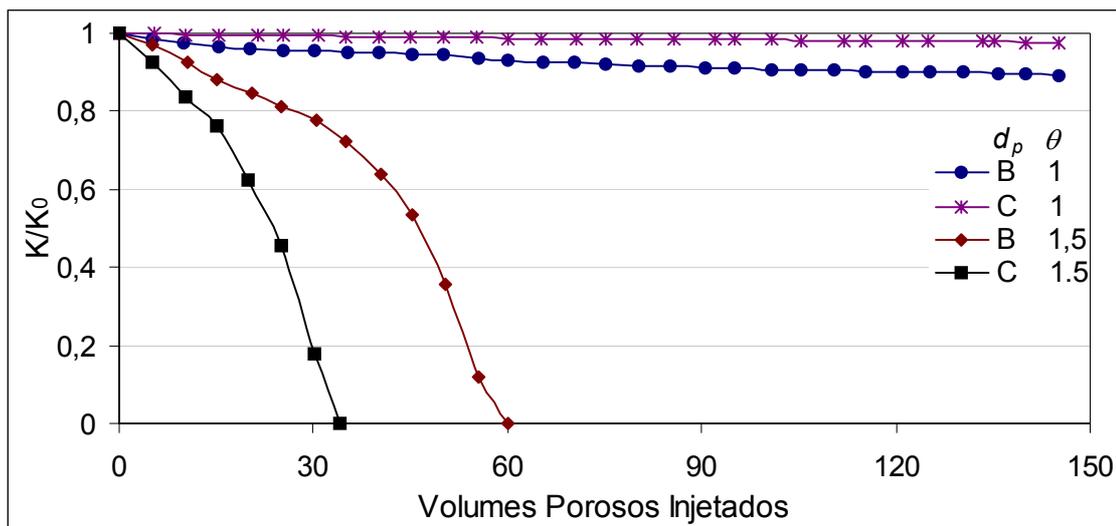


Figura 5.14: Efeito da média das distribuições de tamanhos de partículas sobre a queda de permeabilidade ( $\theta = 1$  e  $\theta = 1,5$ )

#### 5.4 – A influência da razão de aspecto das ligações

Na Figura 5.15, são apresentadas as curvas de queda de permeabilidade por captura de partículas para as razões de aspecto  $\psi = 3$  e  $\psi = 6$ , para o caso da injeção de uma suspensão monodispersa com  $d_p = 1 \mu\text{m}$ , a 35 ppm de concentração. Na Figura 5.16, são apresentadas as curvas correspondentes para a injeção de uma suspensão polidispersa com distribuição de diâmetros de partículas A (Tabela 5.1 e Figura 5.2), a 100 ppm de concentração. Essas concentrações mássicas diferentes foram escolhidas de modo a se ter o mesmo número de partículas por unidade de volume em ambas as suspensões.

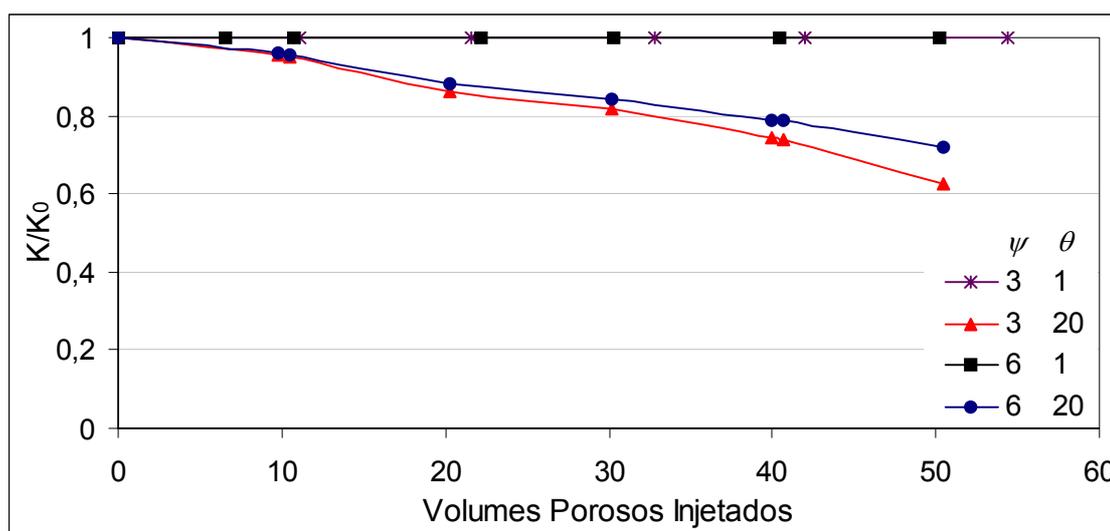


Figura 5.15: Suspensão monodispersa com  $d_p = 1 \mu\text{m}$ : efeito da razão de aspecto das ligações,  $\psi$ , sobre a queda de permeabilidade ( $\theta = 1$  e  $\theta = 20$ )

Para a suspensão monodispersa (Figura 5.15), observa-se que o efeito da razão de aspecto foi relativamente pequeno. Já para a suspensão polidispersa (Figura 5.16) o efeito foi muito acentuado. Na verdade, a diferença entre esses comportamentos não se deveu ao tipo de suspensão, mas à importância relativa que a captura por exclusão pelo tamanho apresenta frente à captura por deposição. Note-se que, mesmo no caso da suspensão polidispersa, não houve disparidade apreciável entre as curvas obtidas com  $\psi = 3$  e com  $\psi = 6$ , na fase inicial da injeção

para  $\theta=20$ . Essa discrepância só aumenta quando, por efeito da deposição, há o estreitamento da abertura das ligações e a exclusão pelo tamanho passa a assumir maior importância, o que também faz com que a permeabilidade passe a cair mais acentuadamente, até atingir o total colapso. Obviamente, para distribuições em que a exclusão pelo tamanho é importante por si só (como é o caso apresentado na Figura 5.16, ao contrário do da Figura 5.15), o efeito da razão de aspecto é importante mesmo quando  $\theta=1$ .

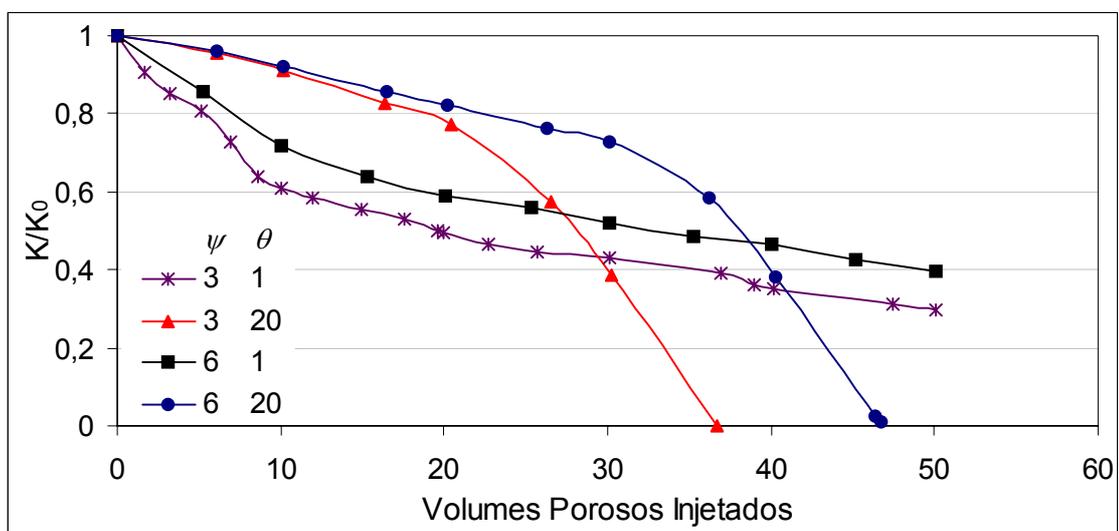


Figura 5.16: Suspensão polidispersa com distribuição de diâmetros de partículas A: efeito da razão de aspecto das ligações,  $\psi$ , sobre a queda de permeabilidade ( $\theta=1$  e  $\theta=20$ )

### 5.5 – Os efeitos da injeção a vazão ou pressão constante e da velocidade crítica, $v_{cr}$

A Figura 5.17 apresenta as curvas de queda de permeabilidade devida à captura de partículas por exclusão pelo tamanho e por deposição ( $\theta=20$ ), comparando os resultados da injeção a vazão constante com uma velocidade aparente de injeção (vazão/ área transversal ao fluxo) de 10 cm/h, com os da injeção a pressão constante (no caso, adotou-se uma pressão de injeção na rede tal que a velocidade aparente de injeção no início do teste fosse igual a 10 cm/h). Os resultados da Figura 5.17, assim como todos os anteriores, foram obtidos fixando-se uma velocidade crítica alta, de forma que o efeito da velocidade das partículas nas ligações sobre a probabilidade de captura por deposição pudesse ser considerado desprezível. Por esse motivo, a

variável de simulação citada até aqui foi  $\theta$ , e não  $\theta_0$  (ver Equação 2.5a e, no Apêndice, sua dedução). Adotou-se a distribuição de diâmetros de partículas A (Tabela 5.1 e Figura 5.2) e a concentração de partículas de 100 ppm.

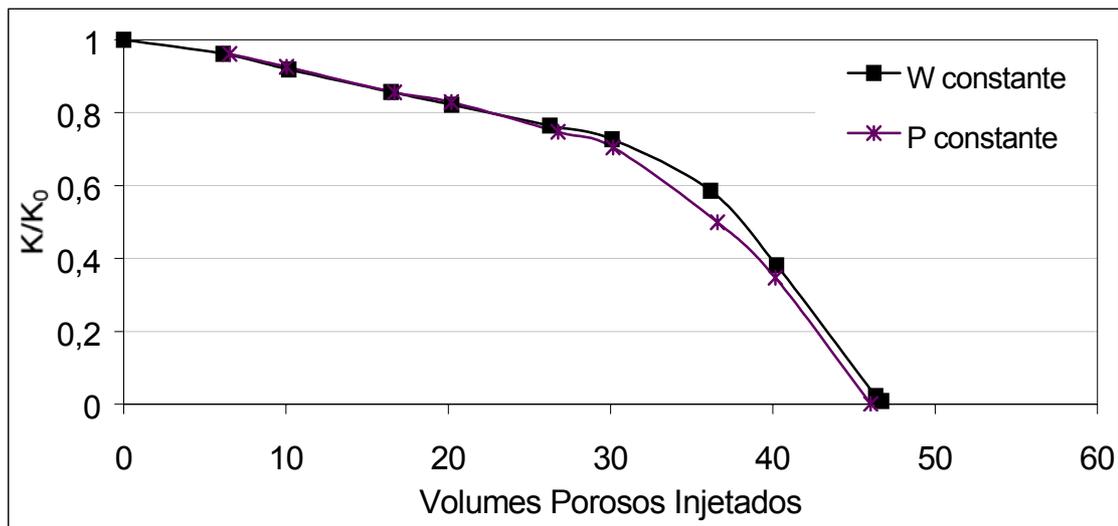


Figura 5.17: Efeito da velocidade aparente de injeção  $V_{ap}$  (vazão W constante) e da injeção a pressão constante sobre a queda da permeabilidade ( $\theta = 20$ )

A proximidade das duas curvas da Figura 5.17 é coerente com a não consideração dos efeitos de  $v_{cr}$  sobre a probabilidade de captura, pois a única diferença entre os dois casos é que, durante a injeção a pressão constante, a vazão varia com a queda da permeabilidade (e, assim também, a velocidade das partículas nas ligações).

A Figura 5.18 compara as quedas de permeabilidade ( $\theta_0 = 20$ ) para diversos valores de velocidade crítica  $v_{cr}$ , tanto na injeção a vazão constante como na injeção a pressão constante. A curva a vazão constante da Figura 5.17 foi repetida como base de comparação. A influência da velocidade crítica sobre o valor de  $\theta$  – e, conseqüentemente, sobre a probabilidade de deposição das partículas que, por sua vez, influencia a queda de permeabilidade – acentua-se bastante para baixos valores de  $v_{cr}$ . O comportamento da resposta aproxima-se, assim, daquele observado para a captura somente pela exclusão pelo tamanho (o que é esperado, pois quanto menor a velocidade crítica, menor o número de partículas capturadas por deposição nas ligações).

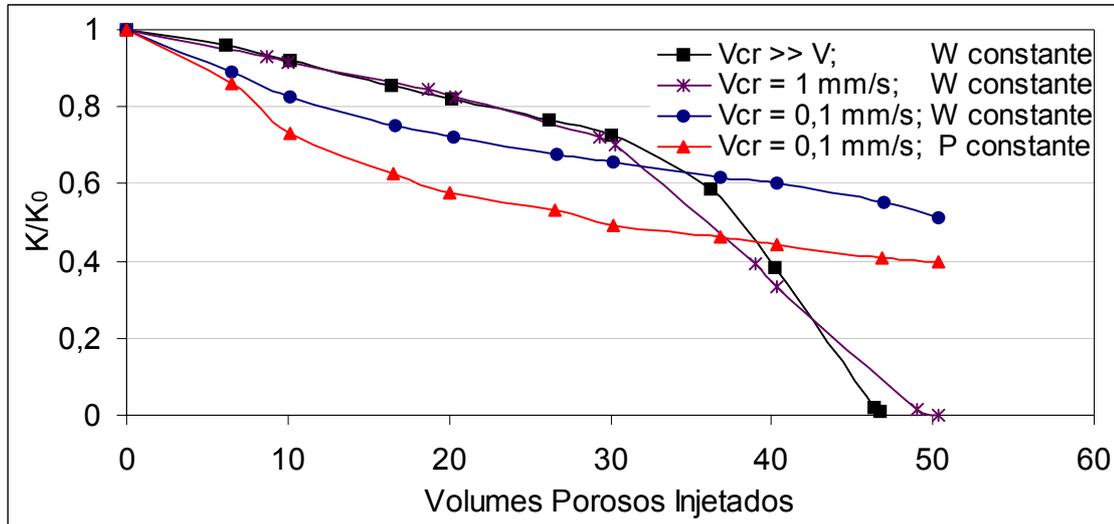


Figura 5.18: Efeito da velocidade crítica de captura,  $v_{cr}$ , na injeção a vazão constante e na injeção a pressão constante, sobre a queda da permeabilidade ( $\theta_0 = 20$ )

Na injeção a pressão constante, as velocidades das partículas nas ligações caem a uma taxa menor que a da queda da permeabilidade, enquanto que na injeção a vazão constante as velocidades das partículas sobem a uma taxa menor que a da queda de permeabilidade, diminuindo sua probabilidade de captura por deposição no decorrer do processo. Por isso, a queda de permeabilidade na injeção a pressão constante é mais acentuada que na injeção a vazão constante.

### 5.6 – A influência da componente gravitacional

A Figura 5.19 contém as curvas de queda de permeabilidade devida à captura de partículas por exclusão pelo tamanho e por deposição ( $\theta = 20$ ) na injeção a vazão constante, comparando os resultados obtidos com duas velocidades aparentes de injeção (10 e 0,1 cm/h) e duas densidades de partículas ( $1 \text{ g/cm}^3$  e  $5 \text{ g/cm}^3$ ). Adotou-se a distribuição de diâmetros de partículas A (Tabela 5.1 e Figura 5.2) e a concentração de 100 ppm para partículas com densidade de  $1 \text{ g/cm}^3$  (sem ação da gravidade, pois o valor da densidade do fluido também foi suposto ser de  $1 \text{ g/cm}^3$ ). Para

as partículas com densidade de  $5 \text{ g/cm}^3$ , a concentração foi de 500 ppm, de modo a manter igual o número de partículas e sua distribuição para ambas as densidades.

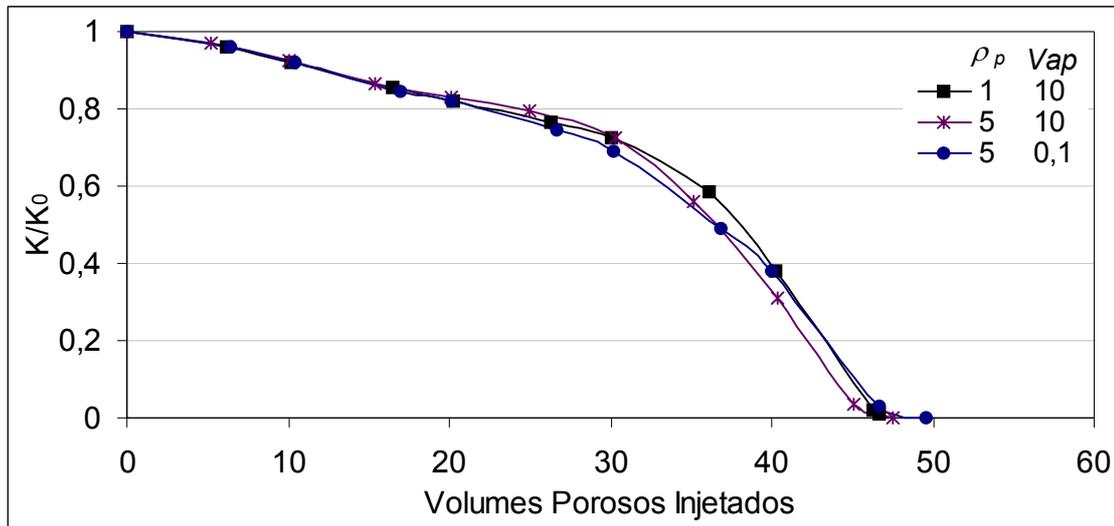


Figura 5.19: Efeito da componente gravitacional sobre a queda da permeabilidade ( $\theta = 20$ , direção macroscópica de fluxo horizontal,  $V_{ap}$  em cm/h,  $\rho_p$  em  $\text{g/cm}^3$ )

Mesmo com a redução da velocidade aparente de injeção em duas ordens de grandeza, observou-se não ser significativa a influência da componente gravitacional para os casos simulados, que incluíram, além dos apresentados na Figura 5.19, os de fluxo vertical para cima e para baixo, além da ação exclusiva do mecanismo de exclusão pelo tamanho ( $\theta = 1$ ). Comparando os valores das velocidades hidrodinâmicas com suas velocidades-limites gravitacionais (Equação 4.7), calculados para partículas de vários diâmetros e densidades, em diversas ligações, verificou-se que estas últimas são, quase sempre, muito menores que aquelas, o que justifica o pequeno impacto causado pela inclusão dessa componente sobre os resultados obtidos.

### 5.7 – Os efeitos da morfologia de deposição e da superfície específica do meio poroso

Conforme discutido na Seção 4.3.7, a modelagem da deposição de gotículas líquidas é diferente da referente a partículas sólidas. Para comparar o efeito desses dois tipos de partículas

sobre a queda de permeabilidade, foram realizadas diversas simulações. Uma amostra representativa dos resultados dessas simulações está nas Figuras 5.20 a 5.22.

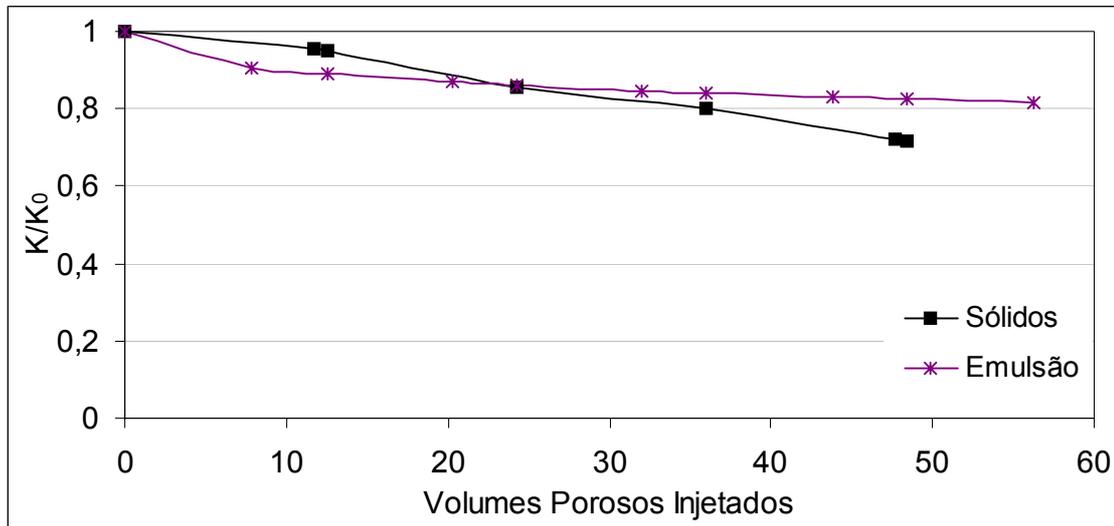


Figura 5.20: Efeito da morfologia da deposição de gotículas de uma emulsão, comparada à de partículas sólidas de mesmo diâmetro ( $d_p = 1,5 \mu\text{m}$ ),  $\theta = 1,5$

Na Figura 5.20 estão representados os resultados obtidos para suspensões monodispersas com partículas de  $1,5 \mu\text{m}$  de diâmetro, a uma concentração de 100 ppm, assumindo-se um meio poroso com a mesma superfície específica da rede. É considerável a diferença entre as curvas obtidas para suspensões de partículas sólidas e para gotículas de emulsões, com  $\theta = 1,5$ : para estas últimas, a queda é mais acentuada no início da injeção, passando a ser muito suave em sua fase mais avançada, comportamento oposto ao das partículas sólidas. A forte queda inicial pode ser explicada pelo preenchimento mais ou menos rápido da superfície das ligações mais próximas à face de injeção, o que evita que várias gotículas grandes nelas se depositem, permitindo que sejam capturadas devido à exclusão pelo tamanho em ligações localizadas mais internamente na rede. Outras dessas ligações têm aberturas maiores e não são totalmente obstruídas por essas gotículas, mas suas superfícies internas são progressivamente tomadas por gotículas capturadas por deposição. Quando essas superfícies estão totalmente ocupadas pelas gotículas, cessa a captura por deposição. Com o tempo, esse processo vai avançando até a rede estar totalmente saturada, ponto em que a permeabilidade se estabiliza, já que também a exclusão pelo tamanho

não pode mais ocorrer (no caso, a suspensão é monodispersa e, portanto, todas as partículas têm o mesmo diâmetro).

A Figura 5.21 mostra resultados similares aos anteriores, agora obtidos com  $\theta = 20$ , para suspensões polidispersas com distribuição de diâmetros A (Tabela 5.1 e Figura 5.2), a uma concentração de 100 ppm, assumindo-se um meio poroso com a mesma superfície específica da rede. Valem as mesmas considerações feitas para os resultados apresentados na Figura 5.20, observando-se, porém, que para a suspensão polidispersa não há a mesma estabilização da permeabilidade na fase mais adiantada da simulação, em parte porque a captura por exclusão pelo tamanho continua a ser significativa também nessa etapa, o que certamente também contribui para o colapso da permeabilidade na curva referente às partículas sólidas.

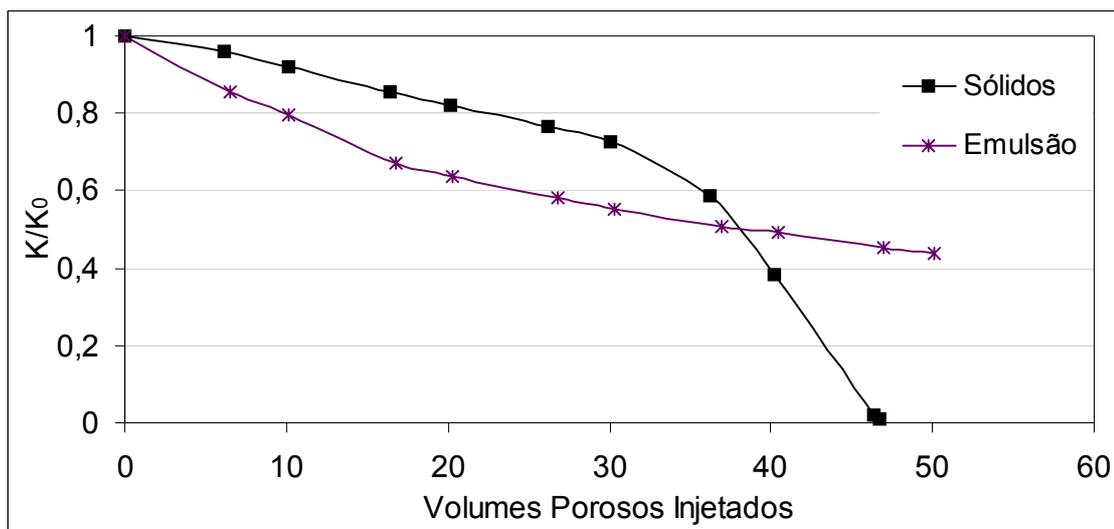


Figura 5.21: Efeito da morfologia da deposição de gotículas de uma emulsão comparada à de partículas sólidas com a mesma distribuição de diâmetros, para  $\theta = 20$

Na Figura 5.22, são apresentados os resultados obtidos para suspensões polidispersas com distribuição de diâmetros C (Tabela 5.1 e Figura 5.2), a uma concentração de 25 ppm, comparando o caso de um meio poroso que tem a mesma superfície específica da rede a outro meio poroso cuja superfície específica vale 5 vezes a da rede. Foi adotado  $\theta = 1,5$ . Para a relação entre os resultados referentes a suspensões de partículas sólidas e gotículas líquidas, valem os

mesmos comentários anteriores. Observe-se também a forte influência da superfície específica do meio poroso sobre a queda de permeabilidade, influência essa que os modelos anteriormente publicados não eram capazes de detectar.

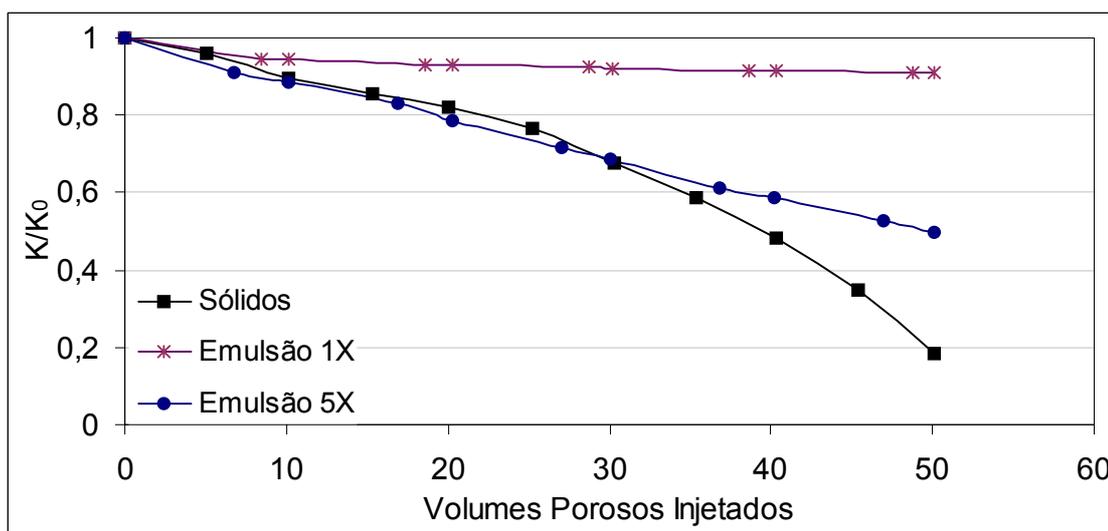


Figura 5.22: Efeito da morfologia da deposição de gotículas de uma emulsão comparada à de partículas sólidas com a mesma distribuição de diâmetros, para dois valores da superfície específica do meio poroso (igual à da rede e 5 vezes a da rede), com  $\theta = 1,5$

## Capítulo 6

### Comparação de Resultados Experimentais com os Simulados

Neste capítulo são apresentados os resultados de simulações e seu ajuste a dois conjuntos de dados experimentais disponíveis, sendo o primeiro proveniente de resultados ainda não publicados de ensaios laboratoriais de injeção de uma suspensão em uma amostra de arenito Berea, e o outro dos trabalhos de Soo e Radke (1984a, 1985), consistindo no escoamento de uma emulsão de óleo em água através de um pacote de areia.

#### **6.1 – Injeção de água com partículas em amostra do arenito Berea**

Os ensaios laboratoriais em amostra do arenito Berea foram realizados em 1999, no Laboratório de Tecnologia de Injeção de Águas e Interação Rocha-fluidos, da Divisão de Reservas e Reservatórios do Centro de Pesquisas e Desenvolvimento da Petrobras (Milanez, 1999).

O arenito Berea tem sido usado desde os anos 1950 como o material padrão mais comum para pesquisa laboratorial em recuperação de petróleo. É um arenito de idade Devoniana, aflorante no estado de Ohio, EUA. Sua granulometria é fina e bem selecionada e apresenta estratificação em camadas planares pouco espaçadas.

A distribuição dos tamanhos de partículas presentes na suspensão injetada, representada na Figura 6.1, foi determinada por intermédio de um contador de partículas, da marca Galai, modelo Cis 1002, que mede as partículas em fluxo durante a injeção. A suspensão, cuja concentração era de 2 ppm em volume, foi obtida pela simples adição de 40000 ppm de NaCl em água destilada,

sendo que as partículas presentes resultaram da presença de impurezas no sal ou na corrente proveniente do destilador. Não foi determinada a natureza dessas partículas, nem sua densidade e a da suspensão. A viscosidade da suspensão era de 1,04 cP na temperatura de teste (25 °C).

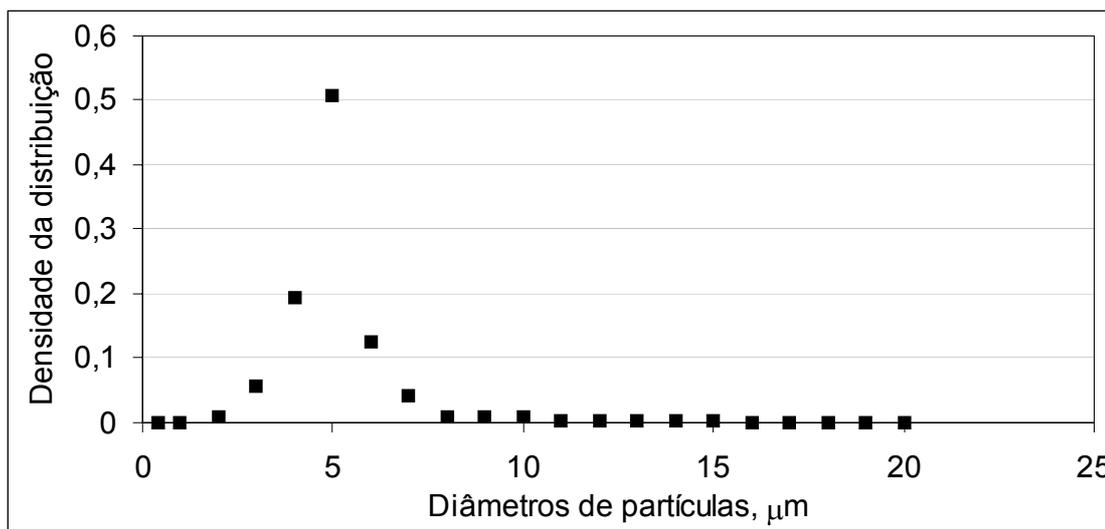


Figura 6.1: Distribuição de diâmetros de partículas injetadas na amostra do arenito Berea

### 6.1.1 – Caracterização morfo-topológica dos poros a partir da análise de imagens

As Figuras 3.2 e 3.3 são exemplos, respectivamente, de uma imagem colorida e sua correspondente binarizada, de uma lâmina petrográfica do arenito Berea, obtida em posição próxima à da amostra em que foi injetada a suspensão de partículas sólidas.

No Laboratório de Análise de Imagens da Divisão de Reservas e Reservatórios do Centro de Pesquisas e Desenvolvimento da Petrobras, o conjunto de imagens obtidas com o aumento de 25 vezes foi processado por intermédio do programa *VCLab* (Rodrigues, 1999), tendo sido obtidas as distribuições das dimensões características de gargantas ( $b_i$ ) e de poros ( $b_b$ ) mostradas nas Figuras 6.2 (densidade da distribuição) e 6.3 (distribuição acumulada). O número de coordenação médio obtido foi  $Z = 3,67$ . A porosidade da rocha estimada pela análise de imagens foi de  $\phi = 0,214$ . Já a porosidade do plugue do arenito Berea no qual foi injetada a suspensão,

medida com um porosímetro por expansão de gás, baseado na lei de Boyle, foi de  $\phi = 0,239$  (Milanez, 1999).

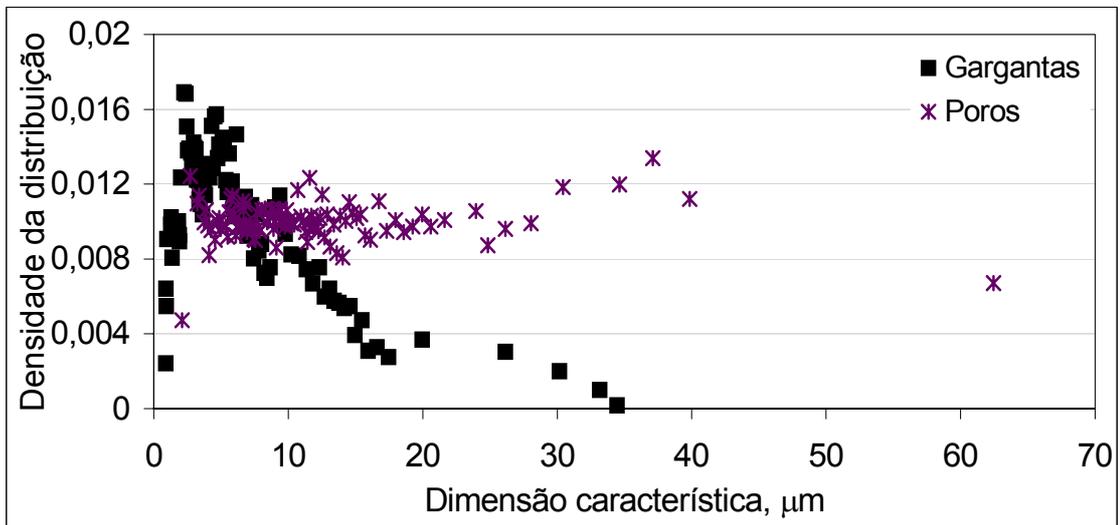


Figura 6.2: Distribuições das dimensões características das gargantas e dos poros obtidas a partir da reconstrução estocástica virtual de amostra do arenito Berea

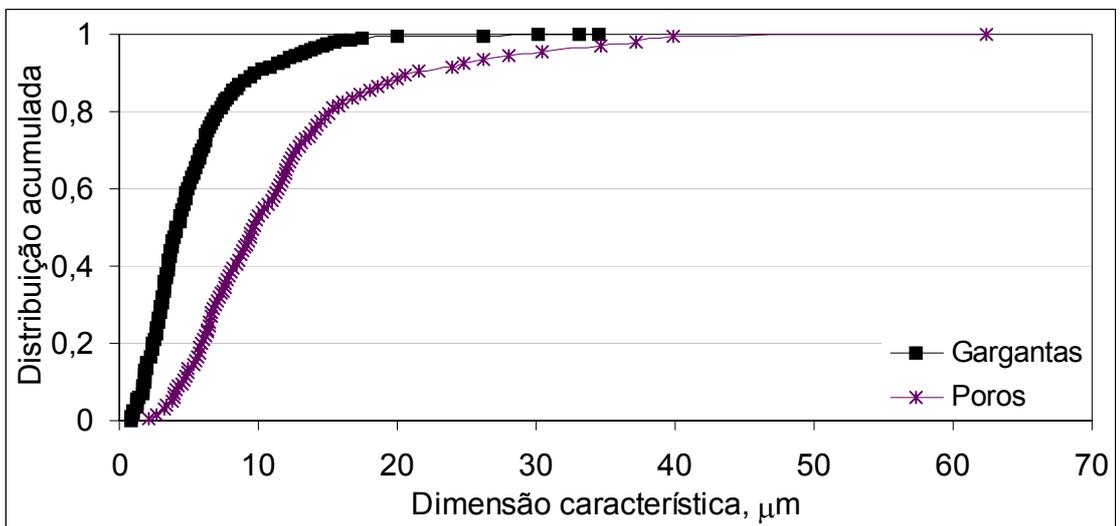


Figura 6.3: Distribuições acumuladas das dimensões características das gargantas e dos poros obtidas a partir da reconstrução estocástica virtual de amostra do arenito Berea

### 6.1.2 – Resultados da simulação de escoamento

A permeabilidade ao gás da amostra de rocha antes da injeção da suspensão foi medida, chegando-se a  $k = 1568$  mD (valor não corrigido para o efeito Klinkenberg) e sua permeabilidade à água foi de 651 mD (Milanez, 1999). Quanto à permeabilidade original do meio, calculada usando o modelo de rede, foi de 587 mD (para  $\psi = 6$ ). A Figura 6.4 mostra a comparação entre a curva experimental de queda de permeabilidade durante a injeção no plugue do arenito Berea e a curva obtida na simulação. Não foi possível ajustar a curva do modelo de rede à experimental, mesmo usando uma ampla gama de valores do parâmetro de ajuste  $\theta$ , desde 1 (valor para o qual somente o mecanismo de captura por exclusão pelo tamanho estaria atuando), até  $\theta = 100$  (para o qual sempre ocorre a captura de todas as partículas injetadas, seja por exclusão pelo tamanho, seja por deposição nas ligações da rede). A curva simulada da Figura 6.4 refere-se a  $\theta = 100$ , mas praticamente não se diferencia da obtida para  $\theta = 1$ .

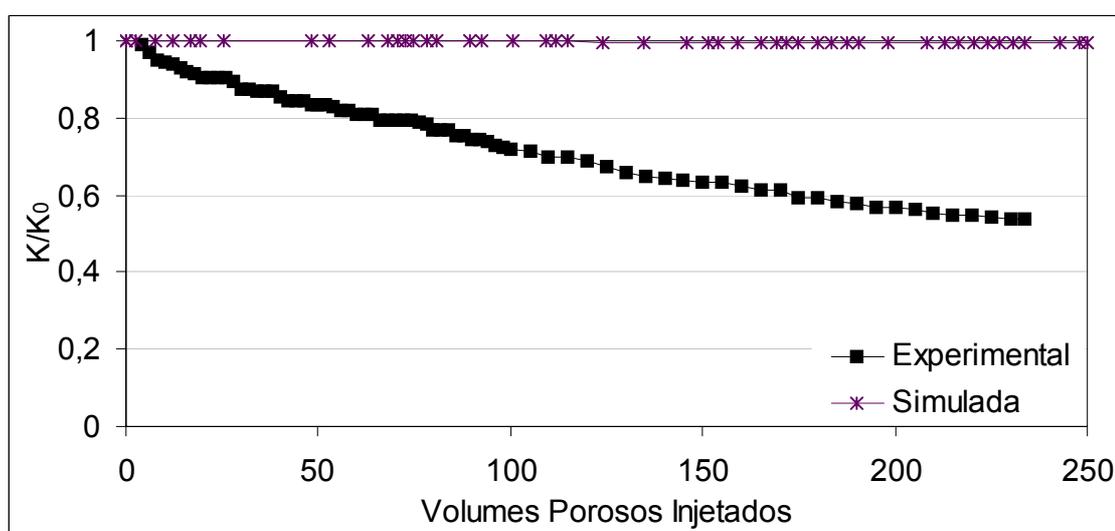


Figura 6.4: Comparação das quedas de permeabilidade experimental e simulada para a amostra do arenito Berea

São várias as hipóteses que podem ser aventadas para justificar esse comportamento, podendo ser agrupadas dentro de duas categorias: a das questões referentes aos dados experimentais e a dos aspectos de modelagem.

Quanto aos dados experimentais, o contador de partículas usado não estava aferido, o que pode ter gerado erros na distribuição dos tamanhos de partículas e/ou na concentração da suspensão. Como relatado no Capítulo 5, ambos os aspectos podem trazer fortes impactos nas respostas do simulador (ver as Figuras 5.13 e 5.14 para os efeitos da distribuição de diâmetros de partículas e 5.10 para a influência da concentração).

Um outro questionamento ligado a aspectos experimentais é o da diferença entre a localização da amostragem do arenito Berea para a confecção da lâmina petrográfica, usada para a reconstrução virtual do meio poroso, e a da plugagem da amostra em que foi injetada a suspensão. Apesar da homogeneidade do arenito Berea, em escala macroscópica, sabe-se que, mesmo para pequenas distâncias (da ordem de poucas dezenas de centímetros), podem ocorrer diferenças significativas entre as características morfo-topológicas do espaço poroso de rochas sedimentares.

Com referência à modelagem, ressalte-se o problema de resolução diagnosticado por Gasperi (1999), quanto à dependência das distribuições de dimensões características de poros e de gargantas, obtidas no processo de reconstrução virtual do meio poroso, com referência ao aumento utilizado para o exame de imagens ao microscópio. Observa-se, por conta disso, um estreitamento das distribuições obtidas, o que leva as curvas de pressão capilar simuladas em redes construídas com essas distribuições a terem todas uma forma muito semelhante, destacando-se um extenso patamar, em um valor de pressão capilar tanto mais alto quanto maior a resolução. Isso indica não somente que o menor tamanho de garganta detectado no meio reconstruído depende do aumento usado para a análise das imagens, mas principalmente que o processo estocástico de reconstrução do espaço poroso contribui para o estreitamento das citadas distribuições ao trabalhar com valores médios de todas as imagens analisadas. Também conforme citado por Gasperi, esses problemas podem afetar menos a modelagem de algumas propriedades, e mais a de outras, podendo ser este o caso da queda de permeabilidade do meio poroso devida ao escoamento de fluidos particulados. Na situação estudada, não há como superar esse problema, pois embora o aumento usado seja considerado adequado à caracterização do meio, aparentemente os tamanhos típicos das gargantas obtidas são grandes demais em relação aos diâmetros das partículas injetadas, o que torna pouco significativos os efeitos das capturas destas.

## 6.2 – Injeção de emulsão em pacote de areia (Soo e Radke; 1984a, 1985)

Apesar de haver uma farta literatura sobre o escoamento de fluidos particulados em meios porosos, são raros os trabalhos publicados contendo informações mínimas necessárias sobre testes laboratoriais, de modo a permitirem uma adequada simulação destes através de modelos de rede. Conforme esperado, dado o ineditismo da abordagem aqui proposta, em nenhum trabalho anterior os resultados de testes de injeção de fluidos particulados em meios porosos foram associados a uma caracterização morfo-topológica do meio que abrangesse suas distribuições de tamanhos de poros e de gargantas, bem como seu número de coordenação médio.

Os trabalhos de Soo e Radke (1984a, 1985) contêm resultados experimentais que, embora incompletos com relação a diversas variáveis consideradas nesta modelagem, fornecem um ponto de partida para que se possa testar a adequação dos parâmetros de ajuste,  $\theta_0$  e  $v_{cr}$ , para a previsão do comportamento da permeabilidade do meio, quando submetido à injeção de suspensões com diferentes distribuições de tamanhos de partículas. Rege e Fogler (1988) também compararam os resultados de seu modelo com os desses trabalhos.

Nos ensaios laboratoriais realizados por Soo e Radke, emulsões estáveis diluídas de óleo em água foram injetadas em pacotes de areia com características controladas. No presente estudo, somente foram simulados os resultados obtidos nos ensaios identificados por Soo e Radke como Corrida 1 e Corrida 2. As distribuições (em volume e em número) dos diâmetros de gotas de óleo presentes na emulsão injetada na Corrida 1 estão na Figura 6.5, enquanto as referentes à Corrida 2 estão na Figura 6.6. Observe-se que a distribuição de tamanhos de gotas da Corrida 1 é menos dispersa e que seu diâmetro médio é menor que o da Corrida 2.

Para evitar a separação das fases presentes por efeitos gravitacionais, os autores usaram um óleo com a mesma densidade da água da emulsão. As emulsões continham fase óleo a uma concentração de 5000 ppm. As viscosidades das emulsões e a da fase água não foram informadas, tendo sido adotado nas presentes simulações um mesmo valor (1 cP) para ambas.

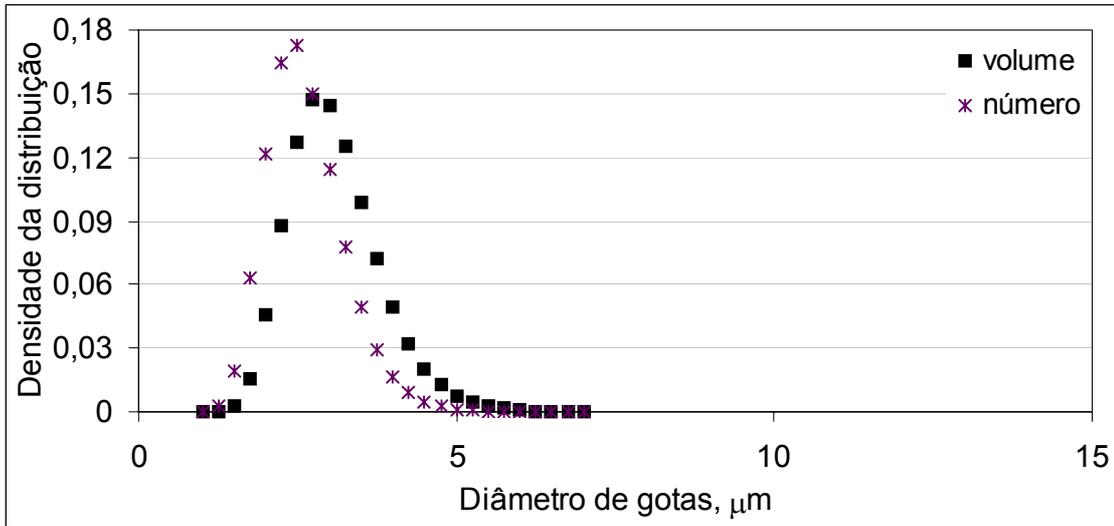


Figura 6.5: Distribuições (em volume e em número) dos diâmetros de gotas de óleo da Corrida 1

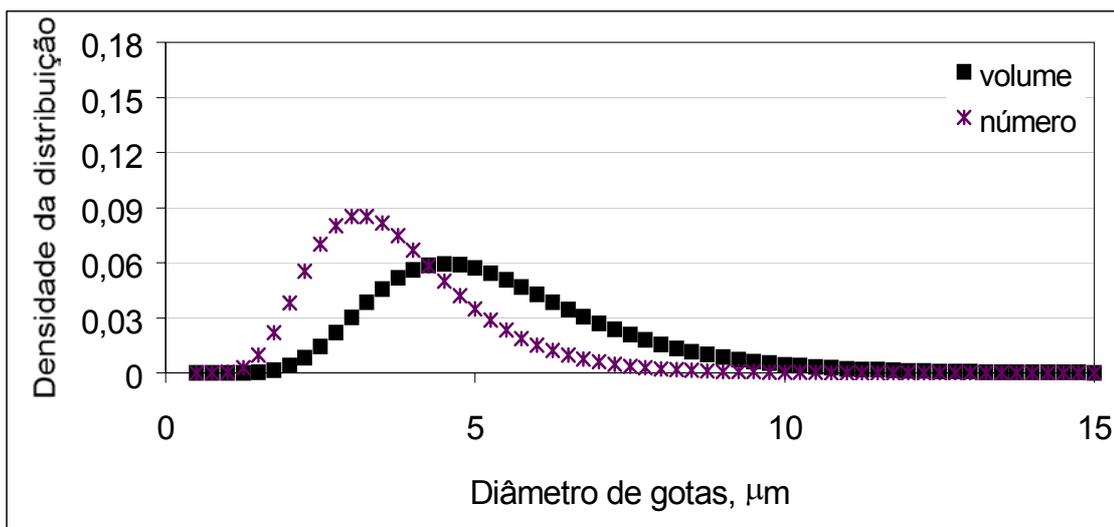


Figura 6.6: Distribuições (em volume e em número) dos diâmetros de gotas de óleo da Corrida 2

Segundo os autores, o diâmetro médio dos grãos do pacote de areia em que foram injetadas as emulsões era de  $75 \mu\text{m}$ . A superfície específica do pacote de areia não foi informada, tendo sido estimada, neste trabalho, em  $0,06 \mu\text{m}^{-1}$ , valor aproximado da superfície específica de um pacote de grãos iguais, com  $75 \mu\text{m}$  de diâmetro equivalente e 0,9 de esfericidade (razão entre a superfície da esfera com o diâmetro equivalente e a do grão - os grãos da areia de Ottawa, usados por Soo e Radke, têm alta esfericidade), tendo uma porosidade  $\phi = 0,31$  (fornecida pelos autores).

### 6.2.1 – Caracterização da morfo-topologia dos poros a partir de curvas de pressão capilar

Nos trabalhos de Soo e Radke (1984a, 1985), somente estão publicadas as distribuições, em volume, dos poros acessíveis correspondentes a cada valor do diâmetro das gargantas que lhes dão acesso. Tais distribuições foram calculadas usando resultados de análises de pressão capilar (obtidos a partir do deslocamento de água por ar, em ensaios de centrifugação). Assim, foram adotados os procedimentos descritos na Seção 3.3 para chegar ao número de coordenação médio e às distribuições de tamanhos de poros e gargantas usados em cada caso simulado.

A partir da porosidade medida no meio poroso e aplicando a Equação 3.7, foi calculado o número de coordenação médio deste,  $Z = 3,7$ . As distribuições de dimensões características dos nós (poros) e das ligações (gargantas) adotadas nas simulações estão nas Figuras 6.7 e 6.8, respectivamente.

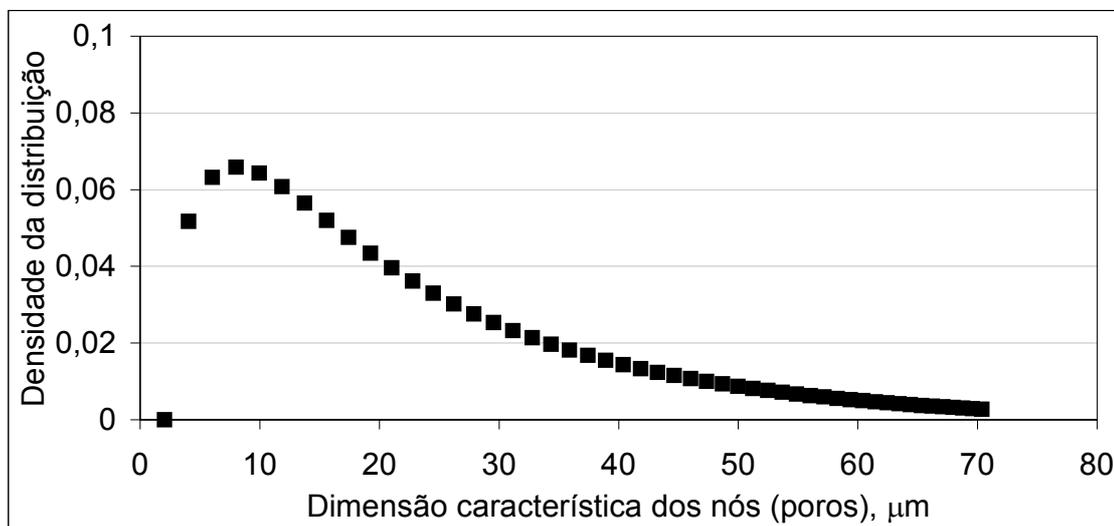


Figura 6.7: Distribuição em número das dimensões características dos nós (poros) do pacote de areia (Soo e Radke; 1984a, 1985)

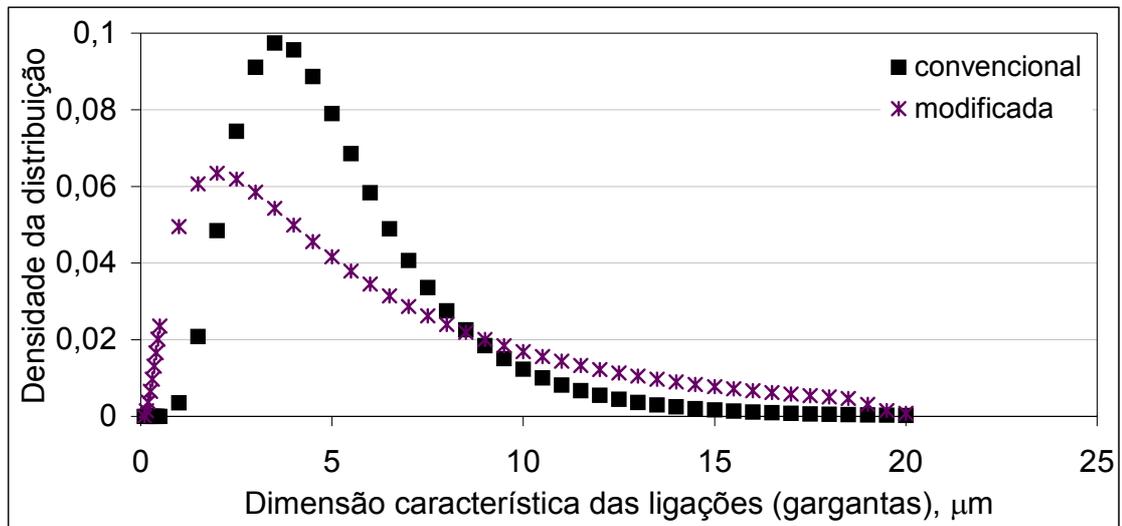


Figura 6.8: Distribuições em número, convencional e modificada, das dimensões características das ligações (gargantas) do pacote de areia (Soo e Radke; 1984a, 1985)

Observe-se que a Figura 6.8 inclui, ainda, a curva da distribuição de dimensões características de gargantas (transformada de uma distribuição em volume para uma distribuição em número) resultante do tratamento convencional dos dados de pressão capilar. Na curva modificada segundo as operações descritas na Seção 3.3, verifica-se o aumento da frequência de poros menores e o alargamento da distribuição, com relação à curva convencional.

### 6.2.2 – Resultados da simulação de escoamento

A permeabilidade à água do pacote de areia antes da injeção da suspensão era de 578 mD. Optou-se, nas simulações deste caso, por adotar o valor de  $\psi$  que levasse a permeabilidade original da rede a igualar-se à do meio poroso, chegando-se a  $\psi = 1,9$ . A Figura 6.9 mostra a curva experimental de queda de permeabilidade para a Corrida 1 e a curva ajustada pela simulação, obtida com os parâmetros  $\theta_0 = 1,02$  e  $v_{cr} = 1,4$  mm/s. Na Figura 6.10, são comparadas as curvas experimental e simulada correspondentes à Corrida 2, usando os valores acima para os parâmetros  $\theta_0$  e  $v_{cr}$ .

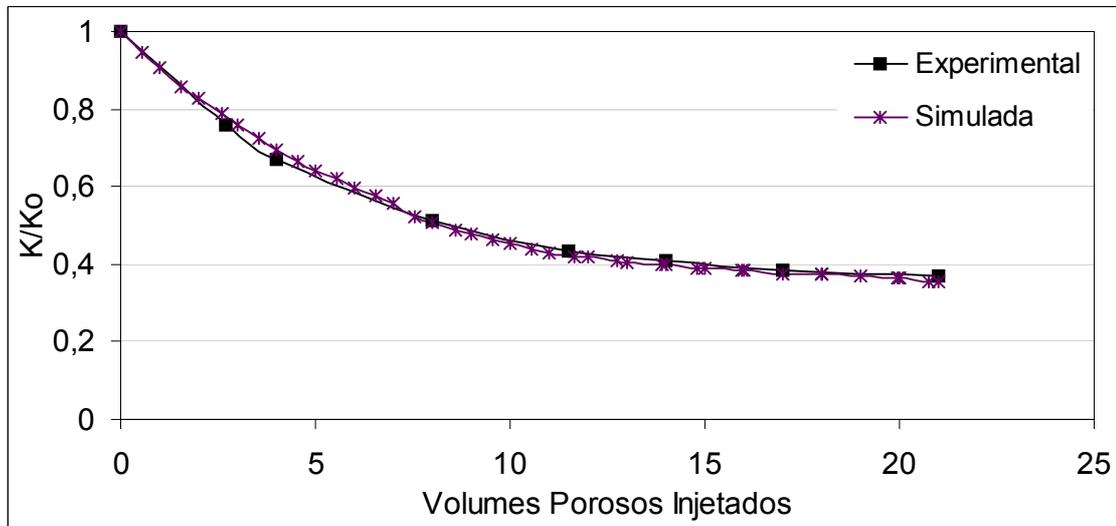


Figura 6.9: Corrida 1 (Soo e Radke; 1984a, 1985): comparação das quedas de permeabilidade experimental e simulada com  $\theta_0 = 1,02$  e  $v_{cr} = 1,4$  mm/s

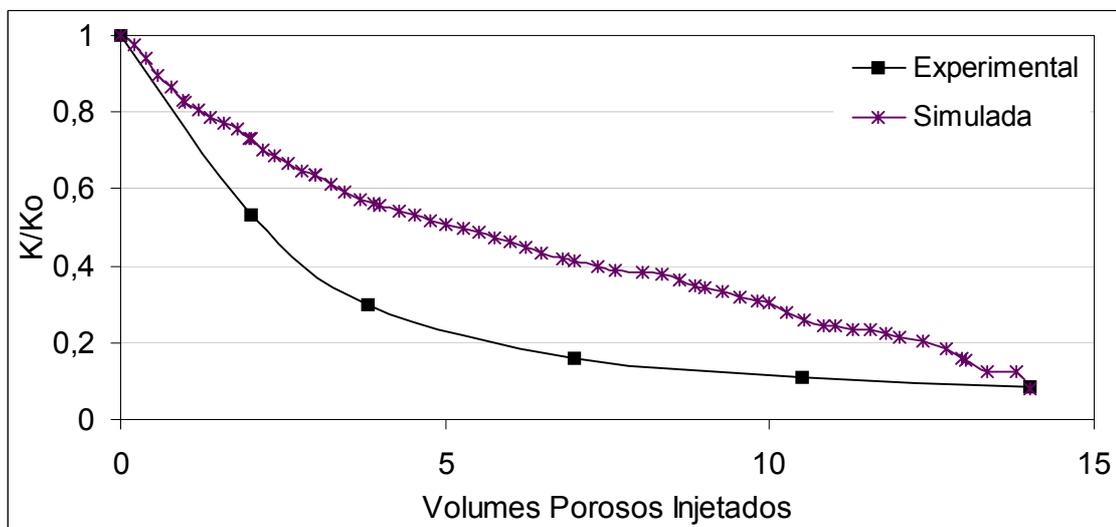


Figura 6.10: Corrida 2 (Soo e Radke; 1984a, 1985): comparação das quedas de permeabilidade experimental e simulada com  $\theta_0 = 1,02$  e  $v_{cr} = 1,4$  mm/s

As corridas 1 e 2 foram executadas com o mesmo meio poroso e com a mesma fase óleo, somente diferindo a distribuição dos diâmetros das gotículas. Essa seria a situação ideal para testar a capacidade do modelo para prever a queda de permeabilidade do meio poroso, devida a uma dada distribuição de diâmetros de partículas, conhecendo-se de

antemão a queda decorrente de outra distribuição de tamanhos de partículas. No entanto, a observação da Figura 6.10 mostra que, para o caso examinado, essa capacidade de previsão é fraca. Também aqui pode-se agrupar os tipos de problemas que estariam ocorrendo em duas vertentes: a das questões referentes aos dados empíricos e a dos aspectos de modelagem.

Quanto aos dados empíricos, o primeiro fator prejudicial ao estudo realizado são as lacunas nos dados publicados por Soo e Radke, que tiveram que ser supridas assumindo-se, para diversas variáveis, valores baseados em critérios técnicos consistentes, mas sujeitos a flutuações importantes. É o caso, por exemplo, da correlação (Equação 3.7) adotada para calcular o número de coordenação médio,  $Z$ , parâmetro cujo efeito sobre as respostas das simulações é considerável, conforme demonstra a análise realizada na Seção 5.2. Outro aspecto que pode ter influenciado os resultados experimentais, mas que foge das hipóteses assumidas para a modelagem é que, no caso de partículas fluidas, tais como as gotículas de óleo da emulsão injetada, existe não somente a possibilidade de deformação das partículas (permitindo, por exemplo, sua passagem por uma abertura de garganta menor que seu diâmetro original), mas também, no limite dessa deformação, sua quebra em partículas menores, o que alteraria a distribuição de partículas fluindo no interior do meio poroso, com relação à distribuição original injetada. Em outro trabalho, Soo e Radke (1984b) estudaram os efeitos da velocidade no escoamento de emulsões através de meios porosos, citando a relação entre as forças hidrodinâmicas (viscosas) e as forças capilares como determinante para o nível de ocorrência desses eventos.

Com referência à modelagem, várias questões podem ser levantadas. A principal delas é que, para que o ajuste simultâneo das curvas de ambas as corridas fosse possível, seria necessária uma maior diferença da frequência relativa de captura de partículas por exclusão pelo tamanho entre as corridas 1 e 2. Supondo estarem corretas as distribuições de tamanhos de gotículas de óleo publicadas por Soo e Radke, esse ajuste somente poderia ser obtido se a distribuição das aberturas das gargantas dos poros do pacote de areia não fosse a mesma adotada nas simulações (sendo as aberturas reais mais baixas que as que foram assumidas). Se outros critérios, diferentes dos descritos na Seção 3.3, fossem utilizados, poderia ser gerada uma distribuição com essas características. Porém, a escolha desses critérios teria que ter uma fundamentação técnica pelo menos tão consistente quanto a que foi aqui seguida, e que permitisse sua adoção generalizada,

independentemente do caso específico que estivesse sendo estudado. Conforme discutido no Capítulo 3, tais critérios, caso sejam exequíveis, ainda não estão disponíveis. Por outro lado, está fora do escopo do presente trabalho desenvolvê-los.

Outro aspecto (que poderia ser incluído em futuras modelagens) é o da possibilidade de que, por efeito hidrodinâmico, partículas depositadas venham, subseqüentemente, a ser liberadas e reincorporadas ao fluxo. Essa possibilidade poderia ser acrescentada ao presente modelo por intermédio, por exemplo, da abordagem formulada por Gohr Pinheiro (1996), sucintamente descrita na Seção 2.3.5. A conveniência dessa incorporação foi aventada após a análise dos resultados de várias tentativas de ajustar as curvas simuladas para a Corrida 2 à curva experimental. Foi constatado que, invariavelmente, a permeabilidade da rede cai abruptamente até o total colapso quando a curva da razão  $k/k_0$  atinge valores pouco menores que 0,2. Um exemplo desse comportamento é mostrado na Figura 6.11, em que a curva simulada foi obtida com  $\theta_0 = 1,04$  e  $v_{cr} = 1,5$  mm/s. Tanto a deformabilidade das gotículas de óleo, quanto a liberação hidrodinâmica das partículas e sua reintrodução nas correntes de fluxo no interior da rede podem ser responsáveis pela inviabilidade de ajuste nas etapas de baixa permeabilidade.

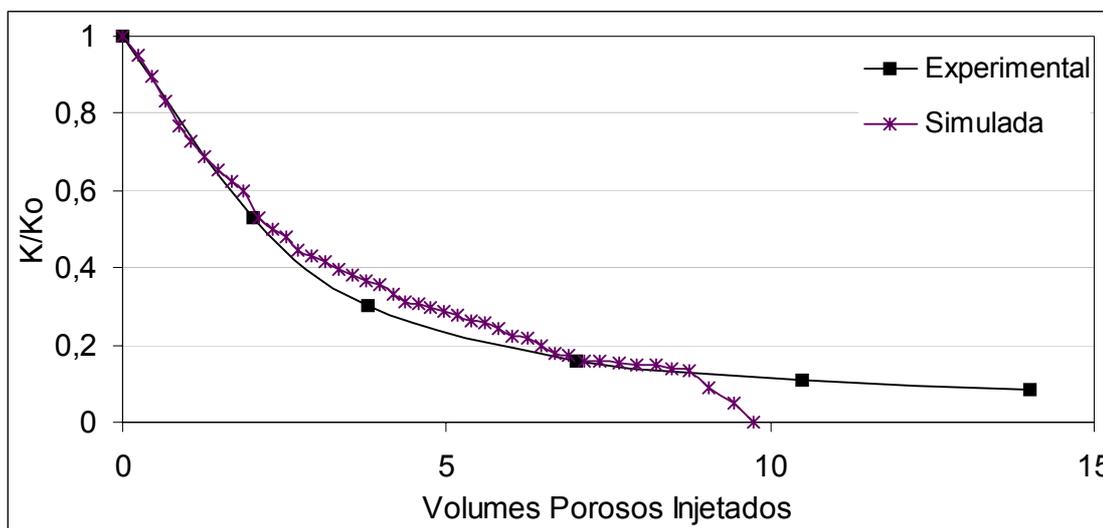


Figura 6.11: Corrida 2 (Soo e Radke; 1984a, 1985): comparação das quedas de permeabilidade experimental e simulada com  $\theta_0 = 1,04$  e  $v_{cr} = 1,5$  mm/s

## Capítulo 7

### Conclusões e Sugestões

A seguir, são apresentadas as principais conclusões do presente trabalho e sugeridos alguns temas para investigações posteriores, visando ao aprimoramento da modelagem aqui proposta.

Nos trabalhos publicados anteriormente, mesmo os mais sofisticados modelos de rede para o escoamento de fluidos particulados são incapazes de produzir uma estimativa razoável da permeabilidade original dos meios simulados. Isso ocorre porque tais modelos não incorporam, de maneira integrada, as características morfo-topológicas do espaço poroso relevantes para o fluxo, quais sejam as distribuições de tamanhos de poros e gargantas, bem como a conectividade do meio poroso. A disponibilidade de ferramentas práticas para avaliar tais características, a partir do exame de meios porosos reais, é recente.

Destacam-se, a seguir, os principais aperfeiçoamentos propostos no presente trabalho, relativamente aos modelos anteriores:

O modelo de rede ora apresentado incorpora várias das principais características morfo-topológicas do espaço poroso. Tais características compreendem a porosidade, a distribuição de tamanhos de gargantas e de poros e o número de coordenação médio do meio poroso reconstruído. Isso permite a este modelo reproduzir as propriedades de percolação do meio com maior fidelidade que os anteriores, o que é essencial para simular adequadamente o escoamento

de fluidos particulados, onde se verifica uma obstrução progressiva dos elementos constitutivos do espaço poroso;

A forma geométrica retangular da seção transversal das ligações, mais representativa das fendas que constituem as gargantas entre os poros, também aumenta a capacidade de modelagem adequada do processo estudado;

A rede construída de acordo com as características citadas é o primeiro modelo publicado a possibilitar a aplicação de condições de teste (vazões e pressões) representativas das que ocorrem nas aplicações práticas. Nos modelos anteriores, as respostas obtidas sob diferentes condições podiam ser comparadas, mas os resultados de simulações individuais não eram significativos em si mesmos: podiam ser simulados, por exemplo, processos a vazão ou a pressão constante, mas sem que se soubesse qual a vazão ou a pressão de injeção que lhes corresponderiam no meio real.

Em conjunto com as características da rede, os critérios adotados para a geração de partículas permitem a reprodução adequada da concentração e da taxa de fluxo de partículas na suspensão injetada em função das condições de teste e do volume de fluido injetado, expresso em número de volumes porosos originais.

Os critérios de movimentação de partículas usados permitem a consideração das componentes hidrodinâmica e gravitacional do fluxo de partículas. Para a captura de partículas, foram adaptados critérios que, além de computacionalmente eficientes, incorporam resultados obtidos em simulações numéricas de trajetórias de partículas.

Os efeitos das partículas capturadas sobre o campo de fluxo foram considerados por intermédio de expressões aplicadas em modelos anteriores. No entanto, foi preciso deduzir formulações específicas para a geometria retangular das seções transversais das ligações.

Foram analisadas as influências das variáveis consideradas no presente trabalho para a simulação do escoamento de fluidos particulados em meios porosos. Apesar da impossibilidade de um maior aprofundamento nas questões levantadas pela identificação de efeitos significativos do tamanho do modelo de rede utilizado, a consciência dos problemas envolvidos trouxe subsídios para a adoção de alguns procedimentos necessários não para eliminá-los, mas para circunscrevê-los em limites tratáveis.

Os resultados do Capítulo 5 mostram que, à exceção dos efeitos gravitacionais, todos os demais fatores testados são relevantes nos processos simulados, destacando-se o número de coordenação médio,  $Z$ , a razão de aspecto das ligações,  $\psi$ , e a superfície específica do meio submetido à injeção de emulsões, cuja influência não havia sido adequadamente considerada nas modelagens anteriormente publicadas.

Os fortes efeitos de diversas variáveis sobre as respostas do simulador mostra ser fundamental a adoção de procedimentos experimentais rigorosos nos ensaios laboratoriais de injeção de suspensões em meios porosos. Outro requisito importante é o de procurar medir todos os parâmetros que influenciam o processo, pois uma estimativa do valor de qualquer desses parâmetros, ainda que tecnicamente bem fundamentada, está sujeita a imprecisões que impedem a necessária garantia de controle sobre os fenômenos atuantes durante os experimentos. Infelizmente, não foi possível contar, para o presente estudo, com dados laboratoriais que preenchessem plenamente essas condições.

A comparação de respostas do simulador com os resultados de experimentos disponíveis mostra haver algumas deficiências na modelagem, além de confirmar a inexistência de uma metodologia robusta para a caracterização morfo-topológica do espaço poroso: mesmo processos sofisticados como a reconstrução estocástica virtual de meios porosos podem levar a resultados que não representam toda a gama de variações características de sistemas porosos naturais. Além disso, os resultados dessa reconstrução são fortemente dependentes da resolução adotada para o exame das imagens microscópicas do meio.

A principal lacuna identificada na modelagem proposta foi a não inclusão da possibilidade de, por efeito hidrodinâmico, partículas já depositadas em ligações virem a ser, posteriormente, liberadas e reincorporadas ao fluxo. Também não foram desenvolvidos critérios para considerar o escoamento de partículas deformáveis (como são as gotículas de óleo em emulsões), de modo que, sob determinadas condições, elas pudessem passar por aberturas de gargantas menores que seus diâmetros originais, além de quebrar-se em partículas menores, alterando a distribuição de partículas com relação à originalmente injetada. Talvez fosse interessante melhorar a maneira pela qual a superfície específica do meio poroso é representada no modelo, adotando, por

exemplo, uma abordagem semelhante à proposta por Tsakiroglou e Fleury (1999), que considera a rugosidade fractal do meio poroso. Mais uma sugestão para futuras investigações é o aperfeiçoamento da avaliação dos efeitos, sobre o campo de pressões, das partículas capturadas devido à exclusão pelo tamanho, nos casos em que isso não leva à total obstrução da ligação, além dos efeitos das partículas capturadas por deposição em uma ligação. Ainda fica por verificar o comportamento das concentrações efluentes de partículas e sua comparação com dados experimentais, além do estudo da influência das diversas variáveis do modelo sobre esse comportamento.

Com vistas à aplicação prática na modelagem do comportamento da injetividade de água em campos de petróleo, o acoplamento da modelagem de rede com modelos fenomenológicos tem um grande potencial. O modelo de rede permitiria a estimativa barata e rápida dos parâmetros necessários aos modelos fenomenológicos que, por sua vez, prestam-se à transferência de escala entre dados de laboratório e a injeção na escala de poços e à mudança da geometria linear para a geometria radial de injeção.

## Referências Bibliográficas

- Abrams, A. J. Mud design to minimize rock impairment due to particle invasion. *Journal of Petroleum Technology*, v.19, p.586-592, 1977
- Adler, P. M., Jacquin, C. G., Quiblier, J. A. Flow in simulated porous media. *International Journal of Multiphase Flow*, v.16, p.691-712, 1990.
- Adler, P. M., Berkowitz, B. Effective Medium analysis of random lattices. *Transport in Porous Media*, v.40, p.145-151, 2000.
- Baghdikian, S. Y., Sharma, M. M., Handy, L. L. Flow of clay suspensions through porous media. *SPE 16257*, 1987.
- Bear, J. *Dynamics of fluids in porous media*. Reprint. Mineola: Dover, 1988, 764p.
- Bryant, S. L., King, P. R., Mellor, D. W. Network model evaluation of permeability and spatial correlation in a real random sphere packing. *Transport in Porous Media*, v.11, p.53-70, 1993.
- Bryant, S., Mason, G., Mellor, D. Quantification of spatial correlation in porous media and its effect on mercury porosimetry. *Journal of Colloid and Interface Science*, v.177, p.88-100, 1996.
- Burganos, V. N., Paraskeva, C. A., Payatakes, A. C. Three-dimensional trajectory analysis and network simulation of deep bed filtration. *Journal of Colloid and Interface Science*, v.148, n.1, p.167-181, 1992.

- Burganos, V. N., Paraskeva, C. A., Payatakes, A. C. Parametric study of particle deposition in sinusoidal pores of arbitrary orientation. *Journal of Colloid and Interface Science*, v.158, p.466-475, 1993.
- Burganos, V. N., Paraskeva, C. A., Payatakes, A. C. Monte Carlo network simulation of horizontal, upflow and downflow depth filtration. *AIChE Journal*, v.41, n.2, p.272-285, 1995.
- Celia, M. A., Reeves, P. C., Ferrand, L. A. Recent advances in pore scale models for multiphase flow in porous media. *Reviews of Geophysics*, Supplement, p.1049-1057, 1995.
- Chatzis, I., Dullien, F. A. L. Mise en œuvre de la théorie de la percolation pour modéliser le drainage des milieux poreux et la perméabilité relative au liquide non mouillant injecté. *Revue de l'Institut Français du Pétrole*, v.37, n.2, p.183-205, 1982.(English version: The modeling of mercury porosimetry and the relative permeability of mercury in sandstones using percolation theory. *International Chemical Engineering*, v.25, n.1, p.47-66, 1985.)
- Chauveteau, G., Nabzar, L., Coste, J-P. Physics and modeling of permeability damage induced by particle deposition. *SPE 39463*, 1998.
- Coles, M. E., Hazlet, R. D., Spanne, P., Soll, W. E., Muegge, E. L., Jones, K. W. Pore level imaging of fluid transport using synchrotron X-ray microtomography. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, v.19, p.55-63, 1998.
- Constantinides, G. N., Payatakes, A. C. A three dimensional network model for consolidated porous media. Basic studies. *Chemical Engineering Communications*, v.81, p.55-81, 1989.
- Cunha, C. *Métodos numéricos para as engenharias e ciências aplicadas*. Campinas: Editora da Unicamp, 1993, 265p.
- Diaz, C. E., Chatzis, I., Dullien, F. A. L. Simulation of capillary pressure curves using bond correlated site percolation on a simple cubic network. *Transport in Porous Media*, v.2, p.215-240, 1987.

- Donaldson, E. C., Baker, B. A., Carrol, H. B. Particle transport in sandstones, *SPE 6905*, 1977.
- Du, Chang-An *Studies on the identification of the heterogeneity of porous media properties*. Los Angeles: Faculty of the Graduate School, University of Southern California, 1996. 259p. Ph. D. Thesis.
- Dullien, F. A. L. *Porous media: Fluid transport and pore structure*. 2<sup>nd</sup> Edition. San Diego: Academic Press, 1992, 574p.
- Duncan, W. J., Thom, A. S., Young, A. D. *Mechanics of fluids*, London: Edward Arnold (Publishers) Ltd, 1972, 725p.
- Dunsmuir, J. H., Ferguson, S. R., D'Amico, K. L., Stokes, J. P. X-ray microtomography: a new tool for the characterization of porous media. *SPE 22860*, 1991.
- Fan, L. T., Nassar, R., Hwang, S. H., Chou, S. T. Analysis of deep-bed filtration data: modeling as a birth-death process. *AIChE Journal*, v.31, n.1, p.1781-1790, 1985.
- Fatt, I. The network model of porous media. I. Capillary pressure characteristics. *Petroleum Transactions, AIME*, v.207, p.144-159, 1956a.
- Fatt, I. The network model of porous media. II. Dynamic properties of a single size tube network. *Petroleum Transactions, AIME*, v.207, p.160-163, 1956b.
- Fatt, I. The network model of porous media. III. Dynamic properties of networks with tube radius distribution. *Petroleum Transactions, AIME*, v.207, p.164-181, 1956c.
- Fernandes, Celso Peres. *Caracterização morfotopológica de espaços porosos: reconstituição multiescala e simulação de processos de invasão de fluidos não-molhantes*. Florianópolis: Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, 1994. 182p. Tese (Doutorado).
- Fiete, G. A. *Project summary: Fluid flow in small structures*. Capturado em 14/05/1999. On line. Disponível na Internet <http://www.physics.purdue.edu/research/undergrad/fiete/fiete.html>

- Flannery, B. P., Deckman, H. W., Roberge, W. G., D'Amico, K. L. Three-dimensional X-ray microtomography. *Science*, v.237, p.1439-1444, 1987.
- Gasperi, Patricia Martins Silva De. *Estimativa de propriedades petrofísicas através da reconstrução 3D do meio poroso a partir da análise de imagens*. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1999. 148p. Dissertação (Mestrado).
- Gohr Pinheiro, Ivone. *Transport et dépôt de particules en milieu poreux: de l'échelle du pore à l'échelle macroscopique*. Toulouse: Institut National Polytechnique de Toulouse, 1996. 204p. Thèse de Doctorat.
- Goldman, A. J., Cox, R. G., Brenner, H. Slow viscous motion of a sphere parallel to a plane wall – II: Couette flow. *Chemical Engineering Science*, v.22, p.653-660, 1967.
- Gruesbeck, C., Collins, R. E. Entrainment and deposition of fine particles in porous media. *Society of Petroleum Engineers Journal*, v.22, p.847-856, 1982.
- Gutjahr, A. L. Fast Fourier transform for random field generation. *Project Report for Los Alamos Grant to the New Mexico Institute of Mining and Technology*, Contract No. 4-R58-2690R, 1989 (*apud Ioannidis et al.*, 1995).
- Happel, J., Brenner, H. *Low Reynolds number hydrodynamics*, 2<sup>nd</sup> Revised Edition. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1983, 553p.
- Hazlett, R. D. Statistical characterization and stochastic modeling of pore networks in relation to fluid flow. *Mathematical Geology*, v.29, n.6, p.801-822, 1997.
- Herzig, J. P., Leclerc, D. M., le Goff, P. Flow of suspensions through porous media – Application to deep bed filtration. *Industrial and Engineering Chemistry*, v.62, n.5, p.8-35, 1970.

- Hoshen, J., Kopelman, R. Percolation and cluster distribution. I. Cluster multiple labeling technique and critical concentration algorithm. *Physical Review B*, v.14, p.3438-3445, 1976 (*apud* Ioannidis *et al.*, 1995).
- Hsu, E. H., Fan, L. T. Experimental study of deep-bed filtration: a stochastic treatment. *AIChE Journal*, v.30, n.3, p.267-273, 1984.
- Imdakh, A. O., Sahimi, M. Transport of large particles in flow through porous media, *Physical Review A*, v.36, p.5304-5309, 1987.
- Imdakh, A. O., Sahimi, M. Computer simulation of particle transport processes in flow through porous media. *Chemical Engineering Science*, v.46, n.8, p.1977-1993, 1991.
- Ioannidis, M. A., Chatzis, I. Network modeling of pore structure and transport properties of porous media. *Chemical Engineering Science*, v.48, n.5, p.951-972, 1993.
- Ioannidis, M., Kwiecien, M., Chatzis, I. Computer generation and application of 3-D model porous media: from pore-level geostatistics to the estimation of formation factor. *SPE 30201*, 1995.
- Ioannidis, M. A., Kwiecien, 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.
- Ison, C. R., Ives, K. J. Removal mechanisms in deep-bed filtration. *Chemical Engineering Science*, v.24, p.717-724, 1969.
- Iwasaki, T. Some notes on sand filtration. *J. Amer. Water Works Assoc.*, v.29, p.1591-1602, 1937 (*apud* Tien e Payatakes, 1979)
- Jerauld, G. R., Hatfield, J. C., Scriven, L. E., Davis, H. T. Percolation and conduction on Voronoi and triangular networks: a case study in topological disorder. *Journal of Physics C: Solid State Physics*, v.17, n.9, p.1519-1529, 1984a.

- Jerauld, G. R., Scriven, L. E., Davis, H. T. Percolation and conduction on the 3D Voronoi and regular networks: a second case study in topological disorder. *Journal of Physics C: Solid State Physics*, v.17, n.19, p.3429-3439, 1984b.
- Jerauld, G. R., Salter, S. J. The effect of pore-structure on hysteresis in relative permeability and capillary pressure: pore-level modeling. *Transport in Porous Media*, v.5, p.103-151, 1990.
- Joshi, Madhusudan Y. *A class of stochastic models for porous media*. Lawrence: University of Kansas, 1974. 151p. Ph. D. Thesis (*apud* Quiblier, 1984).
- Khatib, Z. I., Vitthal, S. The use of the Effective-Medium Theory and a 3D network model to predict matrix damage in sandstone formations. *SPE 19649*, 1989.
- Koplic, J. Creeping flow in two-dimensional networks. *Journal of Fluid Mechanics*, v.119, p.219-247, 1982 (*apud* Ioannidis e Chatzis, 1993).
- Koplik, J., Lin, C., Vermette, M. Conductivity and permeability from microgeometry. *Journal of Applied Physics*, v.56, p.3127-3131, 1984.
- Kumar, Tarkeshwar *Modeling of formation damage due to particle invasion in relation to water injection schemes*. Edinburgh: Department of Petroleum Engineering, Heriot-Watt University, 1988. 184p. Ph. D. Thesis.
- Kwiecien, M. J., Macdonald, I. F., Dullien, F. A. L. Three-dimensional reconstruction of porous media from serial section data. *Journal of Microscopy*, v.159, p.343-349, 1990.
- Lacey, E. S., Wells, P. C. Prevent formation damage – The first step toward enhanced recovery. *Drilling-DCW*, p.46-50, April 1979 (*apud* Kumar, 1988).
- Lantuéjoul, C. Ergodicity and integral range. *Journal of Microscopy*, v.161, pt.3, p.387-403, March 1991.
- Lapidus, G. R., Lane, A. M., Ng, K., Conner, W. C. Interpretation of mercury porosimetry data using a pore-throat network model. *Chemical Engineering Science*, v.38, p.33-56, 1985.

- Lee, S. H., Padmanabhan, L., Al-Sunaidi, H. A. Simulation of linear displacement experiments on massively parallel computers. *SPE 30721*, 1995.
- Leichtberg, S., Pfeffer, R., Weinbaum, S. Stokes flow past finite coaxial clusters of spheres in a circular cylinder. *International Journal of Multiphase Flow*, v.3, p.147-169, 1976 (*apud Ramachandran et al.*, 1998).
- Liang, Zhirong. *Computer generation and application of 3-D reconstructed porous structure: from 2-D images to the prediction of permeability*. Florianópolis: Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, 1997. 149p. Tese (Doutorado).
- Mackie, R. I., Horner, R. M. W., Jarvis, R. J. Dynamic modeling of deep-bed filtration, *AIChE Journal*, v.33, n.11, p.1761-1775, 1987.
- Mason, G. Determination of the pore size distribution and pore space interconnectivity of vycor glass from adsorption-desorption histeresys of capillary condensation isotherms. *Proceedings of Royal Society of London*, A415, p.453-486, 1988.
- Mathews, T., Matthews, G. P., Ridgway, C. J., Moss, A. K. Measurement of void size correlation in inhomogeneous porous media. *Transport in Porous Media*, v.28, p.135-158, 1997.
- Matthews, G. P., Ridgway, C. J., Spearing, M. C. Void space modeling of mercury intrusion hysteresis in sandstone, paper coating and other porous media. *Journal of Colloid and Interface Science*, v.171, p.8-27, 1995.
- Meloy, T. P., Rülke, A. W., Williams, M., Aminian, K. Simulation of particle movement in porous rock. *SPE 23443*, 1991.
- Milanez, P. V. A. Comunicação pessoal, 1999.
- Mishra, B. K., Sharma, M. M. Measurement of pore size distributions from capillary pressure curves. *AIChE Journal*, v.34, n.4, p.684-687, 1988.

- O'Neil, M. E. A sphere in contact with a plane wall in a slow linear shear flow. *Chemical Engineering Science*, v.23, p.1293-1298, 1968.
- Paiva, Rogério Ferreira *Développement d'un microtomographe X et application à la caractérisation des roches réservoirs*. Paris: Université Paris VI, 1995. 170p. Thèse de Doctorat.
- Pang, S., Sharma, M. M. A model for predicting injectivity decline in water injection wells. *SPE 28489*, 1994.
- Paraskeva, C. A., Burganos, V. N., Payatakes, A. C. Three-dimensional trajectory analysis of particle deposition in constricted tubes. *Chemical Engineering Communications*, v.108, p.23-48, 1991.
- Payatakes, A. C., Tien, C., Turian, R. M. A new model for granular porous media. I. Model formulation. *AIChE Journal*, v.19, n.1, p.58-76, 1973.
- Payatakes, A. C., Rajagopalan, R., Tien, C. Application of porous media models to the study of deep bed filtration. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, v.52, p.722-731, 1974.
- Quiblier, J. A. A new three-dimensional modeling technique for studying porous media. *Journal of Colloid and Interface Science*, v.98, p.84-102, 1984.
- Ramachandran, V., Khilar, K. C., Fogler, H. S. Chapter 7: Use of network models for prediction of permeability reduction due to fines entrapment. p.113-131 *In: Khilar, K. C., Fogler, H. S. Migration of fines in porous media*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1998. 171p.
- Rege, Sunil Devidatta *Network modeling and experimental investigation of flow, dissolution, precipitation and fines migration in porous media*. Ann Arbor: Department of Chemical Engineering, University of Michigan, 1988. 190p. Ph. D. Thesis.
- Rege, S. D., Fogler, H. S. Network model for straining dominated particle entrapment in porous media. *Chemical Engineering Science*, v.42, n.7, p.1553-1564, 1987.

- Rege, S. D., Fogler, H. S. A network model for deep bed filtration of solid particles and emulsion drops. *AIChE Journal*, v.34, n.11, p.1761-1772, 1988.
- Ridgway, K., Tarbuck, K. J. The random packing of spheres. *British Chemical Engineering*, v.12, n.3, p.384-388, 1967.
- Rodrigues, C. R. O. Comunicação pessoal, 1999.
- Sahimi, M. *Flow and transport in porous media and fractured rock: from classical methods to modern approaches*. Weinheim: VCH, 1995, 482p.
- Sahimi, M., Gavalas, G. R., Tsotsis, T. T. Statistical and continuum models of fluid-solid reactions in porous media. *Chemical Engineering Science*, v.45, n.6, p.1443-1502, 1990.
- Sahimi, M., Imdakm, A. O. Hydrodynamics of particulate motion in porous media. *Physical Review Letters*, v.66, n.9, p.1169-1172, 1991.
- 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.
- Sharma, M. M., Yortsos, Y. C. A network model for deep bed filtration processes. *AIChE Journal*, v.33, n.10, p.1644-1653, 1987b.
- Sharma, M. M., Yortsos, Y. C. Fines migration in porous media. *AIChE Journal*, v.33, n.10, p.1654-1662, 1987c.
- Soo, H., Radke, C. J. The flow mechanism of dilute, stable emulsions in porous media. *Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals*, v.23, p.342-347, 1984a.
- Soo, H., Radke, C. J. Velocity effects in emulsion flow through porous media. *Journal of Colloid and Interface Science*, v.102, p.462-476, 1984b.
- Soo, H., Radke, C. J. Flow of dilute, stable liquid and solid dispersions in underground porous media. *AIChE Journal*, v.31, n.11, p.1926-1928, 1985.

- Soo, H., Radke, C. J. A filtration model for the flow of dilute, stable emulsions in porous media - I. Theory. *Chemical Engineering Science*, v.41, n.2, p.263-272, 1986.
- Soo, H., Williams, M. C., Radke, C. J. A filtration model for the flow of dilute, stable emulsions in porous media - II. Parameter evaluation and estimation. *Chemical Engineering Science*, v.41, n.2, p.273-281, 1986.
- Spanne, P., Thovert, J. F., Jacquin, C. J., Lindquist, W. B., Jones, K. W., Adler, P. M. Synchrotron computed microtomography of porous media: topology and transports. *Physical Review Letters*, v.73, n.14, p.2001-2004, 1994.
- Stauffer, D., Aharony, A. *Introduction to Percolation Theory*. 2<sup>nd</sup> Edition. London: Taylor and Francis, 1992, 181p.
- Thompson, K. E., Fogler, H. S. Modeling flow in disordered packed beds from pore-scale fluid mechanics. *AIChE Journal*, v.43, n.6, p.1377-1389, 1997.
- Tien, C., Payatakes, A. C. Advances in deep-bed filtration. *AIChE Journal*, v.25, n.9, p.737-759, 1979.
- Todd, A. C., Somerville, J. E., Scott, G. The application of depth of formation damage measurements in predicting water injection decline. *SPE 12498*, 1984.
- Tsakiroglou, C. D., Fleury, M. Pore network analysis of resistivity index for water-wet porous media. *Transport in Porous Media*, v.35, p.89-128, 1999.
- Tsakiroglou, C. D., Payatakes, A. C. Effects of pore-size correlations on mercury porosimetry curves. *Journal of Colloid and Interface Science*, v.146, n.2, p.479-494, 1991.
- Wall, G. C., Brown, R. J. The determination of pore-size distributions from sorption isotherms and mercury penetration in interconnected pores: the application of Percolation Theory. *Journal of Colloid and Interface Science*, v.82, n.1, p.162-176, 1981.

- Wardlaw, N. C., Cassan, J. P. Oil recovery efficiency and the rock-pore properties of some sandstone reservoirs. *Bulletin of the Canadian Petroleum Geology*, v.27, n.2, p.117-138, 1979.
- Wardlaw, N. C., Li, Y., Forbes, D. Pore-throat size correlation from capillary pressure curves. *Transport in Porous Media*, v.2, p.597-614, 1987.
- Wennberg, K. E., Sharma, M. M. Determination of the filtration coefficient and the transition time for water injection wells. *SPE 38181*, 1997.
- Wenrong, M., Shihong, S., Tianhua, L., Wenzhong, L., Guoheng, H. Pore and throat network model and its application to the optimal selection of temporary plugging particles. *SPE 31099*, 1996.
- Xu, B., Kamath, J., Yortsos, Y. C., Lee, S. H. Use of pore network models to simulate laboratory corefloods in a heterogeneous carbonate sample. *SPE 38879*, 1997.
- Yanuka, M., Dullien, F. A. L., Elrick, D. E. Percolation processes and porous media. I. Geometrical and topological model of porous media using a three-dimensional joint pore size distribution. *Journal of Colloid and Interface Science*, v.112, n.1, p.24-41, 1986.
- Yao, K. M., Habibian, M. T., O'Melia, C. R. Water and waste water filtration: concepts and application. *Environmental Science Technology*, v.5, p.1105-1116, 1971.
- Yu, L., Wardlaw N. C. Quantitative determination of pore structure from mercury capillary pressure curves. p. 101-156 In: Morrow, N. R. (ed.) *Interfacial Phenomena in Petroleum Recovery*. New York: Marcel Dekker, 1991, 449p.
- Zhao, H. Q., Macdonald, I. F., Kwiecien, M. J. Multi-orientation scanning: a necessity in the identification of pore necks in porous media by 3-D computer reconstruction from serial section data. *Journal of Colloid and Interface Science*, v.162, n.2, p.394-401, 1994.

Zgrablich, G., Mendioroz, S., Daza, L., Pajares, J., Mayagoitia, V., Rojas, F., Conner, W. C.  
Effect of porous structure on the determination of pore size distribution by mercury  
porosimetry and nitrogen sorption. *Langmuir*, v.7, p.779-785, 1991.

## Apêndice

### Dependência de $\theta$ com Relação à Velocidade na Ligação

Realiza-se, neste Apêndice, uma dedução da relação entre  $\theta$  e a velocidade da partícula na ligação, seguindo exatamente os mesmos passos realizados por Rege (1988) para deduzir a Equação 2.5.

Com base nos dados experimentais de Gruesbeck e Collins (1982), a velocidade intersticial de fluxo relaciona-se com as concentrações original e efluente da suspensão segundo a expressão

$$1 - C_{ef} / C_i = A_1 \exp(-B_1 v) \quad (\text{A.1}),$$

onde  $A_1$  e  $B_1$  são constantes.

No presente modelo,  $(1 - C_{ef}/C_i)$  equivale à probabilidade de captura. Considerando a Equação 2.4a para o cálculo da probabilidade de captura, tem-se:

$$1 - C_{ef} / C_i = A_1 \exp(-B_1 v) = \frac{4(\theta^2 - 1)(r_p / R)^2 - 4(\theta^3 - 1)(r_p / R)^3 + (\theta^4 - 1)(r_p / R)^4}{1 - 4(r_p / R)^2 + 4(r_p / R)^3 - (r_p / R)^4} \quad (\text{A.2}).$$

Lembrando que  $\theta \geq 1$ , para pequenos valores de  $(\theta - 1) r_p/R$ , pode-se escrever

$$A_1 \exp(-B_1 v) = A_2 (\theta^2 - 1)(r_p / R)^2 \quad (\text{A.3}),$$

onde  $A_2$  é uma constante.

Para um valor fixo de  $r_p/R$ , o que era o caso nos experimentos de Gruesbeck e Collins, é possível simplificar a equação acima e explicitar  $\theta$ , resultando a expressão

$$\theta = \sqrt{1 + (\theta_0^2 - 1) \exp(-v / v_{cr})} \quad (\text{A.4}),$$

onde  $\theta_0$  e  $v_{cr}$  são constantes ( $\theta_0 \geq 1$ ). Essa é a Equação 2.5a, utilizada no presente trabalho.