



# **Livros Grátis**

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

Milhares de livros grátis para download.

---

Determinação dos Efeitos da Incrustação na Permeabilidade de Rochas  
Reservatório com uso de Métodos de Análise de Imagens

Tiago Ribeiro Schaewer

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE - UENF  
LABORATÓRIO DE ENGENHARIA E EXPLORAÇÃO DE PETRÓLEO  
LENEP

Macaé - RJ  
Abril de 2006

---

Determinação dos Efeitos da Incrustação na Permeabilidade de Rochas  
Reservatório com uso de Métodos de Análise de Imagens

Tiago Ribeiro Schaewer

Tese apresentada ao Centro de Ciências e Tecnologia da  
Universidade Estadual do Norte Fluminense, como parte  
das exigências para obtenção do título de Mestre em  
Engenharia de Reservatório e de Exploração de Petróleo.

Orientador Prof. André Duarte Bueno, D.Sc.

Co-orientador Prof. Pavel Bedrikovetsky, Ph.D.

Macaé - RJ  
Abril de 2006

Determinação dos Efeitos da Incrustação na Permeabilidade de Rochas  
Reservatório com uso de Métodos de Análise de Imagens

Tiago Ribeiro Schaewer

Tese apresentada ao Centro de Ciências e Tecnologia da  
Universidade Estadual do Norte Fluminense, como parte  
das exigências para obtenção do título de Mestre em  
Engenharia de Reservatório e de Exploração de Petróleo.

Aprovada em 12 de abril de 2006.

Comissão Examinadora

---

Prof. André Duarte Bueno (D.Sc, Engenharia - LENEP/CCT/UENF - Orientador).

---

Prof. Pavel Bedrikovetsky (Ph.D, Engenharia - LENEP/CCT/UENF - Co-orientador).

---

Prof. José Adilson Tenório Gomes (D.Sc, Engenharia - PETROBRAS).

---

Prof. Viatcheslav I. Priimenko (Ph.D, Matemática - LENEP/CCT/UENF).

*Para Dilmar, Iara, João Pedro, Norma e Paula.*

À Paula Soares de Oliveira pelo carinho, amor, perseverança e apoio. Por ter segurado todas as barras durante os últimos dois anos sem pipocar, pela contribuição fundamental dada para a execução deste trabalho, por ter me apoiado incondicionalmente durante o período em que estive parcialmente incapacitado fisicamente.

A André Duarte Bueno, pela dedicação e seriedade demonstradas no seu trabalho como orientador desta dissertação, pela amizade e confiança depositada no meu trabalho.

A Pavel Bedrikovetsky, pelas palestras sobre história e literatura russas, e é claro, engenharia de petróleo, e pela contribuição dada a este trabalho.

Aos membros da secretaria da pós-graduação do LENEP, Bena Rodrigues e Valdileia Silva.

À Tayne Almeida pela ajuda na editoração e correção desta dissertação.

Aos professores do LENEP, Viatcheslav Priimenko, Adolfo Puime Pires, Hélio Severiano, Carlos Alberto Dias, Abel Carrasquilla, Fernando Moraes, Themis Carageorgos, José Adilson Tenório Gomes e Adriano dos Santos.

Ao CENPES/PETROBRAS pelo fornecimento das lâminas delgadas utilizadas neste estudo.

A CAPES pela bolsa concedida durante a elaboração deste trabalho.

Aos amigos do peito de Porto Alegre pela amizade eterna e pelos tempos que não voltam mais: Ângelo Agra, Luciano Frigo, Gustavo Goebbels, André Nunes, Rodrigo Almeida dos Santos, Léa Almeida dos Santos, Alexandre, Vítor Nascimento, Eduardo Xavier, Otávio Degrazzia.

Aos professores da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Luis Otavio Alvares e Maria Medianeira.

Aos colegas do LENEP, Filipe Torres, Cíntia Matsumura, Paulo Fabrício, Walter Suzart, Paulo Pauferro, Shirley Rabello, Vítor Serafim e Diego Carvalho.

Aos integrantes da aguerrida equipe do Deslocamento Zero da Ciência da Computação da UFRGS, Tiago Mendes, Mauro Moura, Maíco, Dalpi, Maurício Menegaz, Marcos Boschetti, Rafael Ligoeki, Ricardo Cassali, Guillermo Hess, Fabiano e Alexandre Perin.

À todas as pessoas que me ajudaram nesta caminhada, Norma Beatriz Teixeira Ribeiro, Dilmar Oliveira Schaewer, Iara Ribeiro, Maria Oliveira Schaewer e Dilermando Schaewer, Neila Ribeiro e Pedro, Eleonora Rodegher, Lee Parrent e Nancy Haggerman, Sabrina Schaewer e Cyrill Deschamps, Raquel Pereira Furtado e Guiomar Furtado, Vera Almeida, Suleima Henriques Portela, Dilmara Schaewer Azevedo e Carlos Alberto Azevedo, Carlos Eduardo e Adriana Schaewer Azevedo, Paulo César e Maria Angélica e João Vicente Carvalho.

O autor graduou-se em Ciência da Computação pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul em 2003.

Ainda em 2003 atuou como pesquisador no LENEP - Laboratório de Engenharia e Exploração de Petróleo, participando do projeto de pesquisa "Inversão Sísmica Elástica Aplicada a Problemas de Caracterização de Reservatórios". No final de 2003 cursou a disciplina de "Programação Orientada a Objeto com C++", iniciando as atividades relacionadas ao seu tema de tese de mestrado.

Iniciou seu mestrado no "Curso de Pós-graduação em Engenharia de Reservatório e de Exploração de Petróleo" em 2004. Tendo concluído o mestrado com a apresentação da tese "*Determinação dos Efeitos da Incrustação na Permeabilidade de Rochas Reservatório com uso de Métodos de Análise de Imagens*", o trabalho foi orientado pelo Prof. André Duarte Bueno (<https://www.lenep.uenf.br/~bueno/>), e co-orientado pelo Prof. Pavel Bedrikovetsky (<https://www.lenep.uenf.br/~pavel/>).

Como resultado do trabalho de tese submeteu ao ENCIT 2006 os trabalhos:

- Estudo das representações tridimensionais encrustadas com os algoritmos pore-lining, pore-filling e pore-bridging.
- Modelagem e Simulação da Incrustação por Sulfato de Bário em Representações Tridimensionais da Rocha Reservatório: Efeitos Sobre a Permeabilidade e Dano de Formação.
- Cálculo do Dano de Formação em Rochas Reservatório Utilizando Técnicas de Análise de Imagens: O Software SAIL.

Atualmente é aluno de doutorado no "Curso de Pós-graduação em Engenharia de Reservatório e de Exploração de Petróleo" tendo iniciado o doutorado em 2006. Participa ainda dos seguintes projetos de pesquisa:

- *Desenvolvimento de Algoritmos e Programa para Determinação da Permeabilidade Relativa de Meios Porosos com uso dos Métodos - Configurações de Equilíbrio e Grafo de Conexão Serial*. Financiado pela FENORT
- *Otimização e Paralelização dos Algoritmos Utilizados nos Métodos Configurações de Equilíbrio e Grafo de Conexão Serial e sua Aplicação na Determinação da Permeabilidade Relativa de Rochas Reservatório Típicas da Bacia de Campos Utilizando Cluster de Computadores*. Financiado pela FAPERJ.

Suas áreas de interesse incluem às ciências da computação (desenvolvimento de software, programação paralela) e suas aplicações à área de engenharia de petróleo (análise de imagens de rochas, desenvolvimento de sistemas aplicados).



# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Escopo do Problema . . . . .	1
1.2	Objetivos . . . . .	4
1.3	Organização do Documento . . . . .	5
<b>2</b>	<b>Revisão Bibliográfica</b>	<b>6</b>
2.1	Análise de Imagens . . . . .	6
2.1.1	Preparação das Amostras de Rocha . . . . .	7
2.1.2	Digitalização . . . . .	8
2.1.3	Pré-Processamento . . . . .	12
2.1.4	Segmentação ou Binarização . . . . .	12
2.1.5	Operações Morfológicas . . . . .	13
2.1.6	Caracterização de Rochas Reservatório . . . . .	18
2.2	Reconstrução Tridimensional . . . . .	24
2.2.1	Método de Reconstrução da Gaussiana Truncada . . . . .	25
2.2.2	Método de Reconstrução das Esferas Sobrepostas . . . . .	30
2.3	Estimativa da Permeabilidade . . . . .	32
2.3.1	Grafo de Conexão Serial . . . . .	33
2.4	Dano de Formação . . . . .	36
2.4.1	Incrustação por Sulfato de Bário . . . . .	37
<b>3</b>	<b>Metodologia</b>	<b>40</b>
3.1	Caracterização da Pesquisa . . . . .	40
3.2	Motivação para o Tema . . . . .	40
3.3	Origem dos Dados . . . . .	41
3.4	Hipóteses Simplificadoras . . . . .	41
3.5	Instrumentos . . . . .	41
<b>4</b>	<b>Modelos e Algoritmos de Incrustação</b>	<b>44</b>
4.1	Modelos de Alteração Numérica de Representações Tridimensionais . . . . .	44
4.2	Algoritmos de Incrustação Desenvolvidos . . . . .	45
4.2.1	Hipóteses simplificadoras . . . . .	45

4.2.2	Algoritmo de incrustação <i>pore-lining</i> . . . . .	46
4.2.3	Algoritmo de incrustação <i>pore-filling</i> . . . . .	51
4.2.4	Algoritmo de incrustação dendrítica . . . . .	55
4.2.5	Impacto da resolução da representação tridimensional . . . . .	59
4.2.6	Simulação incremental e não-incremental . . . . .	61
4.2.7	Estabilidade dos algoritmos . . . . .	62
4.3	Determinação do coeficiente de dano de formação . . . . .	64
<b>5</b>	<b>Resultados das Simulações de Incrustação</b>	<b>65</b>
5.1	Resultados para Rocha Berea 500 . . . . .	66
5.2	Resultados para Rocha P320_K642 . . . . .	70
5.3	Resultados para Rocha P262_K70 . . . . .	74
5.3.1	Resultados para a rocha P262_K70 reconstruída com gt1 . . . . .	74
5.3.2	Resultados para a rocha P262_K70 reconstruída com gt2 . . . . .	77
5.4	Resultados para Rocha P262_K441 . . . . .	79
5.5	Resultados para Rocha P275_K316 . . . . .	82
5.5.1	Resultados para a rocha P275_K316 reconstruída com gt1 . . . . .	82
5.5.2	Resultados para a rocha P275_K316 reconstruída com gt2 . . . . .	86
5.6	Resultados para Rocha P238_K145 . . . . .	90
5.7	Resultados para Rocha P223_K154 . . . . .	93
5.8	Resultados para Rocha P240_K104 . . . . .	95
5.9	Resultados para Rocha Berea 200 . . . . .	98
5.10	Resultados para o Modelo <i>Pore-Lining</i> . . . . .	101
5.11	Resultados para o Modelo <i>Pore-Filling</i> . . . . .	102
5.12	Resultados para o Modelo Dendrítico . . . . .	104
<b>6</b>	<b>Conclusões</b>	<b>108</b>
<b>7</b>	<b>Sugestões para Trabalhos Futuros</b>	<b>110</b>
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>112</b>
<b>A</b>	<b>Manual do Usuário</b>	<b>118</b>
A.1	Entendendo a Interface . . . . .	119
A.1.1	Objetos . . . . .	119
A.1.2	Listas de Objetos . . . . .	119
A.1.3	Janelas . . . . .	120
A.1.4	Áreas de Trabalho . . . . .	120
A.2	A Área de Trabalho . . . . .	120
A.3	Barra de Tarefas ou Controles Genéricos . . . . .	121
A.3.1	Operações Sobre Arquivos . . . . .	121

---

A.3.2	Operações Genéricas Sobre Objetos . . . . .	122
A.3.3	Seletores de Tipos de Objetos Visíveis . . . . .	122
A.3.4	Seletores de Áreas de Trabalho . . . . .	123
A.3.5	Seletores de Linguagem . . . . .	123
A.3.6	As Abas de Controle . . . . .	123
A.4	Manipulando Objetos . . . . .	126
A.4.1	Atributos . . . . .	127
A.4.2	Operações . . . . .	127
A.4.3	Objeto Imagem . . . . .	128
A.4.4	Objeto Imagem Binária . . . . .	131
A.4.5	Objeto Imagem Tridimensional . . . . .	134
A.4.6	Objetos Gráficos . . . . .	137
<b>B</b>	<b>Manual do Desenvolvedor</b>	<b>138</b>
B.1	Arquitetura do Sistema . . . . .	139
B.1.1	Núcleo do Produto . . . . .	139
B.2	Janelas MDI . . . . .	142
B.2.1	A classe MDIWindowBase . . . . .	142
B.3	Sistema de Tradução . . . . .	142
B.4	Bibliotecas Utilizadas . . . . .	144
B.4.1	Ogre 3D . . . . .	145
B.4.2	LTI-Lib . . . . .	145
B.4.3	DISLIN . . . . .	145
B.4.4	Lua . . . . .	146
B.5	Compilando e Instalando as Bibliotecas . . . . .	146
B.5.1	Biblioteca LTI-LIB . . . . .	146
B.5.2	Biblioteca DISLIN . . . . .	147
B.5.3	Biblioteca Ogre 3D . . . . .	147
B.5.4	Biblioteca zziplib . . . . .	148
B.5.5	Biblioteca DevIL . . . . .	148
B.5.6	Biblioteca da nvidia . . . . .	148
B.5.7	Biblioteca LUA . . . . .	149

# Lista de Figuras

1.1	Esquema de um reservatório apresentando incrustação de sulfato de bário ao redor do poço produtor. Fonte: (GLADSTONE, 2004).	2
2.1	Etapas para determinação de propriedades petrofísicas com uso de análise de imagens. Fonte: (LMPT, 2006).	7
2.2	Preparação das amostras.	8
2.3	Amostras.	8
2.4	(a) Microscópio ótico utilizado para obtenção das imagens. (b) Malha de dimensões MxN (cada célula corresponde a um pixel).	9
2.5	Efeito da discretização de imagens. (a) imagem com alta resolução, com M=205, N=302 e m=8; (b) imagem com M=60, N=90 e m=8; (c) imagem com M=20, N=30 e m=8; (d) imagem com M=60, N=90 e m=8 apresentando <i>aliasing</i> .	11
2.6	Pré-processamento de uma imagem com problemas de iluminação. (a) imagem original; (b) imagem processada com filtros de correção de iluminação.	12
2.7	Valores de corte para segmentação em três fases (poro, matriz, argila) no espaço RGB utilizados por (FENS, 2000). As argilas localizadas na origem das coordenadas são identificadas pela coloração escura, o espaço poroso pela coloração da resina epoxi azul e as regiões mais claras estão associadas à matriz rochosa.	14
2.8	Binarização de imagens. (a) imagem original; (b) imagem binarizada; (c) canais de intensidade, saturação e matiz de uma região da imagem original.	14
2.9	Diálogo do para binarização interativa no espaço HSI. A fase sólida aparece destacada em vermelho. Programa Imago (PHILIPPI et al., 2002)	15
2.10	Operações realizadas sobre a fase branca com um EE circular de raio de 2 pixels. Note que poros menores do que o EE foram eliminados na figura b.	17
2.11	Utilização de imagens de distância ao fundo para otimizar operações morfológicas. Imagens obtidas de (RUSS, 2005).	18
2.12	Obtenção da autocorrelação. Figura (c), obtida com o programa Imago (PHILIPPI et al., 2002). Figura (d), fonte: (BERRYMAN, 1984).	21

2.13	Imagens binárias sintéticas (à esquerda) e suas funções frequenciais de autocorrelação (à direita) obtidas com o uso da transformada de Fourier. . .	22
2.14	Diversos tipos de vizinhança para duas (a, b) e três (c, d, e) dimensões. (a) 4-vizinhança; (b) 8-vizinhança; (c) 6-vizinhança; (d) 18-vizinhança; (e) 26-vizinhança. . . . .	23
2.15	Seqüência da reconstrução de (ZHIRONG et al., 1998). . . . .	26
2.16	Uma representação tridimensional reconstruída com o método da gaussiana truncada. . . . .	28
2.17	Visualização de representações da rocha P262_K70, obtidas com gt1,2-n1,2-np60-N300-lp. . . . .	30
2.18	Representação tridimensional reconstruída com o método das esferas sobrepostas. . . . .	32
2.19	O modelo do grafo de conexão serial. (a) seção de uma representação tridimensional; (b) esquema mostrando vértices (retângulos) e arestas (setas) em um grafo com 4 planos; (c) esquema para cálculo do raio hidráulico. Note que em (a) e (b) cada plano é retratado unidimensionalmente para exemplificação. . . . .	34
2.20	Visualização tridimensional de uma imagem (a), seu esqueleto (b) e seu grafo (c). . . . .	35
2.21	Efeito da permeabilidade da formação próxima ao poço. Fonte: (KRUEGER, 1990) . . . . .	37
4.1	Modelo de incrustação <i>pore-lining</i> . (a) imagem obtida com um MEV, mostrando um arenito com deposição de clorita do tipo <i>pore-lining</i> . Fonte: (CEREPI; DURAND; BROSSE, 2002); (b) seção transversal de uma representação tridimensional da rocha Berea 500 incrustada com o algoritmo de incrustação <i>pore-lining</i> com $\sigma_r = 0.4$ . Note a presença de voxéis porosos (brancos) entre os voxéis incrustados (vermelhos) sobre o substrato da rocha (voxéis pretos). A escala das figuras a e b é aproximadamente igual.	48
4.2	Seções transversais da representação reconstruída da rocha Berea 500 e o resultado do algoritmo de incrustação <i>pore-lining</i> . (a) representação original; (b) apresentando 10% do volume poroso incrustado; (c) 20% do volume poroso incrustado; (d) 30% do volume poroso incrustado; (e) 40% do volume poroso incrustado; (f) 50% do volume poroso incrustado. . . . .	49
4.3	Resultados para a queda de permeabilidade em função de $\sigma_r$ para diferentes algoritmos de incrustação. (a) Berea 500; (b) P320_K642. . . . .	50
4.4	Cristais de sulfato de bário apresentando morfologia (a) tabular e (b) “rosa do deserto”. Fonte : (BERNARD-MICHEL; PONS; VIVIER, 2002) . . . . .	51

4.5	Seções transversais da representação reconstruída da rocha Berea 500 e o resultado do algoritmo de incrustação <i>pore-filling</i> com $F_{VA} = 0.99$ e $\phi_{BaSO_4} = 0.3$ . (a) representação original; (b) apresentando 10% do volume poroso incrustado; (c) 20% do volume poroso incrustado; (d) 30% do volume poroso incrustado; (e) 40% do volume poroso incrustado; (f) 50% do volume poroso incrustado. . . . .	54
4.6	Modelo de incrustação dendrítica. (a) microfotografia binarizada de incrustação dendrítica, extraída de (TODD; YUAN, 1992); (b) zoom de seção transversal de uma representação tridimensional incrustada pelo algoritmo dendrítico. Note que a escala da microfotografia e da representação tridimensional são equivalentes. . . . .	55
4.7	Modelo de incrustação dendrítica. (a) esquema de um cristal dendrítico (b) modelo discretizado de um cristal dendrítico, os braços ortogonais ao plano da figura (direção z) não são mostrados. . . . .	56
4.8	Seções transversais da representação reconstruída da rocha Berea 500 e o resultado do algoritmo de incrustação dendrítica com $F_{VD} = 0.9$ , $d_d = 2$ voxéis e $e_d = 6$ voxéis. (a) representação original; (b) apresentando 10% do volume poroso incrustado; (c) apresentando 20% do volume poroso incrustado. Note que para $\sigma_r = 0.2$ os dendritos ocupam quase todo o espaço poroso. . . . .	59
4.9	Seção transversal de uma representação tridimensional mostrando um poro completamente bloqueado por incrustação <i>pore-lining</i> com $\sigma_r$ pequeno e $\alpha_v$ grande. (a) seção transversal do poro no plano $z_i$ ; (b) seção transversal do poro no plano $z_{i+1}$ . . . . .	60
4.10	Seção transversal de uma representação tridimensional mostrando um poro com incrustação <i>pore-lining</i> para $\sigma_r = 0.5$ e $\alpha_v$ pequeno. (a) seção transversal do poro no plano $z_i$ ; (b) seção transversal do poro no plano $z_{i+1}$ . O raio hidráulico do poro sofreu uma redução de 70%, mas não foi bloqueado. Estatisticamente, os outros planos $z_{i+n}$ do poro devem apresentar poucas diferenças na morfologia do material incrustante. . . . .	60
4.11	Curvas de injetividades adimensionais para simulações incrementais e não-incrementais realizadas para a rocha Berea 200. . . . .	62
5.1	Imagem Berea 500, colorida (a) e binarizada (b). . . . .	66
5.2	Resultados para a rocha Berea 500: Queda de permeabilidade em função da queda da porosidade. . . . .	67
5.3	Resultados para a rocha Berea 500: queda da permeabilidade em função de $\sigma_r$ . . . . .	67

5.5	Resultados para a rocha Berea 500: Distribuição de tamanho de poros para diferentes modelos de incrustação e $\sigma_r = 0, 1$ . Note o impacto da incrustação dendrítica (em amarelo) sobre os poros maiores. . . . .	68
5.4	Resultados para a rocha Berea 500: Razão $\phi_{c6}/\phi$ em função de $\sigma_r$ . . . . .	68
5.6	Resultados para a rocha Berea 500: Superfície total em função de $\sigma_r$ . . . . .	69
5.7	Resultados para a rocha Berea 500: superfície específica $S_v$ em função de $\sigma_r$ . . . . .	69
5.8	Imagem P320_K642, colorida (a) e binarizada (b). . . . .	70
5.9	Resultados para a rocha P320_K642: Queda de permeabilidade em função da queda da porosidade. . . . .	71
5.10	Resultados para a rocha P320_K642: Queda da permeabilidade em função de $\sigma_r$ . . . . .	71
5.11	Resultados para a rocha P320_K642: Razão $\phi_{c6}/\phi$ em função de $\sigma_r$ . . . . .	72
5.12	Resultados para a rocha P320_K642: Superfície específica $S_v$ em função de $\sigma_r$ . . . . .	72
5.13	Resultados para a rocha P320_K642: Distribuições de tamanho de poros com $\sigma_r = 0, 2$ . . . . .	73
5.14	Imagem P262_K70, colorida (a) e binarizada (b). . . . .	74
5.15	Resultados para a rocha P262_K70: Queda da permeabilidade em função de $\sigma_r$ . . . . .	75
5.16	Resultados para a rocha P262_K70: Queda da porosidade conectada em função de $\sigma_r$ . . . . .	76
5.17	Resultados para a rocha P262_K70: Queda da porosidade conectada em função de $\sigma_r$ para representações de diferentes dimensões. . . . .	76
5.18	Resultados para a rocha P262_K70 (gt2): Queda da permeabilidade em função de $\sigma_r$ . . . . .	77
5.19	Resultados para a rocha P262_K70 (gt2): Queda da porosidade conectada em função de $\sigma_r$ . . . . .	78
5.20	Imagem P262_K441, colorida (a) e binarizada (b). . . . .	79
5.21	Resultados para a rocha P262_K441: Queda da permeabilidade em função de $\sigma_r$ . . . . .	80
5.22	Resultados para a rocha P262_K441: Queda da porosidade conectada em função de $\sigma_r$ . . . . .	80
5.23	Resultados para a rocha P262_K441: Queda da porosidade conectada em função de $\sigma_r$ para representações de diferentes dimensões. . . . .	81
5.24	Imagem P275_K316, colorida (a) e binarizada (b). . . . .	82
5.25	Resultados para a rocha P275_K316: Distribuições de tamanho de poros para $\sigma_r = 0.2$ . . . . .	83
5.26	Resultados para a rocha P275_K316: Distribuições de tamanho de poros para $\sigma_r = 0.4$ . . . . .	83

5.27	Seções seriais da rocha P275_K316 (gt1): (a) incrustação <i>pore-lining</i> com $\sigma_r = 0.2$ ; (b) incrustação <i>pore-lining</i> com $\sigma_r = 0.4$ ; (c) incrustação <i>pore-filling</i> com $\sigma_r = 0.2$ ; (d) incrustação <i>pore-filling</i> com $\sigma_r = 0.4$ . . . . .	84
5.28	Resultados para a rocha P275_K316 (gt1): Queda da permeabilidade em função de $\sigma_r$ . . . . .	85
5.29	Resultados para a rocha P275_K316 (gt1): Razão $\phi_{c6}/\phi$ em função de $\sigma_r$ . . . . .	85
5.30	Resultados para a rocha P275_K316 (gt2): Distribuições de tamanho de poros para $\sigma_r = 0.2$ . . . . .	86
5.31	Resultados para a rocha P275_K316 (gt2): Distribuições de tamanho de poros para $\sigma_r = 0.4$ . . . . .	87
5.35	Resultados para a rocha P275_K316 (gt2): Razão $\phi_{c6}/\phi$ em função de $\sigma_r$ . . . . .	87
5.32	Seções seriais da rocha P275_K316 (gt2): (a) incrustação <i>pore-lining</i> com $\sigma_r = 0.2$ ; (b) incrustação <i>pore-lining</i> com $\sigma_r = 0.4$ ; (c) incrustação <i>pore-filling</i> com $\sigma_r = 0.2$ ; (d) incrustação <i>pore-filling</i> com $\sigma_r = 0.4$ . . . . .	88
5.33	Resultados para a rocha P275_K316 (gt2): Queda da permeabilidade em função de $\sigma_r$ . . . . .	89
5.34	Resultados para a rocha P275_K316 (gt2): Queda da permeabilidade em função de $\sigma_r$ . . . . .	89
5.36	Imagem P238_K145, colorida (a) e binarizada (b). . . . .	90
5.37	Resultados para a rocha P238_K145: Queda de permeabilidade em função da queda da porosidade. . . . .	91
5.38	Resultados para a rocha P238_K145: Queda da permeabilidade em função de $\sigma_r$ . . . . .	91
5.40	Resultados para a rocha P238_K145: Distribuições de tamanho de poros para $\sigma_r = 0, 1$ . . . . .	92
5.39	Resultados para a rocha P238_K145: Razão $\phi_{c6}/\phi$ em função de $\sigma_r$ . . . . .	92
5.41	Imagem P223_K154, colorida (a) e binarizada (b). . . . .	93
5.42	Resultados para a rocha P223_K154: Queda da permeabilidade em função de $\sigma_r$ . . . . .	94
5.43	Resultados para a rocha P223_K154: Razão $\phi_{c6}/\phi$ em função de $\sigma_r$ . . . . .	94
5.44	Imagem P240_K104, colorida (a) e binarizada (b). . . . .	95
5.45	Resultados para a rocha P240_K104: Queda de permeabilidade em função da queda da porosidade. . . . .	96
5.46	Resultados para a rocha P240_K104: Queda da permeabilidade em função de $\sigma_r$ . . . . .	96
5.47	Resultados para a rocha P240_K104: Razão $\phi_{c6}/\phi$ em função de $\sigma_r$ . . . . .	97
5.48	Imagem Berea 200, colorida (a) e binarizada (b). . . . .	98
5.49	Resultados para a rocha Berea 200: Queda de permeabilidade em função da queda da porosidade. . . . .	98



5.50	Resultados para a rocha Berea 200: Queda da permeabilidade em função de $\sigma_r$ . . . . .	99
5.51	Resultados para a rocha Berea 200: Razão $\phi_{c6}/\phi$ em função de $\sigma_r$ . . . . .	99
5.52	Resultados para a rocha Berea 200 para representações de diferentes dimensões incrustadas pelo modelo <i>pore-filling</i> . Queda da porosidade conectada em função de $\sigma_r$ . . . . .	100
5.53	Resultados para a rocha Berea 200 para representações de diferentes dimensões incrustadas pelo modelo <i>pore-filling</i> : Queda da permeabilidade em função de $\sigma_r$ . . . . .	100
5.54	Resultados para o modelo <i>pore-lining</i> : Queda da permeabilidade em função de $\sigma_r$ . . . . .	101
5.55	Resultados para o modelo <i>pore-lining</i> : Queda de permeabilidade em função da queda da porosidade. . . . .	101
5.56	Resultados para o modelo <i>pore-filling</i> : Queda da permeabilidade em função de $\sigma_r$ . . . . .	102
5.57	Resultados para o modelo <i>pore-filling</i> : Queda de permeabilidade em função da queda da porosidade. . . . .	102
5.58	Resultados para o modelo <i>pore-filling</i> : Razão $\phi_{c6}/\phi$ em função de $\sigma_r$ . . . . .	103
5.59	Resultados para o modelo <i>pore-filling</i> : Superfície específica $S_v$ em função de $\sigma_r$ . . . . .	103
5.60	Resultados para o modelo dendrítico: Queda da permeabilidade em função de $\sigma_r$ . . . . .	104
5.61	Resultados para o modelo dendrítico: Queda de permeabilidade em função da queda da porosidade. . . . .	105
5.62	Resultados para o modelo dendrítico: Distribuição de tamanho de poros das representações originais. . . . .	105
5.63	Resultados para a rocha Berea 500 incrustada pelo modelo dendrítico: Queda de permeabilidade em função da queda da porosidade para diferentes valores de $e_d$ (em microns). . . . .	106
5.64	Resultados para a rocha P275_K316 incrustada pelo modelo dendrítico: Queda de permeabilidade em função da queda da porosidade para diferentes valores de $e_d$ (em microns). . . . .	106
5.65	Seções transversais da representação reconstruída das rochas Berea 500 e P275_K316 (gt2) apresentando o resultado do algoritmo de incrustação dendrítica para $\sigma_r = 0, 1$ . Rocha Berea 500 com (a) $e_d \simeq 15$ ; (c) $e_d \simeq 20$ ; (e) $e_d \simeq 25$ . Rocha P275_K316 com (b) $e_d \simeq 15$ ; (d) $e_d \simeq 20$ ; (f) $e_d \simeq 25$ . . . . .	107
A.1	A área de trabalho é a região com fundo cinza escura que mostra várias janelas diferentes. . . . .	120

---

A.2	Seletores de ATs localizados no topo da interface. A área de trabalho ativa é a número 1, indicada pelo botão colorido de amarelo. . . . .	121
A.3	A aba info e suas áreas de atributos e de controles. . . . .	124
A.4	Janela mostrando um objeto do tipo imagem. . . . .	128
A.5	Operações com imagens coloridas. . . . .	129
A.6	Operações com imagens binárias. . . . .	129
A.7	Gráfico mostrando o histograma para o canal vermelho de uma imagem. . .	130
A.8	Janela mostrando um objeto do tipo imagem binária, onde a fase porosa é representada pela cor branca e a fase sólida pela cor preta. . . . .	131
A.9	Gráfico mostrando o gráfico da função autocorrelação de uma imagem binária.	133
A.10	Janela mostrando um objeto do tipo imagem tridimensional. Apenas um plano da imagem tridimensional é mostrado, onde a fase porosa é representada pela cor branca e a fase sólida pela cor preta. . . . .	134
A.11	Parâmetros para incrustação <i>pore-linning</i> . . . . .	136
A.12	Parâmetros para incrustação <i>pore-filling</i> . . . . .	136
A.13	Parâmetros para incrustação dendrítica. . . . .	136
B.1	O modelo incremental. . . . .	139
B.2	Diagrama de colaboração do núcleo do produto. As classes controladoras estão em laranja, as classes operárias estão em amarelo e as verdes representam classes operárias pertencentes a bibliotecas externas. . . . .	140
B.3	Diagrama de colaboração mostrando a troca de mensagens entre objetos. .	141
B.4	Diagrama de classes para o pacote de janelas MDI. . . . .	143

# Lista de Tabelas

2.1	Tamanhos e tempos de processamento de imagens com diferentes valores de M, N e m. . . . .	10
2.2	Comparação dos resultados de permeabilidade (mD) obtidos pelo método do grafo de conexão serial (k-gcs), com os métodos do esqueleto (k-ske), de gás em rede (k-LG) e de rede de percolação (k-rede). Fonte: (BUENO, 2001).	36
2.3	Experimentos de incrustação de $BaSO_4$ em <i>plugs</i> de arenito Clashach. $k_i$ = permeabilidade inicial, $k_f$ = permeabilidade final, $\Delta k = k_i - k_f$ = variação da permeabilidade, $\phi_i$ = porosidade inicial, $\phi_f$ = porosidade final. Fonte: (TODD; YUAN, 1992). . . . .	39
3.1	Propriedades das rochas. O significado de cada uma das propriedades da tabela pode ser encontrado na lista de símbolos. . . . .	42
3.2	Propriedades das representações tridimensionais. O significado de cada uma das propriedades da tabela pode ser encontrado na lista de símbolos. . . . .	43
3.3	Equipamentos utilizados. . . . .	43
4.1	Resultados para conjuntos de 8 experimentos para algoritmo <i>pore-lining</i> . . . . .	63
4.2	Resultados para conjuntos de 8 experimentos para algoritmo <i>pore-filling</i> com $\phi_{BaSO_4} = 0,3$ e $F_{VA} = 0,99$ . . . . .	63
4.3	Resultados para conjuntos de 8 experimentos para algoritmo dendrítico com $F_{VD} = 0,9$ , $d_d = 1$ e $e_d = 5$ . . . . .	63
5.1	Parâmetros utilizados nas simulações. . . . .	65
A.1	Tipos de arquivos e suas extensões. . . . .	122

## Simbologia

A simbologia é apresentada em ordem alfabética.

### Alfabeto Latino

$a(r, s, t)$	Operador do filtro linear do método de reconstrução da gaussiana truncada.
$A$	Área da seção perpendicular ao fluxo de massa [ $m^2$ ].
$c$	Constante que representa a tortuosidade do meio.
$C(x, y)$	Função autocorrelação obtida pelo método frequencial.
$C_{pp}(\mathbf{u})$	Função covariograma.
$D_c$	Diâmetro crítico da rocha [ $m$ ].
$D_{cv}$	Diâmetro crítico da representação tridimensional [ $m$ ].
$D$	Diâmetro da esfera (esferas sobrepostas) [ $m$ ].
$d_d$	Diâmetro dos braços dendríticos primários [ <i>voxels</i> ].
$e_d$	Tamanho dos dendritos [ <i>voxels</i> ].
$F_{VA}$	Fração de volume aglomerado.
$F_{VD}$	Fração de volume dendrítico.
$FF(\mathbf{x})$	Função de fase, onde $FF(\mathbf{x}) : NxN \rightarrow \{0, 1\}$ .
$G$	Tom de cinza que representa a cor branca.
$k_a$	Coefficiente da taxa da reação [ $(M.s)^{-1}$ ].
$k$	Permeabilidade intrínseca [ $mD$ ].
$k_i$	Permeabilidade do reservatório [ $mD$ ].
$k_o$	Permeabilidade inicial [ $mD$ ].
$k_s$	Permeabilidade da zona de <i>skin</i> ao redor do poço [ $mD$ ].
$k_{exp}$	Permeabilidade experimental [ $mD$ ].
$k_{GCS}$	Permeabilidade determinada usando método do grafo de conexão serial [ $mD$ ].
$L$	Comprimento de um tubo [ $m$ ].
$M$	Largura da imagem [ <i>pixels</i> ].

---

$m$	Tamanho ocupado por um pixel na memória [bits].
$N$	Altura da imagem [ <i>pixeis</i> ].
$n_{fa}$	Fator de amplificação de uma representação tridimensional reconstruída com o método da gaussiana truncada.
$n_e$	Número de esferas com diâmetro D (esferas sobrepostas).
$O$	Ordem de complexidade de um algoritmo.
$P(u, v)$	Espectro frequencial de uma imagem, obtido através da transformada de Fourier.
$P_A$	Proporção da área ocupada pelas esferas de diâmetro D (esferas sobrepostas) [ $m^2/m^2$ ].
$P_V$	Proporção do volume ocupado pelas esferas de diâmetro D (esferas sobrepostas) [ $m^3/m^3$ ].
$r$	Raio do poro [ $m$ ].
$r_h$	Raio hidráulico [ $m$ ].
$\Delta r_0$	Raio da zona de skin ao redor do poço [ $m$ ].
$r, s, t$	Deslocamentos na equação do filtro linear do método da gaussiana truncada.
$R_c$	Raio crítico da rocha [ $m$ ].
$R_{pp}(\mathbf{u})$	Função autocorrelação.
$s$	Desvio padrão.
$S_v$	Superfície específica [ $m^{-1}$ ].
$\mathbf{u}$	Vetor deslocamento.
$V_P$	Volume poroso inicial [ $m^3$ ].
$V_r(\mathbf{v})$	Função que retorna o número de voxels da matriz rochosa vizinhos ao voxel $\mathbf{v}$ . Onde $V_r : NxNxN \rightarrow N$ .
$V_s(\mathbf{v})$	Função que retorna o número de voxels incrustados vizinhos ao voxel $\mathbf{v}$ . Onde $V_s : NxNxN \rightarrow N$ .
$\mathbf{x}$	Um ponto em um espaço bidimensional discreto.
$X(x)$	Campo tridimensional com uma população gaussiana normal não correlacionada.
$Y(x)$	Campo tridimensional com uma população gaussiana normal correlacionada.

## Alfabeto Grego

$\alpha$	Tamanho do pixel [ $\mu m$ ].
$\alpha_v$	Tamanho do voxel [ $\mu m$ ].
$\delta(i, j)$	Função auxiliar.
$\phi$	Porosidade [ $m^3/m^3$ ].
$\phi_{c6}$	Porosidade conectada em uma representação tridimensional considerando 6-vizinhança [ $m^3/m^3$ ].
$\phi_{eff}$	Porosidade efetiva [ $m^3/m^3$ ].
$\phi_g$	Porosidade à gás [ $m^3/m^3$ ].
$\phi_o$	Porosidade ótica [ $m^3/m^3$ ].
$\phi_{BaSO_4}$	Porosidade da fase incrustada por sulfato de bário [ $m^3/m^3$ ].
$\beta$	Coefficiente de dano de formação.
$\lambda$	Comprimento de correlação [ <i>pixels</i> ].
$\lambda_1$	Comprimento dos braços principais dos dendritos [ $\mu m$ ].
$\lambda_2$	Comprimento dos braços secundários dos dendritos [ $\mu m$ ].
$\mu$	Viscosidade [ $kg/(m.s)$ ].
$\sigma$	Volume do sulfato de bário precipitado [ $m^3$ ].
$\sigma_r$	Volume do sulfato de bário precipitado dividido pelo volume poroso inicial [ $m^3/m^3$ ].
$\vartheta(a, b)$	Função que retorna o resto da divisão de $a$ por $b$ , onde $\vartheta : \mathbb{Z}x\mathbb{Z} \rightarrow \mathbb{Z}$ .

## Outros Símbolos

$\mathfrak{F}$	Transformada de Fourier.
$\langle \rangle$	Média estatística.
$\vee$	OU lógico.
$\wedge$	E lógico.

**Abreviaturas e Acrônimos**

IDF	Imagem de distância ao fundo.
GCS	Grafo de conexão serial.
FFT	Transformada de Fourier rápida.

## “Determinação dos Efeitos da Incrustação na Permeabilidade de Rochas Reservatório com uso de Métodos de Análise de Imagens”

### Resumo

*A incrustação de rochas reservatório por sulfato de bário é um problema recorrente na Bacia de Campos, onde a forma mais comum de recuperação secundária é a injeção de água do mar (corresponde a 85% do óleo produzido). A deposição de sulfato de bário ocorre quando a água injetada, rica em sulfato, entra em contato com a água de formação, rica em bário, causando o acúmulo do precipitado sólido ao longo da coluna de produção, em equipamentos do poço e no interior da formação. O problema é agravado pelas propriedades físico-químicas do sulfato de bário, um sal de difícil remoção e baixa solubilidade, e pelo dano provocado à zona próxima ao poço produtor, onde a mistura entre as águas incompatíveis é mais intensa. O mesmo tipo de problema ocorre para outros tipos de sulfatos, como o de estrôncio.*

*Desenvolve-se neste trabalho modelos e algoritmos para simular a incrustação de sulfatos em representações tridimensionais de rochas reservatório. Utilizando-se técnicas de análise de imagens de microfotografias de rochas reservatório oriundas de bacias brasileiras (fornecidas pelo CENPES), geram-se representações tridimensionais da rocha original. Estas representações são incrustadas numericamente e a permeabilidade é então determinada com o método do grafo de conexão serial, permitindo a determinação da queda do índice de injetividade em função do volume incrustado e a obtenção do coeficiente de dano de formação.*

*Os modelos propostos levam em consideração a influência da organização morfológica do meio poroso, bem como a própria morfologia apresentada pelo material incrustante. Três tipos diferentes de modelos de incrustação foram desenvolvidos: ao redor do poro (pore-lining), preenchendo o poro (pore-filling) e dendrítica. Através das simulações realizadas foi possível analisar: i) os efeitos sobre a representação incrustada (porosidade, superfície específica e conectividade), ii) efeitos sobre a redução da permeabilidade (dano de formação).*

*A principal vantagem do uso da abordagem proposta é a possibilidade da utilização de amostras de calha (obtidas por uma fração do custo de um testemunho), amostras laterais e testemunhos danificados, assim como a realização de simulações computacionais reproduzíveis em lugar de ensaios laboratoriais destrutivos.*

*Um software de análise de imagens de rochas reservatório desenvolvido como parte das atividades de pesquisa e utilizado para possibilitar a implementação dos algoritmos também é apresentado. O programa multiplataforma, consistindo de 15.000 linhas de código C++ orientado a objeto e projetado com a utilização de técnicas de engenharia de software, possui uma interface gráfica amigável e permite a visualização e manipulação*



---

*de imagens, representações tridimensionais e gráficos. Todas as simulações apresentadas neste estudo foram realizadas com o software desenvolvido.*

**Palavras chave:** incrustação, dano de formação, análise de imagens, reconstrução tridimensional, permeabilidade.

---

# “Assessing Permeability Impairment Due to Scale in Reservoir Rocks Using Image Analysis Methods”

## Abstract

*Barium sulphate scaling is a chronic problem in the Campos Basin, where the most usual secondary recovery technic is waterflooding (which corresponds to 85% of total oil volume produced). BaSO<sub>4</sub> scale deposition occurs when the injected water, rich in sulphate ions, is mixed with the formation water, rich in barium ions, resulting in solid precipitate accumulation in the wellbore, well tubings and near wellbore formation. The problem is further aggravated by the hardness and low solubility of the salt, as well as the formation damage which occurs near the production well, where the mixing between the incompatible waters is more intense. Other sulphates, such as SrSO<sub>4</sub>, also cause the same problem.*

*In this work, new models and algorithms to simulate sulphate scaling in reconstructed reservoir rocks are presented. Tridimensional reconstructed rocks are obtained from high resolution images of thin sections of rocks found in Brazilian basins (contributed by CENPES). These reconstructed rocks are numerically scaled and permeability is then calculated by the serial connection graph, allowing the determination of the injectivity index impairment as a function of the total volume precipitated and the estimation of the formation damage coefficient.*

*The proposed models consider the influence of the geometric and topological organization of the porous media, as well as the morphology of the scaling phase itself. Three different scaling models were designed: pore-lining, pore-filling and dendritic. Analysis of the simulation results made it possible to assess the: i) effects on the scaled reconstructed rock (porosity, specific surface and connectivity), ii) effects over permeability reduction (formation damage).*

*The main advantage of the proposed approach is the possibility to use small rock samples, like drill cuttings and sidewall samples, which can be obtained by a small fraction of the of a full core. Another benefit is that destructive laboratorial experiments are replaced by fully reproducible computer simulations.*

*An image analysis software developed as part of the research project is also presented. The multiplatform software, comprised of 15,000 C++ object oriented lines of code and designed with software engineering technics, is used to execute the simulations and to allow the implementation of the new algorithms. The new software has a friendly graphical user interface and allows the visualization and manipulation of images, reconstructed rocks and graph plots.*

**Key Words:** scaling, formation damage, image analysis, stochastic 3D reconstruction, permeability.

# Capítulo 1

## Introdução

No presente trabalho desenvolvem-se modelos baseados no uso de técnicas de análise de imagens para simular a incrustação de sulfatos em representações tridimensionais das rochas reservatório. Um software de análise de imagens de rochas reservatório, desenvolvido em paralelo as atividades de pesquisa, é utilizado para realização de simulações de incrustação e cálculo do dano de formação de um conjunto de imagens de rochas reservatório fornecidas pelo CENPES/PETROBRAS; analisa-se ainda o efeito das incrustações nas representações 3D.

### 1.1 Escopo do Problema

A incrustação de sulfatos no interior de rochas reservatório de petróleo é fonte de grandes prejuízos econômicos, pois causa a redução da permeabilidade, a queda da injetividade e o conseqüente aumento do custo de extração do petróleo. Este problema é recorrente na Bacia de Campos, onde a forma mais comum de recuperação secundária é a injeção de água do mar (corresponde a 85% do óleo produzido).

A incrustação por sulfato de bário em reservatórios ocorre devido à mistura de águas quimicamente incompatíveis. A reação ocorre quando a água de formação, rica em bário, entra em contato com a água do mar injetada, rica em sulfatos, causando a formação de sulfato de bário. A formação de sulfato de bário sólido a partir da reação entre os íons aquosos ocorre de acordo com a seguinte equação:



O problema é agravado pelas propriedades físico-químicas da sulfato de bário, um sal de difícil remoção e baixa solubilidade, o que impossibilita o controle da incrustação através da acidificação. Outro fator agravante é que a mistura entre as águas incompatíveis é mais intensa na área próxima ao poço produtor (veja a figura 1.1), causando uma drástica redução do índice de produtividade.

Uma das soluções atualmente utilizadas para reduzir o problema é o uso de inibido-

res, mas a mesma apresenta problemas operacionais e custo elevado, sendo importante o desenvolvimento de estudos, teóricos e aplicados, relacionados à caracterização da incrustação e seu efeito sobre a permeabilidade de rochas reservatório. Observe que o mesmo tipo de problema ocorre com outros tipos de sulfatos, como o de cálcio e o de estrôncio.

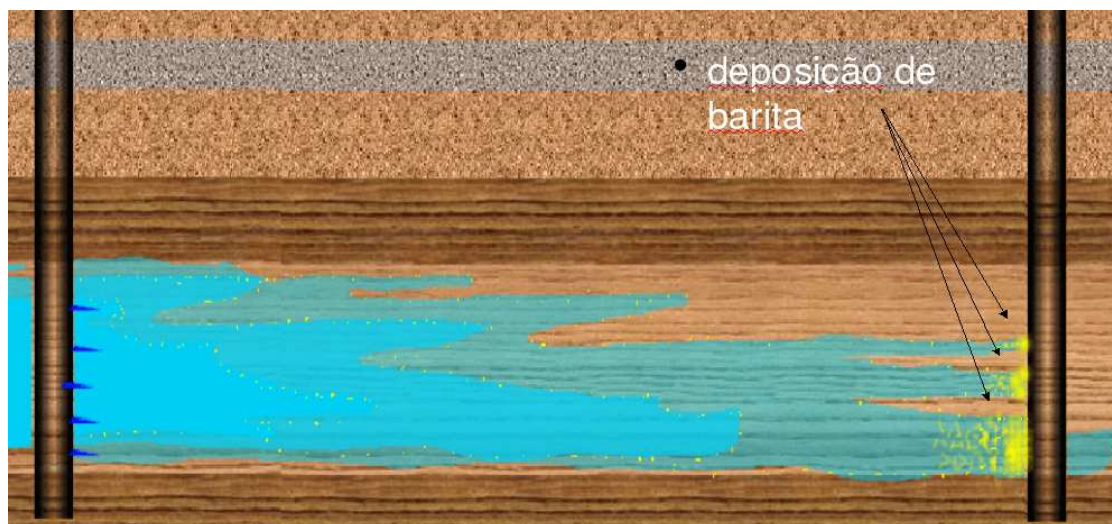


Figura 1.1: Esquema de um reservatório apresentando incrustação de sulfato de bário ao redor do poço produtor. Fonte: (GLADSTONE, 2004).

(SORBIE; MACKAY, 2000) modelaram os mecanismos de mistura das águas de injeção e de formação. O principal mecanismo de deslocamento da água de formação pela água de injeção é o deslocamento frontal linear, onde um banco de água de injeção desloca um banco de água de formação com uma zona relativamente pequena entre os dois bancos onde ocorre a mistura das águas e deposição de sulfato de bário.

(NANCOLLAS; LIU, 1975) descreveram os eventos do processo de deposição de sulfato de bário; segundo os autores a reação é geralmente controlada pelo transporte de íons incrustantes até a superfície de um cristal ou outro substrato, exceto quando a supersaturação é suficientemente grande para gerar cristais dendríticos, sendo então controlada pela difusão. Segundo o estudo, a taxa da reação é proporcional ao quadrado da supersaturação e independe da dinâmica de fluxo para baixas velocidades.

(WAT et al., 1992) realizaram experimentos injetando águas de formação e marinha sintéticas em *sandpacks* de sílica, com e sem a presença de inibidores. Os autores concluem que o processo de precipitação parece ser dominado pela nucleação heterogênea.

(TODD; YUAN, 1992) realizaram experimentos de incrustação de sulfato de bário em altas temperaturas ( $70^{\circ}\text{C}$ ) para diversas salmouras com diferentes graus de supersaturação de sulfato de bário. Apesar de poucos experimentos de incrustação terem sido realizados, existe uma tendência para que soluções com maior supersaturação apresentem maior queda de permeabilidade em função da redução da porosidade, provavelmente devido as diferenças morfológicas entre os cristais.

Através da revisão bibliográfica realizada, verificou-se que a solução deste problema requer uma análise integral, considerando a utilização de métodos científicos avançados, abordando as áreas de modelagem matemática, modelagem experimental e modelagem computacional. O estudo do problema através da modelagem matemática tem sido desenvolvida por (BEDRIKOVETSKY et al., 2003; BEDRIKOVETSKY, 1993). Recentemente, foi montado no LENEP/UENF com apoio do CENPES/PETROBRAS, um equipamento para determinação experimental do dano de formação ocasionado pela precipitação de sulfatos.

A metodologia utilizada neste trabalho para solucionar o problema da caracterização dos efeitos da incrustação baseia-se no uso de técnicas de análise de imagens, sendo, portanto, uma abordagem computacional. Acredita-se que com o uso destas três abordagens, o problema poderá ser compreendido, e soluções técnicas viáveis possam ser desenvolvidas.

Nas duas últimas décadas o desenvolvimento da indústria de computadores proporcionou um grande aumento do poder computacional e a redução dos seus custos. Neste mesmo período novos métodos de determinação de propriedades petrofísicas a partir da análise de imagens petrográficas foram desenvolvidas aproveitando as possibilidades oferecidas por computadores mais velozes e baratos<sup>1</sup>.

No rastro do desenvolvimento da informática e do aumento da capacidade dos sistemas de aquisição de imagens como os microscópicos eletrônicos e óticos (YUNES, 1993), surgiu a área de análise de imagens (GONZALES; WOODS, 1993; RUSS, 1998), e suas aplicações. Ao mesmo tempo, foram desenvolvidos novos métodos de determinação de propriedades petrofísicas a partir da análise de imagens petrográficas (BERRYMAN, 1984; BUENO, 2001; BUENO; MAGNANI; PHILIPPI, 2002; CEREPÍ; HUMBERT; BURLOT, 2001; JAMES, 1995; COSKUM; WARDLAW, 1996; LOCK et al., 2002; OREN; BAKKE, 2002).

A grande vantagem dos métodos de determinação de propriedades de rochas a partir da análise de imagens reside na possibilidade de poder determinar estas propriedades petrofísicas a partir de amostras de calha. Métodos laboratoriais necessitam de amostras maiores, isto é, testemunhos do reservatório, que são obtidos com procedimentos extremamente caros, enquanto as amostras de calha podem ser obtidas durante o processo de perfuração do poço sem nenhum custo adicional. Além disso, métodos de reconstrução tridimensional permitem gerar representações tridimensionais do meio poroso que reproduzem a microgeometria e a conectividade da rocha original, aumentando a precisão do método ao não depender de fórmulas empíricas que levam em consideração apenas alguns poucos parâmetros (porosidade, distribuição de tamanho de poros) obtidos a partir de

---

<sup>1</sup>Atualmente um computador com custo de três mil reais (cerca de US\$ 1.300) como o Pentium IV (2.8GHz), possibilita o processamento de 8196 MIPS (milhões de operações sobre números inteiros ou operações lógicas) e 2408 MFLOPS (milhões de operações sobre números flutuantes de dupla precisão, isto é, de 64 bits), enquanto no início dos anos 80 um processador 8086 da intel executava 0.25 MIPS e não possuía uma unidade de processamento de ponto flutuante. É importante observar que estas medidas de *benchmarking* não são diretamente proporcionais ao desempenho do processador, mas fatores relevantes entre outros (como tamanho e velocidade da memória *cache* interna, paralelismo, conjunto de instruções utilizadas, etc) (HENESSY; PATTERSON, 1993).

análises da imagem da rocha no plano bidimensional.

O estudo de rochas reservatório com uso de análise de imagens passa pelas seguintes etapas: Primeiramente, lâminas delgadas das amostras de rochas são fotografadas com o auxílio de um microscópio, realiza-se então a binarização das imagens, seguida da etapa de caracterização, onde informações estatísticas do meio poroso original são extraídas a partir das imagens binarizadas. As informações estatísticas obtidas, que incluem a porosidade, a curva de autocorrelação e a distribuição de tamanho de poros, são então utilizadas como parâmetros de entrada para algoritmos de reconstrução tridimensional que reproduzem a organização topológica e morfológica da rocha original.

O desenvolvimento no LMPT/UFSC (Laboratório de Meio Porosos e Propriedades Termofísicas) de diversas teses de mestrado e doutorado e projetos de pesquisa na área de análise de imagens de rochas reservatório possibilitaram o desenvolvimento do Imago, um software multiplataforma, nacional, que pode ser utilizado como um “laboratório virtual de petrofísica”, onde propriedades como porosidade, permeabilidade absoluta e configurações de equilíbrio podem ser determinadas a partir de imagens da rocha original (DAMIANI et al., 2000). Este tipo de software tem se demonstrado uma ferramenta suplementar importante em laboratórios de engenharia (notadamente engenharia de petróleo e de materiais). Seguindo o exemplo do LMPT e com o objetivo de formar uma cultura de desenvolvimento de programas profissionais dentro do LENEP, desenvolve-se neste trabalho um programa para análise e processamento de imagens, sendo o mesmo utilizado para implementação dos algoritmos e teste dos modelos desenvolvidos.

## 1.2 Objetivos

Os objetivos deste trabalho são:

⇒ Determinar o dano de formação e redução da permeabilidade provocados pela incrustação de sulfato de bário em rochas reservatório. Determinar os efeitos da incrustação sobre a representação tridimensional (porosidade, superfície específica e conectividade).

⇒ Desenvolvimento de modelos e algoritmos para simulação da incrustação de sulfato de bário em representações tridimensionais da rocha reservatório, estendendo a metodologia de análise de imagens.

⇒ Criar um software de análise de imagens de rochas reservatório capaz de realizar as tarefas necessárias para a realização das simulações de incrustação de rochas por sulfato de bário, como filtragem, binarização, caracterização, reconstrução tridimensional e determinação de propriedades petrofísicas como porosidade, permeabilidade e superfície específica.

O presente trabalho, de caráter teórico, está relacionado ao estudo de meios porosos, mais especificamente à caracterização do dano de formação em rochas reservatório em função da precipitação de sulfatos. Envolve o desenvolvimento de modelos e algoritmos para incrustação do sulfato de bário em representações tridimensionais da rocha reservatório

com uso de técnicas de análise de imagens. O tema é relacionado às seguintes áreas de conhecimento: i) engenharia de reservatório, ii) estudo e caracterização do meio poroso, iii) determinação de propriedades petrofísicas, iv) processamento e análise de imagens.

A *originalidade do tema* está associada ao desenvolvimento de modelos e algoritmos de incrustação aplicados ao problema da queda de permeabilidade devida à incrustação da rocha por sulfato de bário, levando em consideração a organização morfológica do meio poroso e do material incrustante.

### 1.3 Organização do Documento

No Capítulo 2, “Revisão Bibliográfica”, apresenta-se as técnicas utilizadas no processamento e análise de imagens, assim como sua importância e a ordem em que são utilizadas no processo de caracterização de imagens de rochas reservatório. São revistos métodos de reconstrução tridimensional de meios porosos a partir de imagens de rochas reservatório e o modelo do grafo de conexão serial para estimativa da permeabilidade intrínseca. Trabalhos recentes sobre incrustação também são apresentados.

No Capítulo 3, “Metodologia”, delineiam-se os objetivos da pesquisa e descrevem-se os dados utilizados e a sua origem.

No Capítulo 4, “Algoritmos de Incrustação”, apresentam-se modelos e algoritmos desenvolvidos para simular o processo de incrustação de sulfato de bário em representações tridimensionais.

No Capítulo 5, “Resultados”, analisam-se os resultados das simulações de incrustação em representações tridimensionais (os efeitos sobre a porosidade, superfície específica e conectividade). O comportamento da permeabilidade em função do volume incrustado.

Finalmente, no capítulo 6 apresenta-se as “Conclusões”, e no capítulo 7 “Sugestões para Trabalhos Futuros”.

Apresenta-se a seguir as “Referências Bibliográficas” e os “Apêndices”:

Apêndice A: “Manual do Usuário”, descreve o programa desenvolvido durante a pesquisa sob a perspectiva do usuário. A interface gráfica é discutida em detalhes e as funções realizadas pelo software são apresentadas.

Apêndice B: “Manual do Desenvolvedor”, onde especifica-se a metodologia de desenvolvimento, a linguagem de programação, a arquitetura do software e as bibliotecas utilizadas na feitura do sistema.

# Capítulo 2

## Revisão Bibliográfica

Apresenta-se neste capítulo um conjunto de conceitos e definições básicas da área de análise de imagens, que são utilizados ao longo da dissertação. Também é feita uma introdução aos métodos de reconstrução tridimensional, de determinação da permeabilidade, e ao problema da incrustação em rochas reservatório de petróleo.

### 2.1 Análise de Imagens

Muitos autores foram capazes de determinar com boa precisão propriedades do meio poroso como porosidade, permeabilidade, curva de pressão capilar, propriedades elétricas e composição mineralógica, estabelecendo a análise de imagens como uma técnica de baixo custo e capaz de fornecer resultados satisfatórios (COSKUM; WARDLAW, 1996; GIES, 2003; LIANG; IOANNIDIS; CHATZIS, 2000; IOANNIDIS; KWIECIEN; CHATZIS, 1996; OREN; BAKKE, 2002; BUENO; PHILIPPI, 2002; ZHIRONG, 1997; FENS, 2000). As etapas realizadas com o objetivo de determinar propriedades petrofísicas das rochas com o uso de métodos de análise de imagens são ilustrados na figura 2.1.

Apesar de sua história recente a fundamentação teórica da análise de imagens de rochas é bem mais antiga. Em 1847 o geólogo francês Delesse provou que a densidade volumétrica dos vários componentes que formam uma rocha pode ser estimada em seções (cortes) aleatórias através da medição das suas áreas relativas (GIES, 2003). Este é um dos princípios fundamentais da estereologia, um ramo da matemática aplicada e da teoria da probabilidade dedicado à quantificação de estruturas de dimensão  $n+1$  (tridimensionais) a partir de seções de dimensão  $n$  (bidimensionais) (COSTER; CHERMANT, 1989; RUSS, 1999). A Figura 2.1 mostra as etapas para determinação de petrofísicas com uso de análise de imagens, as mesmas serão detalhadas a seguir.



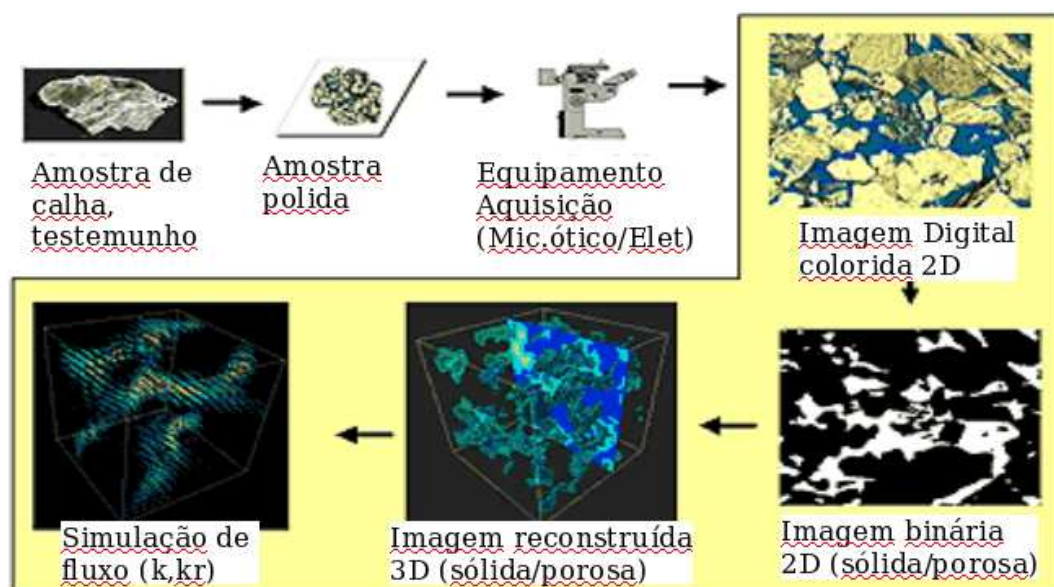


Figura 2.1: Etapas para determinação de propriedades petrofísicas com uso de análise de imagens. Fonte: (LMPT, 2006).

### 2.1.1 Preparação das Amostras de Rocha

Uma lâmina delgada é obtida a partir de uma fina camada de rocha, que é lixada e polida até ficar com uma espessura de aproximadamente 30 microns. Com esta espessura a maioria dos minerais é transparente e podem ser observados através de um microscópio ótico por luz transmitida (FENS, 2000). Caso a rocha contenha hidrocarbonetos ou lama de perfuração, ambos devem ser removidos com o uso de solventes. Para fixar os grãos, a fim de evitar a desestruturação e rearranjos estruturais, a amostra é impregnada sob vácuo com uma resina epoxi azul (veja a figura 2.2.a). A cor azul é utilizada por ser incomum em rochas reservatório, o que facilita a etapa de segmentação das fases sólida e porosa.

Depois da secagem da resina, a amostra é polida com lixas de carvão de silício e posteriormente, pastas de diamantes com granulometrias decrescentes (15, 9, 6, 3, 1 e 0.25 microns) que são utilizadas para obter um polimento mais fino. Uma politriz automática refrigerada a água como a da figura 2.2.a é utilizada. A cada troca de pasta ou lixa, os resíduos de abrasivos ou cristais de diamante devem ser removidos com ultra-som (YUNES, 1993). Para obter uma imagem onde a fase porosa apresente uma intensidade e matiz constantes, para facilitar a segmentação das fases, é importante que a espessura da lâmina, a iluminação e a concentração da resina sejam constantes.

Para a obtenção de imagens com maior resolução pode-se utilizar um microscópio eletrônico no modo BSE (*backscattered electron*). A resina utilizada deve apresentar uma baixa massa atômica para aumentar o contraste entre a fase sólida e porosa e a amostra deve ser coberta por uma fina camada de carbono para impedir efeitos de carga (FENS, 2000). Além disso, devido à maior resolução obtida pelo microscópio eletrônico, o poli-

mento deve ser mais rigoroso.



(a) politriz automática;



(b) impregnação da amostra por resina feita a vácuo.

Figura 2.2: Preparação das amostras.



(a) superfície polida pronta para ser observada



(b) lâmina delgada para observação sob luz transmitida.

Figura 2.3: Amostras.

### 2.1.2 Digitalização

O segundo passo do método de análise de imagens de rochas reservatório é a aquisição da imagem. Para isso são requeridos dois elementos: um instrumento sensível a uma faixa no espectro eletromagnético (raios-x, ultravioleta, visível ou infravermelho) e um digitalizador (*scanner* de mesa). Existem equipamentos que incorporam as duas funções como as câmeras digitais que possuem sensores discretos (CCDs, *chargecoupled devices*), alguns microscópios possuem câmeras digitais embutidas que podem ser utilizadas para uma rápida aquisição (GONZALES; WOODS, 1993) (veja a figura 2.4.a).

Para poder ser processada por um sistema computacional, uma imagem (que possui um domínio analógico) deve ser convertida para um domínio discreto (digital) podendo ser armazenado e manipulado por computadores digitais. Este processo deve ser realizado tanto no espaço bidimensional como na amplitude da imagem, a digitalização no

domínio espacial é chamada de amostragem, e a digitalização da amplitude é chamada de quantização (GONZALES; WOODS, 1993; GOMES; VELHO, 1994).

Amostragem uniforme: Este processo pode ser visto como o particionamento da imagem em uma malha quadrada de dimensões  $M \times N$  (veja Figura 2.4.b), onde cada célula assumirá o valor da média dos valores de intensidade (para uma imagem em tons de cinza) detectados no espaço analógico. Assim temos:

$$f_A(P) = \frac{1}{S_P} \int_{V_P} f(x, y) dx dy \quad (2.1)$$

onde  $f_A(P)$  é o valor da intensidade para o ponto (pixel)  $P$ ,  $dx = dy$ ,  $f(x, y)$  é a função contínua da intensidade da imagem,  $V_P$  é a superfície da célula associada a  $P$  e  $S_P$  é a área correspondente ao ponto  $P$  (FERNANDES, 1994). Note que a função  $f_A(ZxZ) \rightarrow R$  e  $f(RxR) \rightarrow R$ .

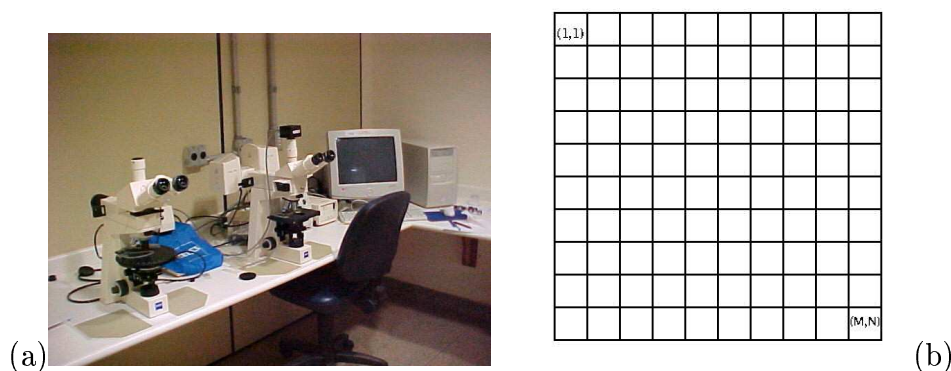


Figura 2.4: (a) Microscópio óptico utilizado para obtenção das imagens. (b) Malha de dimensões  $M \times N$  (cada célula corresponde a um pixel).

Quantização: Após a determinação de  $f_A(P)$  também é necessário discretizar os valores de intensidade desta função em valores inteiros de níveis de cinza entre 0 (preto) e  $G$  (branco). Geralmente utiliza-se um número de níveis de cinza  $G = 2^m$  onde  $m$  é o número de bits necessário para representar um nível de cinza. Portanto se utilizarmos  $2^8 = 256$  níveis, teremos valores entre 0 e 255 e cada ponto da imagem utilizará 8 bits de armazenagem em disco ou memória. Logo, o espaço de armazenagem total requerido pela imagem é  $M.N.m$ .

É importante notar que a qualidade da imagem diminui com a diminuição de  $M$ ,  $N$  e  $m$ , mas por outro lado, o espaço de armazenagem e o tempo de processamento também diminuem. Existe, portanto, uma delicada relação de custo-benefício que deve ser resolvida no processo de digitalização, lembrando que o conceito de "qualidade da imagem" varia de acordo com o uso e os métodos de processamento e interpretação que serão aplicados sobre a mesma. A pergunta que devemos fazer é: Qual a qualidade que deve ser apresentada por uma imagem digital de uma seção delgada de uma rocha para realizar uma caracterização de suas propriedades físicas?

M	N	m	tamanho [kB]	algoritmo A com $O(n)^2$ [s]	algoritmo B com $O(n)^3$ [s]
20	30	8	0,6	0,01	0,01
60	90	8	5,4	$\sim 0,1$	$\sim 1$
480	640	8	307,0	$\sim 5$	$\sim 3.600$ (1 dia)
3000	3000	8	9000,0	$\sim 150$	$\sim 2.600.000$ (30 dias)

Tabela 2.1: Tamanhos e tempos de processamento de imagens com diferentes valores de M, N e m.

Segundo (BUENO, 2001, 2005) a amostragem de microfotografias de rochas reservatório deve preservar a informação dos poros que têm raio crítico  $R_c$ , de grande importância para a permeabilidade (DULLIEN, 1992), e ter uma dimensão suficientemente grande para abranger vários poros largos (entre 5 e 10 vezes o diâmetro do maior poro encontrado na imagem) a fim de ser estatisticamente representativa. Desta forma, o tamanho do pixel deve ser menor do que o diâmetro crítico  $D_c$  (SANTOS et al., 2002a; BUENO, 2005).

Isto pode trazer problemas para escolher a dimensão de imagens onde  $R_c$  é muito menor do que o raio de um poro considerado grande. No caso de uma imagem com  $R_c=2 \mu m$ , onde o tamanho do pixel será de  $\alpha = R_c/2 = 1 \mu m$ , e poros largos de  $100 \mu m$  (100 pixels) teríamos uma imagem entre  $500 \times 500$  e  $1000 \times 1000$  pixels, o que aumentaria em muito o tempo de processamento, especialmente para algoritmos de reconstrução tridimensional como o da gaussiana truncada. O valor de  $m$  utilizado na quantização geralmente é de 8 bits, considerado mais do que suficiente para permitir uma boa segmentação da imagem.

A Figura 2.5 mostra a efeito da discretização em uma imagem mostrando duas peças de xadrez. Apesar de apresentar má qualidade para a visualização humana a imagem da Figura 2.5.c é satisfatória caso o objetivo seja identificar o número de peças existentes na imagem. Todas as imagens digitalizadas apresentam a perda das frequências mais altas, que fica evidente ao observarmos o desaparecimento das linhas horizontais existentes no fundo da Figura 2.5.a. Enquanto nas figuras 2.5.b e 2.5.c as linhas desapareceram, na figura 2.5.d pode-se perceber o efeito de *aliasing*<sup>1</sup> (SEUL; O'GORMAN; SAMMON, 1993) sobre as linhas horizontais causado por uma discretização feita com valores pontuais de  $f$  em vez do uso da média para o cálculo de  $f_A$ .

Na Tabela 2.1 vemos como as dimensões da imagem influenciam no espaço utilizado em disco e memória e no tempo de processamento. No exemplo, A e B são dois algoritmos diferentes com ordens de complexidade (TOSCANI; VELOSO, 2002)  $O(n)^2$  e  $O(n)^3$ , respectivamente, que para uma imagem de  $20 \times 30$  apresentam um tempo de processamento bastante rápido. É fácil perceber o impacto causado pelo aumento do tamanho da imagem no algoritmo com maior ordem de complexidade, mostrando a importância da escolha da dimensão das imagens e da necessidade de se projetar algoritmos eficientes para o seu

<sup>1</sup>O efeito de *aliasing* impede a recuperação completa de uma função sub-amostrada. Este problema pode ocorrer com imagens digitalizadas submetidas a uma operação de redimensionamento, onde a imagem resultante possui uma dimensão menor do que a da imagem original.

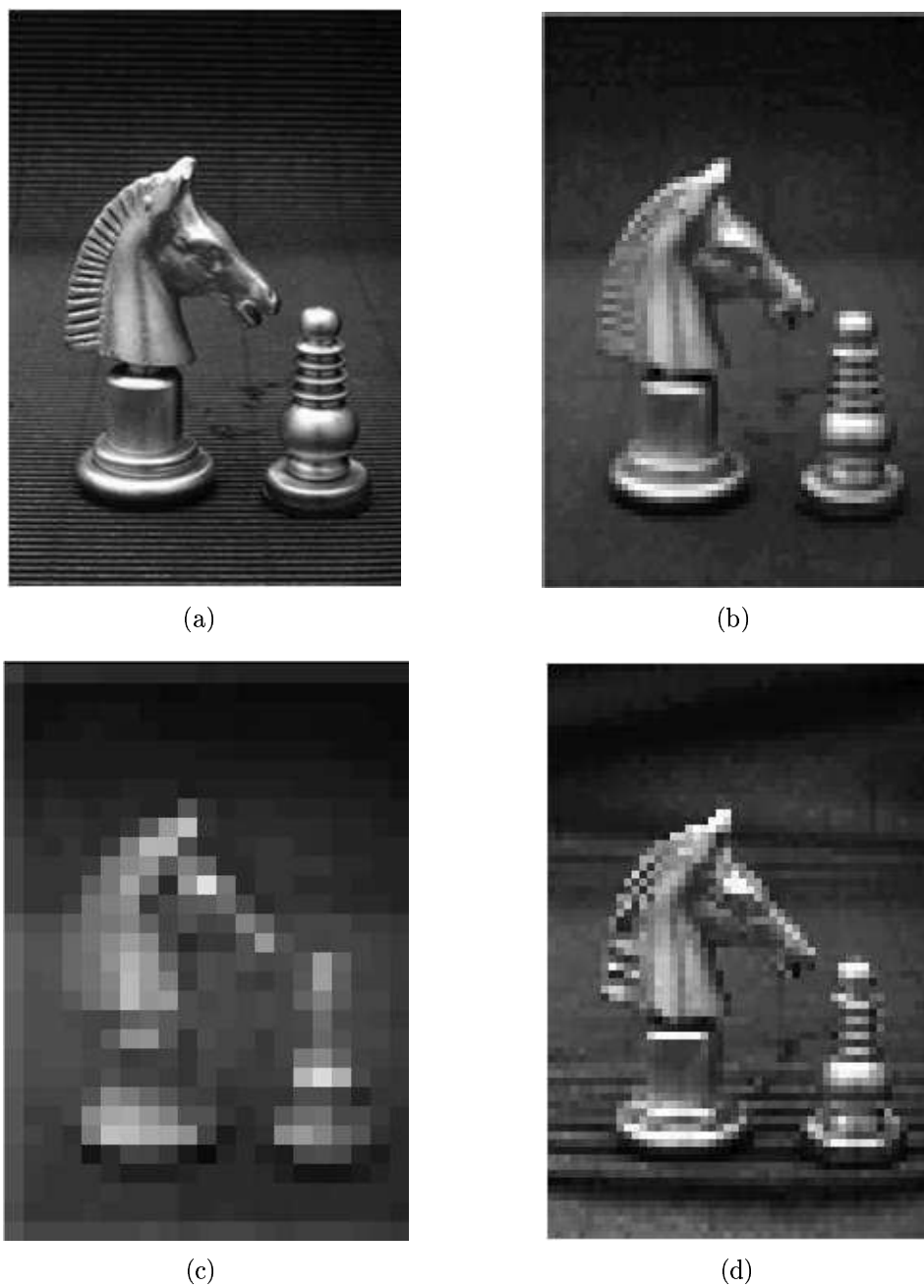


Figura 2.5: Efeito da discretização de imagens. (a) imagem com alta resolução, com  $M=205$ ,  $N=302$  e  $m=8$ ; (b) imagem com  $M=60$ ,  $N=90$  e  $m=8$ ; (c) imagem com  $M=20$ ,  $N=30$  e  $m=8$ ; (d) imagem com  $M=60$ ,  $N=90$  e  $m=8$  apresentando *aliasing*.

processamento.

### 2.1.3 Pré-Processamento

Devido a problemas na fase de aquisição uma imagem pode apresentar diversos problemas que dificultarão a sua correta interpretação por um sistema automatizado de análise de imagens. Entre os defeitos mais comumente encontrados neste tipo de imagem podemos citar: presença de ruído, distorção geométrica em imagens digitalizadas por *scanners* e problemas de iluminação. Caso a imagem não apresente uma boa qualidade, uma etapa de pré-processamento é recomendada antes de ser efetuada a binarização.

Existem diversos tipos de algoritmos capazes de corrigir ou minimizar defeitos em imagens digitais, além de uma vasta bibliografia disponível sobre o assunto (RUSS, 1998; SEUL; O'GORMAN; SAMMON, 1993; GOMES; VELHO, 1994; PARKER, 1996; GONZALES; WOODS, 1993). A técnica mais comumente empregada para corrigir problemas com ruído é a eliminação das altas frequências responsáveis pelo ruído, o que pode ser feito com a utilização de um filtro passa-baixa no domínio espacial ou frequencial. Como a etapa de binarização é sensível a problemas de iluminação, algoritmos de equalização de histograma podem ser aplicados sobre uma imagem que apresente baixo contraste entre as fases de interesse (veja Figura 2.6), melhorando a estimativa da porosidade da rocha. É importante que a etapa de pré-processamento seja cuidadosamente planejada para que informações relevantes não sejam perdidas (BUENO, 2001).

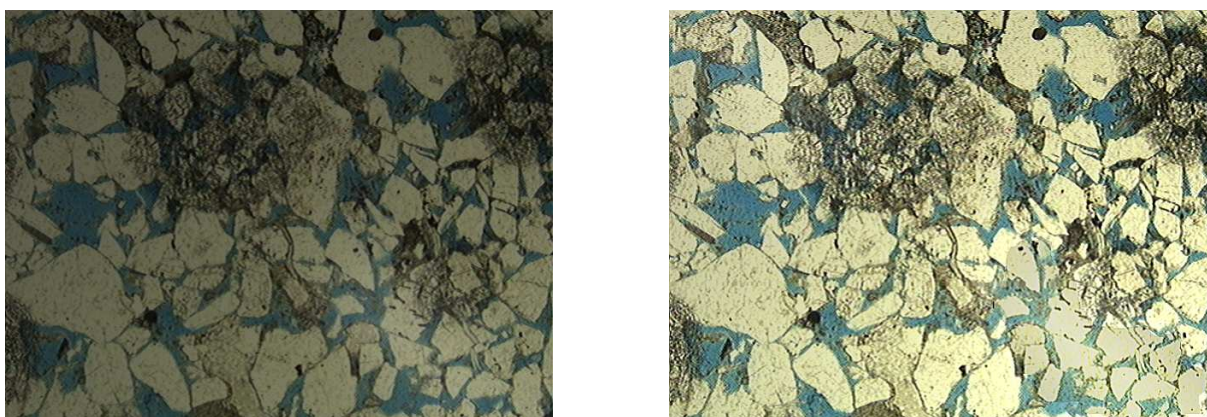


Figura 2.6: Pré-processamento de uma imagem com problemas de iluminação. (a) imagem original; (b) imagem processada com filtros de correção de iluminação.

### 2.1.4 Segmentação ou Binarização

O objetivo da segmentação é subdividir uma imagem em partes ou objetos de interesse. No caso de imagens de rochas reservatório geralmente consideramos apenas duas fases de interesse: a matriz da rocha e o espaço poroso. Neste caso, a imagem é segmentada em duas partes, ou binarizada, para uma imagem monocromática (preto e branco). A binarização é uma etapa crucial no processo de caracterização de uma rocha reservatório,

pois os valores de porosidade e distribuição de tamanho de poros e grãos serão calculados sobre a imagem binária e quaisquer erros na etapa de binarização serão propagados para a etapa de reconstrução tridimensional e conseqüentemente para as simulações de permeabilidade e incrustação. A Figura 2.8.a mostra uma imagem colorida e na Figura 2.8.b podemos ver o resultado da operação de binarização.

O objetivo da binarização é separar a imagem original em fase porosa e matriz sólida<sup>2</sup>, reduzindo a complexidade da imagem e ao mesmo tempo mantendo as informações morfológicas<sup>3</sup> e topológicas<sup>4</sup> do meio poroso, permitindo assim, a caracterização da rocha através do uso de operações morfológicas sobre a imagem binária.

O método mais simples e mais comumente utilizado de binarização consiste na escolha de um tom de cinza como valor de corte, acima do qual todos os pixels serão considerados ligados (assumindo o valor 1 ou 255), enquanto os pixels restantes estarão desligados (assumindo o valor 0). Como as diferenças de iluminação, espessura da amostra e coloração da resina dificultam a implementação de um método automático de binarização, este processo geralmente é executado interativamente através da visualização do histograma para facilitar a escolha de um valor de corte.

Imagens coloridas também podem ser binarizadas, neste caso a escolha de valores de corte deve ser feita para cada componente do sistema de cor (RGB ou HSI). Como o sistema RGB apresenta o problema de que todos os canais costumam acompanhar as variações na intensidade (RUSS, 1998), o sistema HSI (*hue, saturation, intensity*) é o mais indicado. No caso de materiais que apresentem cores características que os diferenciem o sistema RGB pode ser utilizado, como por exemplo na segmentação de imagens de rochas impregnadas com resina epoxi azul que contrastam com a matriz rochosa que geralmente apresenta uma coloração amarela 2.7. Como cada canal de um sistema de cor pode ser visualizado como uma imagem em tons de cinza (veja a Figura 2.8.c), após a binarização de cada canal pelo valor de corte escolhido, a imagem binária resultante será o produto da multiplicação booleana (operação lógica AND) das três imagens binárias, isto é, apenas pixels ligados nas três imagens estarão ligados na imagem final. A Figura 2.9 mostra um diálogo de segmentação de imagens coloridas, observe a presença dos histogramas de intensidade dos canais HSI e dos valores de corte.

### 2.1.5 Operações Morfológicas

As operações morfológicas sobre imagens binarizadas têm diversas aplicações na caracterização de imagens de rochas reservatório, sendo utilizadas para determinar a distribuição de tamanho de poros e grãos, simplificar o meio poroso através da esqueletonização e

---

<sup>2</sup>Alguns autores consideram a argila, contendo microporosidade, como uma terceira fase (FENS, 2000).

<sup>3</sup>Se um parâmetro pode ser obtido diretamente por uma mensuração, dizemos que ele tem uma natureza *morfológica*. No meio poroso a morfologia está associada à forma dos poros.

<sup>4</sup>Se um parâmetro é obtido por uma enumeração, dizemos que ele tem uma natureza *topológica*. No meio poroso a topologia está associada à conectividade dos poros.

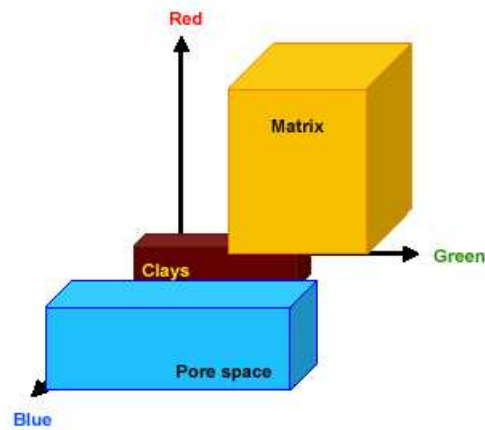


Figura 2.7: Valores de corte para segmentação em três fases (poro, matriz, argila) no espaço RGB utilizados por (FENS, 2000). As argilas localizadas na origem das coordenadas são identificadas pela coloração escura, o espaço poroso pela coloração da resina epoxi azul e as regiões mais claras estão associadas à matriz rochosa.

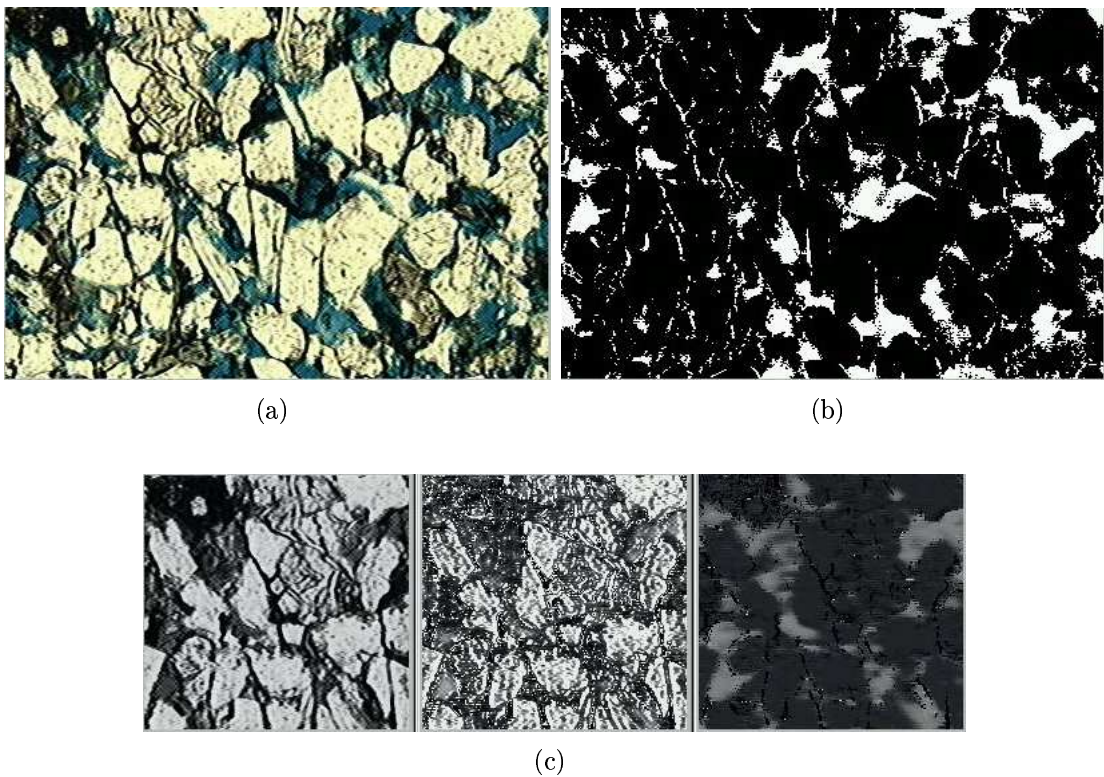


Figura 2.8: Binarização de imagens. (a) imagem original; (b) imagem binarizada; (c) canais de intensidade, saturação e matiz de uma região da imagem original.



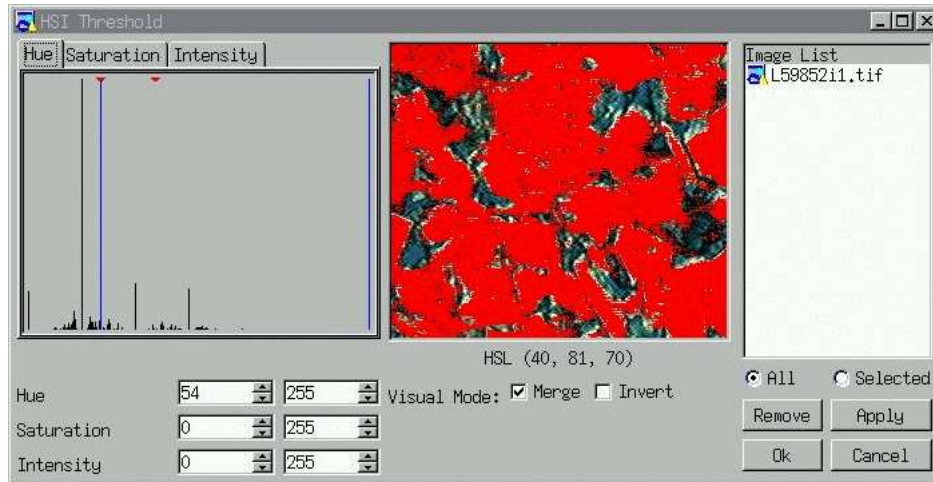


Figura 2.9: Diálogo do para binarização interativa no espaço HSI. A fase sólida aparece destacada em vermelho. Programa Imago (PHILIPPI et al., 2002)

eliminar ruídos. As operações da morfologia matemática (COSTER; CHERMANT, 1989) incluem a erosão, dilatação e as operações derivadas destas, como abertura e fechamento.

**Erosão.** A forma clássica da erosão consiste simplesmente em desligar todos os pixels vizinhos a pixels desligados na imagem original, causando um afinamento das estruturas e eliminando pontos isolados na imagem. Esta operação é utilizada para a obtenção de esqueletos e eliminação de ruídos. A erosão também pode ser realizada com o uso de um operando chamado elemento estruturante  $EE$ , geralmente uma esfera ou octógono, de maneira que:

$$B \ominus EE = \{x \mid (EE)_x \subseteq B\} \quad (2.2)$$

onde  $(EE)_x$  é o  $EE$  transladado até o ponto  $x$ ,  $\ominus$  é o operador de erosão e  $B$  é a imagem binária original. A erosão de  $B$  por  $EE$  é o conjunto de todos os pixels  $x$  onde o  $EE$  transladado está contido em  $B$ .

**Dilatação.** Similarmente à erosão, a forma clássica da dilatação consiste em fazer com que todos os pixels desligados adjacentes a um pixel ligado se tornem ligados. A dilatação com o operando  $EE$  é feita de forma que:

$$B \oplus EE = \{x \mid [(EE)_x \cap B] \neq \emptyset\} \quad (2.3)$$

onde  $\oplus$  é o operador dilatação. A dilatação de  $B$  por  $EE$  é o conjunto de todos os pixels  $x$  onde a intersecção do  $EE$  transladado com a imagem é não nula. Os efeitos da dilatação são o aumento dos objetos que pertencem a imagem, o preenchimento de buracos e a conexão de grãos próximos (compare as figuras 2.10.a e 2.10.c).

**Abertura.** Esta operação é definida como uma erosão seguida de dilatação. Uma abertura faz com que estruturas menores do que o  $EE$  desapareçam da imagem, suaviza

contornos, elimina ligações estreitas (como gargantas de poros) e pequenas protuberâncias.

$$B \circ EE = (B \ominus EE) \oplus EE \quad (2.4)$$

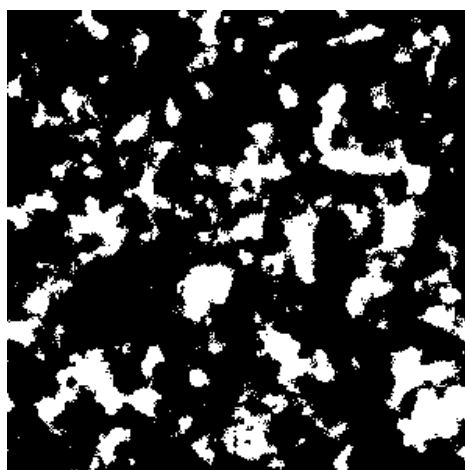
**Fechamento.** Consiste na aplicação do operador dilatação seguido de uma erosão. O fechamento é útil para eliminar pequenos buracos, unir estruturas adjacentes, preenchimento de espaços vazios e suavização de contornos.

$$B \bullet EE = (B \oplus EE) \ominus EE \quad (2.5)$$

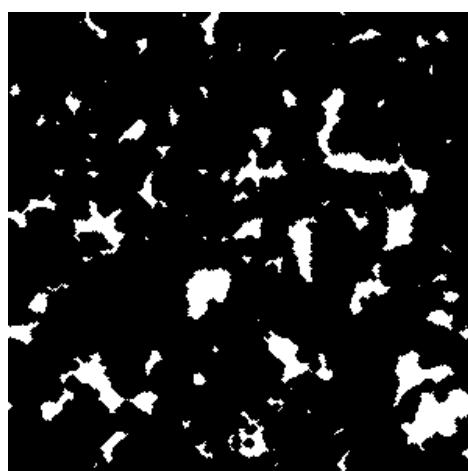
A figura 2.10 mostra os efeitos das diversas operações morfológicas sobre a imagem binarizada de uma rocha. Note que poros não conectados na imagem original (figura 2.10.a) aparecem conectados após a operação de dilatação (figura 2.10.c) e de fechamento (figura 2.10.e). A figura 2.10.d mostra o resultado da operação de abertura, repare que nesta imagem todos os poros e gargantas menores que o elemento estruturante foram eliminados, o mesmo ocorre na operação de erosão apresentada na figura 2.10.b.

As operações morfológicas com o uso de um EE podem ser feitas através de sucessivas operações booleanas entre o EE e a imagem para cada ponto da mesma, mas como esta abordagem apresenta um alto custo de processamento, especialmente no caso de representações tridimensionais, técnicas para acelerar este processo baseados em imagens de distância ao fundo (IDF) foram desenvolvidas. Um mapa de distância euclideana (MDE) (RUSS, 1998) pode ser feito, de forma que cada pixel da fase de interesse (pixel ligado) receba um valor correspondente à distância euclideana do pixel desligado mais próximo. Como o cálculo do MDE envolve a manipulação de números reais (operações entre números de ponto flutuante são mais custosas do que operações entre números inteiros) e encontrar o ponto desligado mais próximo de um ponto ligado pode ser uma tarefa demorada, na prática a distância é medida apenas em algumas direções, em intervalos de 45 ou 90 graus, para gerar uma imagem em tons de cinza conhecida como IDF. (FERNANDES, 1994) descreve em detalhes como é feito o cálculo da IDF com máscaras de chanfro utilizando a métrica  $d_{3-4}$ , e como as operações de erosão e dilatação podem ser otimizadas com o uso desta técnica, de maneira que uma operação de erosão ou dilatação seja equivalente a uma operação de binarização sobre a imagem de distância ao fundo.

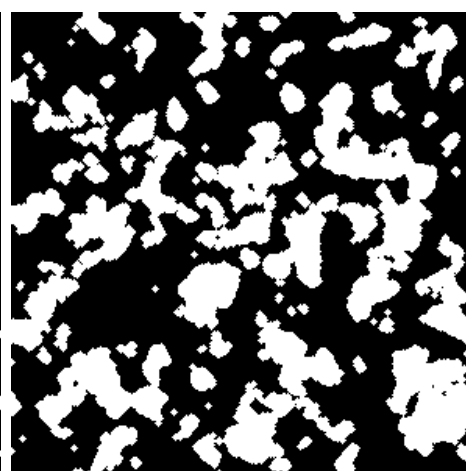
A Figura 2.11.b mostra a imagem de distância ao fundo (em tons de cinza) da Figura 2.11.a. A imagem 2.11.d apresenta a IDF da fase desligada e as imagens 2.11.c e 2.11.e mostram as operações de erosão e dilatação da fase preta realizadas com o uso da IDF.



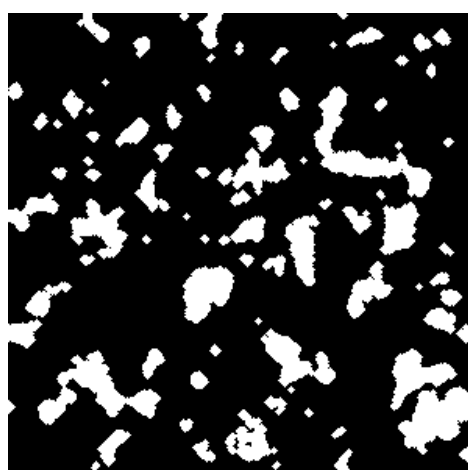
(a) imagem original



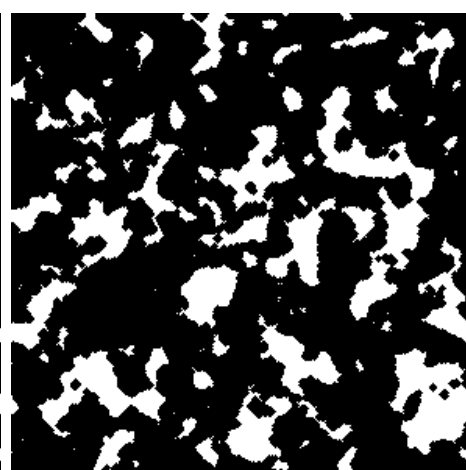
(b) erosão



(c) dilatação



(d) abertura



(e) fechamento

Figura 2.10: Operações realizadas sobre a fase branca com um EE circular de raio de 2 pixels. Note que poros menores do que o EE foram eliminados na figura b.



(a) imagem original.



(b) IDF da fase ligada.



(c) erosão com o uso de binarização da IDF da fase ligada.



(d) IDF da fase desligada.



(e) dilatação através da binarização da IDF da fase desligada.

Figura 2.11: Utilização de imagens de distância ao fundo para otimizar operações morfológicas. Imagens obtidas de (RUSS, 2005).

### 2.1.6 Caracterização de Rochas Reservatório

O processamento da imagem inclui as etapas de pré-processamento e segmentação que têm como objetivo a preparação da imagem para a execução de algoritmos capazes de realizar a análise da imagem propriamente dita. A diferença entre processamento e análise de imagens é o fato de que etapas de processamento apenas alteram a imagem com o fim de possibilitar uma tarefa específica, enquanto a análise da imagem possibilita a extração

de informações contidas na imagem (RUSS, 1998). No caso do meio poroso, representado por uma imagem binarizada de uma lâmina de rocha, algumas informações relevantes podem ser obtidas como a porosidade, superfície específica, distribuição de tamanho de poros e grãos. Apesar das medições automatizadas sobre imagens digitais serem uma tecnologia relativamente nova, os fundamentos matemáticos da estereologia, que permitem a extrapolação de informações coletadas em um plano para o espaço volumétrico que o mesmo atravessa, são bem mais antigos: em 1847 o geólogo francês Delesse provava que a densidade volumétrica dos vários componentes que formam uma rocha pode ser estimada em seções (cortes) aleatórias através da medição das suas áreas relativas (GIES, 2003).

**Porosidade.** A porosidade pode ser determinada através do cálculo da área relativa da fase porosa na imagem binarizada, desta forma a porosidade é igual ao número de pixels pertencentes à fase porosa dividido pelo número total de pixels da imagem. Seja  $\mathbf{x}$  um ponto de coordenada  $(x_1, y_1)$  onde  $x_1, y_1$  são valores inteiros num espaço discreto bidimensional. Pode-se definir a função de fase  $FF(\mathbf{x})$  pela relação:

$$FF(\mathbf{x}) = \begin{cases} 1, & \text{se } \mathbf{x} \text{ pertence ao espaço poroso} \\ 0, & \text{se } \mathbf{x} \text{ não pertence ao espaço poroso} \end{cases} \quad (2.6)$$

Podemos definir a porosidade de maneira formal como:

$$\phi = \langle FF(\mathbf{x}) \rangle \quad (2.7)$$

Onde  $\langle \rangle$  representa a média estatística.

**Covariograma.** Esta função define a probabilidade de dois pontos separados por uma distância  $\mathbf{u}$  pertencerem à fase de interesse:

$$C_{pp}(\mathbf{u}) = \langle (FF(\mathbf{x})FF(\mathbf{x} + \mathbf{u})) \rangle \quad (2.8)$$

Podemos perceber intuitivamente que o valor de  $C_{pp}(\mathbf{u})$  é igual à porosidade para  $\mathbf{u} = 0$  (deslocamento nulo) e tende para  $\phi^2$  para grandes valores de  $u$ . Para o caso de um meio totalmente aleatório  $C_{pp}(1) \cong \phi^2$  e para meios onde existe um padrão repetitivo (meio poroso sintético feito com bolas de gude, por exemplo) os valores de  $C_{pp}(\mathbf{u})$  terão um comportamento cíclico.

**Autocorrelação.** A função autocorrelação é formalmente definida como:

$$R_{pp}(\mathbf{u}) = \frac{\langle (FF(\mathbf{x}) - \phi)(FF(\mathbf{x} + \mathbf{u}) - \phi) \rangle}{\langle (FF(\mathbf{x}) - \phi)^2 \rangle} \quad (2.9)$$

Para cada deslocamento arbitrário  $\mathbf{u}$  no plano da imagem. Assumindo a hipótese de meio isotrópico, temos:

$$R_{pp}(\mathbf{u}) = \frac{\langle (FF(\mathbf{x})FF(\mathbf{x} + \mathbf{u})) \rangle - \phi^2}{\phi - \phi^2} \quad (2.10)$$

A função autocorrelação tem o mesmo comportamento da função covariograma, mas varia de 1 para deslocamento nulo, a 0 para grandes valores de  $u$ . Para um meio isotrópico o cálculo de  $R_{pp}(\mathbf{u})$  e  $C_{pp}(\mathbf{u})$  pode ser feito realizando-se o deslocamento da imagem sobre a sua cópia e fazendo-se sucessivas operações booleanas *AND* sobre as imagens (FERNANDES, 1994). No entanto, resultados mais robustos podem ser obtidos utilizando-se as propriedades da transformada de Fourier definidas no teorema de Wiener-Khinchin (SEUL; O'GORMAN; SAMMON, 1993), que afirma que a transformada do quadrado do espectro frequencial  $P(u, v)$  de uma imagem é igual à função autocorrelação  $C(x, y)$  da mesma. Após a determinação de  $C(x, y)$ , pode-se determinar  $C_{pp}(\mathbf{u})$  através do cálculo da média de  $C(x, y)$  para cada raio  $\mathbf{u}$  (ZHIRONG, 1997).

Por determinar estatisticamente o grau de organização do meio poroso a função autocorrelação é um parâmetro utilizado como dado de entrada para várias classes de algoritmos de reconstrução tridimensional.

A Figura 2.12.a mostra a imagem binarizada de uma rocha e a Figura 2.12.b mostra sua função autocorrelação  $C(x, y)$  obtida através do uso da transformada de Fourier. A Figura 2.12.d apresenta o esquema para obtenção de  $C_{pp}(\mathbf{u})$  a partir de médias realizadas sobre  $C(x, y)$  para cada deslocamento  $\mathbf{u}$ . Note que a curva para  $C_{pp}(\mathbf{u})$ , apresentada na figura 2.12.c, obtida através do método frequencial apresenta um comportamento mais estável, pois leva em consideração deslocamentos realizados em todas as direções.

A Figura 2.13 mostra o comportamento da função autocorrelação obtida através do domínio frequencial para diversos casos. A Figura 2.13.a apresenta uma imagem gerada aleatoriamente, portanto sem correlação entre seus pixels, o que é demonstrado pela sua função autocorrelação que possui apenas um ponto branco em seu centro. Já a Figura 2.13.c mostra que uma imagem com um padrão repetitivo tem o seu padrão isolado e reproduzido na sua função autocorrelação mostrada na Figura 2.13.d. A função autocorrelação também é comumente utilizada para detectar a existência de uma orientação preferencial na imagem, o que fica claramente demonstrado pelas figuras 2.13.e e 2.13.f.

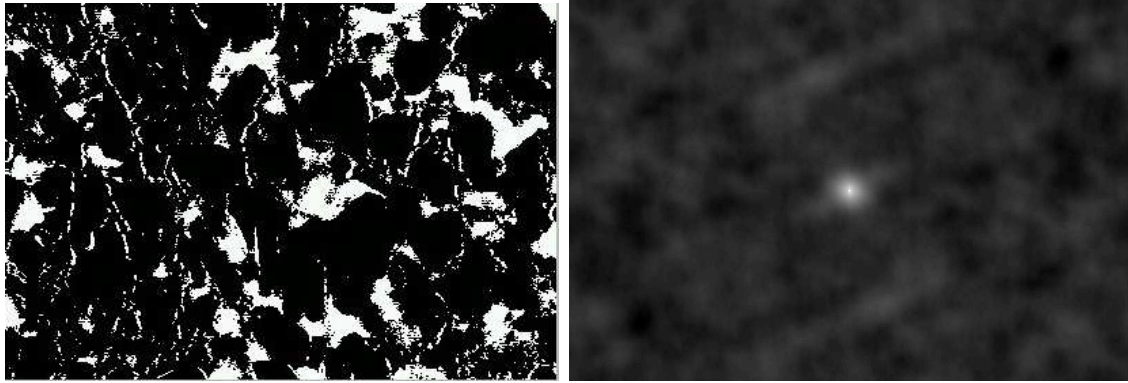
**Conectividade.** A função conectividade  $\zeta(\mathbf{u})$  é bastante semelhante à função covariograma, mas define a probabilidade de dois pontos conectados separados por um deslocamento  $\mathbf{u}$  pertencerem à mesma fase de forma conectada, isto é, a um mesmo agrupamento ou objeto de forma contínua:

$$\zeta(\mathbf{u}) = \langle \delta(FFA(\mathbf{x}), FFA(\mathbf{x} + \mathbf{u})) \rangle \quad (2.11)$$

com:

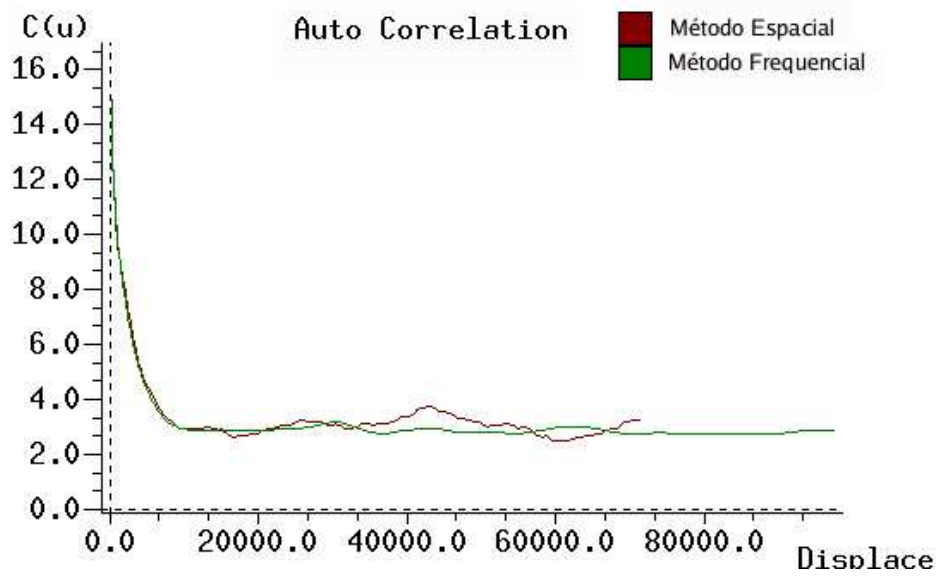
$$FFA(\mathbf{x}) = \begin{cases} k, & \text{se } \mathbf{x} \text{ pertence ao objeto } k \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (2.12)$$

$$\delta(i, j) = \begin{cases} 1 & , \text{ se } i = j \neq 0 \\ 0 & , \text{ se } i \neq j \end{cases} \quad (2.13)$$

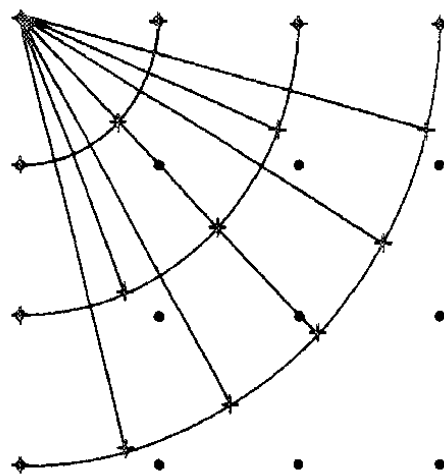


(a) imagem binarizada de uma rocha

(b) função autocorrelação frequencial  $C(x,y)$  da imagem (a)



(c) Função autocorrelação determinada através dos métodos espacial e frequencial



(d) esquema para obtenção de  $C(u)$  a partir de  $C(x,y)$

Figura 2.12: Obtenção da autocorrelação. Figura (c), obtida com o programa Imago (PHILIPPI et al., 2002). Figura (d), fonte: (BERRYMAN, 1984).

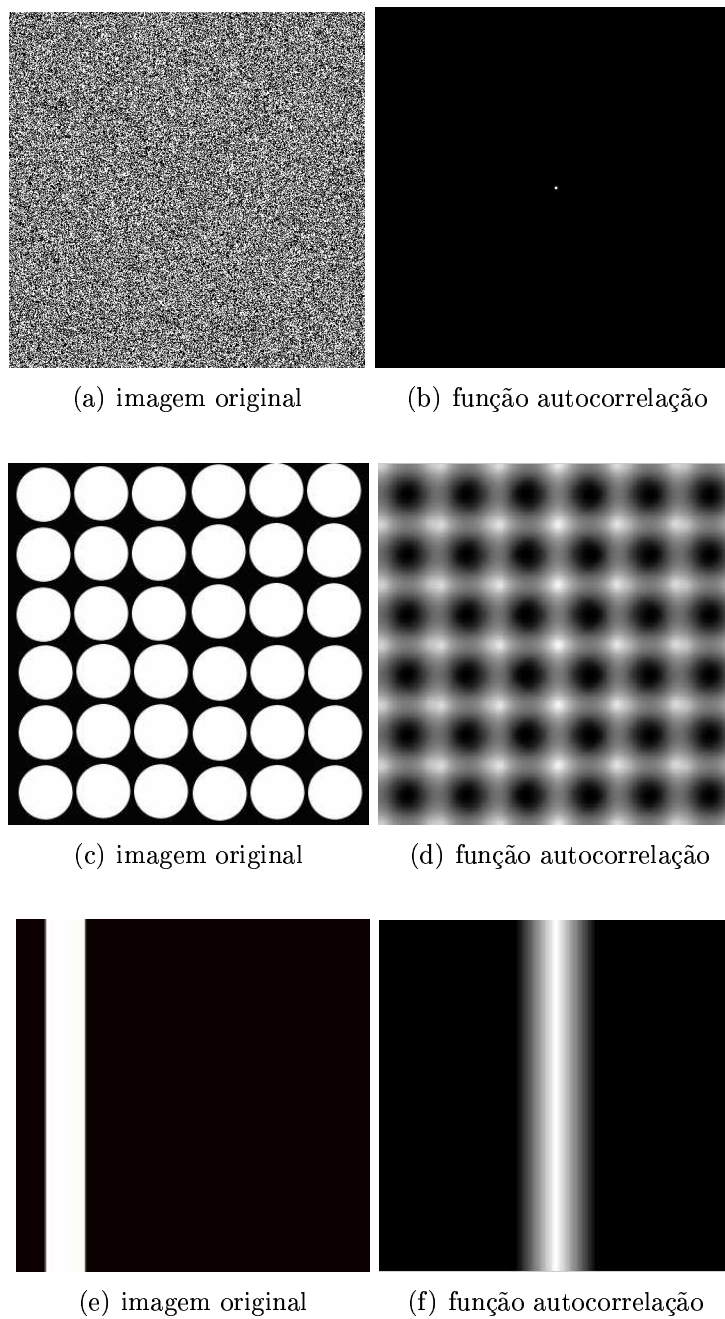


Figura 2.13: Imagens binárias sintéticas (à esquerda) e suas funções frequenciais de autocorrelação (à direita) obtidas com o uso da transformada de Fourier.



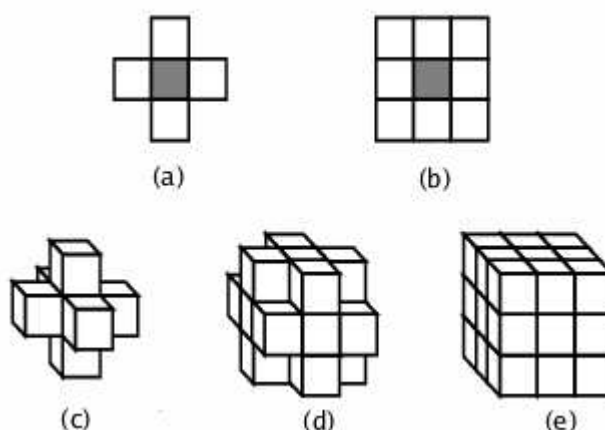


Figura 2.14: Diversos tipos de vizinhança para duas (a, b) e três (c, d, e) dimensões. (a) 4-vizinhança; (b) 8-vizinhança; (c) 6-vizinhança; (d) 18-vizinhança; (e) 26-vizinhança.

Este é um conceito importante, pois pode ser usado para encontrar gotas de óleo isoladas ou poros inacessíveis em uma simulação tridimensional, por exemplo. Esta definição é válida tanto para o espaço 2D como para o 3D, sendo que dois poros não conectados em uma imagem (corte bidimensional) possuem uma grande chance de estarem conectados no espaço 3D original. Observando a Figura 2.8.b, por exemplo, verifica-se a presença de vários agrupamentos na fração porosa representada pelas regiões brancas, os agrupamentos (poros) não estão conectados no plano bidimensional, mas estão conectados no plano tridimensional.

O conceito de conectividade entre pixels é utilizada para estabelecer os limites entre os objetos de uma imagem. Para descobrir se dois pixels estão conectados é preciso determinar se existe pelo menos um caminho de pixels conectados entre eles. Para uma imagem binária dizemos que dois pixels adjacentes estão conectados quando ambos tiverem o mesmo rótulo  $k$  e eles forem vizinhos de acordo com a métrica de vizinhança escolhida. Para a determinação das regiões conectadas em uma imagem ou modelo tridimensional utiliza-se um algoritmo de rotulação como o proposto por (BUENO, 2001) para representações tridimensionais ou uma solução trivial como a descrita por (GONZALES; WOODS, 1993). A figura 2.14 mostra diversos tipos de vizinhança para duas e três dimensões.

**Superfície específica.** A área de superfície por unidade de volume é proporcional ao comprimento dos limites entre as fases de interesse em uma unidade de área, medido sobre uma imagem. A área de superfície pode ser utilizada para determinação da permeabilidade (através da fórmula de Carman-Kozeny (BEDRIKOVETSKY, 1993)), capacidade de adsorção e efetividade de catalizadores (DULLIEN, 1992). A equação 2.29 mostra como obter a superfície específica de uma rocha a partir de uma imagem.

**Determinação da distribuição de tamanho de poros.** A determinação da granulometria de uma amostra de areia pode ser feita com o uso de peneiras, de forma que a areia passe por peneiras de malhas de tamanho decrescente, ao término de cada etapa a

massa da material retido pela peneira é medida para se obter uma estimativa do número de grãos retidos pela mesma (COSTER; CHERMANT, 1989). O cálculo das distribuições de tamanhos de grãos e poros pelo método de análise de imagens é feito de forma análoga, uma vez que a operação de abertura morfológica elimina estruturas menores do que o elemento estruturante escolhido como operando, de maneira que a operação de abertura tem um efeito muito semelhante ao de se passar a imagem através de uma "peneira virtual" (veja o efeito da operação de abertura na Figura 2.10, onde a diferença entre as figuras 2.10.a e 2.10.d representam o conjunto de poros "peneirados" pelo elemento estruturante). Desta forma, a distribuição de poros é obtida através da área relativa ocupada pelos poros e a função distribuição acumulada de tamanho de poros é dada por:

$$F(d \leq D) = \frac{\phi - \phi(D)}{\phi} \quad (2.14)$$

Onde  $F(d \leq D)$  é a fração de poros de tamanhos  $d$  menores ou iguais a  $D$ ;  $\phi$  é a porosidade e  $\phi(D)$  é a fração porosa ocupada pelos poros maiores do que  $D$ , isto é, os poros remanescentes após a operação de abertura com um elemento estruturante de tamanho  $D$  (FERNANDES, 1994).

## 2.2 Reconstrução Tridimensional

Apresenta-se nesta sessão os métodos de reconstrução tridimensional usados para gerar as representações utilizadas ao longo deste estudo.

A idéia básica por trás dos algoritmos de reconstrução tridimensional consiste na recuperação de propriedades estatísticas, como porosidade, autocorrelação, distribuição de tamanho de poros e sólidos, obtidas a partir de imagens bidimensionais. Modelos tridimensionais são gerados de forma que reproduzam as mesmas propriedades estatísticas. Na prática são geradas várias representações tridimensionais e a melhor representação é selecionado de acordo com os critérios definidos por (BUENO, 2001).

O objetivo dos métodos de reconstrução é criar um campo randômico discreto binário (uma representação tridimensional), representado por uma malha cúbica, que satisfaça as funções de porosidade e autocorrelação e/ou função distribuição de tamanho de objetos, obtidas a partir de uma ou mais imagens digitalizadas da amostra que se pretende reconstruir.

Como *modelos de reconstrução mono-escala* pode-se citar o método de reconstrução JQA, inicialmente desenvolvido por Joshi (1974) para imagens bidimensionais e estendido para 3D por (QUIBLIER, 1984) e (ADLER; JACQUIN; QUIBLIER, 1990). O método gera um conjunto tridimensional de dados, distribuídos de acordo com uma população gaussiana não correlacionada  $X(\mathbf{x})$  com média zero e variância um. Depois aplica-se um filtro linear que leva  $X(\mathbf{x}) \rightarrow Y(\mathbf{x})$ , sendo  $Y(\mathbf{x})$  um campo gaussiano correlacionado. O truncamento é feito com um filtro não linear que leva  $Y(\mathbf{x}) \rightarrow Z(\mathbf{x})$ , sendo  $Z(\mathbf{x})$  correlacionada e com

a porosidade desejada.

Outro método de reconstrução mono-escala é o método da gaussiana truncada de (IOANNIDIS; KWIECIEN; CHATZIS, 1995), que substitui parcialmente a aplicação do filtro linear pelo uso da transformada de Fourier. A imagem reconstruída em 3D é obtida a partir de uma série de imagens reconstruídas em 2D, mas não correlacionadas entre si. Um filtro linear é usado para correlacionar essas imagens na direção  $z$ .

A maior dificuldade do método JQA, (ADLER; JACQUIN; QUIBLIER, 1990), é resolver o sistema de equações obtido pela aplicação do filtro linear. O método misto de (IOANNIDIS; KWIECIEN; CHATZIS, 1995), substitui parcialmente a aplicação do filtro linear. Estendendo o método de (IOANNIDIS; KWIECIEN; CHATZIS, 1995), (ZHIRONG, 1997), substitui totalmente a aplicação do filtro linear pelo uso da transformada de Fourier. As novidades do método envolvem o uso da transformada de Fourier discreta para obter  $C(\mathbf{u})$  e a obtenção de  $Y(\mathbf{x})$  a partir de  $R_z(\mathbf{u})$  sem a necessidade de se gerar  $X(\mathbf{x})$ . O uso da transformada de Fourier como formulado por (ZHIRONG, 1997) traz como benefícios a obtenção da estrutura reconstruída com menos tempo de processamento, mas com um custo adicional em termos de memória. O método é apresentado na seção 2.2.1.

Recentemente, (SANTOS et al., 2002b) desenvolveram o método das esferas sobrepostas, que consiste em recuperar a distribuição de tamanho de sólidos sobrepondo-se bolas. O método gera as bolas maiores preservando a sua distribuição; a seguir vai acrescentando as bolas menores. O método é apresentado na seção 2.2.2.

### 2.2.1 Método de Reconstrução da Gaussiana Truncada

Este método parte do princípio de que o meio poroso é um material estatisticamente homogêneo e que, portanto, pode ser representado pelos momentos de ordem da função de fase (equação 2.6)(QUIBLIER, 1984; FERNANDES, 1994; ZHIRONG, 1997; MAGNANI, 1996; BUENO, 2001), são utilizados os dois principais momentos, a porosidade (equação 2.7) e a função de autocorrelação (equação 2.9).

O método de (ZHIRONG, 1997) se fundamenta numa relação entre o módulo da transformada de Fourier de um campo e a transformada de Fourier da função autocorrelação normalizada do mesmo campo. Esta relação é conhecida como teorema de Wiener-Khintchine (SEUL; O'GORMAN; SAMMON, 1993):

$$\widehat{R}_Y(\mathbf{p}) = \mathfrak{S}(R_Y(\mathbf{u})) = |\mathfrak{S}(Y)|^2 = \left| \widehat{Y} \right|^2 \quad (2.15)$$

A leitura da equação acima nos informa que a transformada de Fourier da função autocovariância normalizada esta relacionada ao módulo do campo  $Y$  transformado ao quadrado.

### 2.2.1.1 Hipóteses simplificadoras

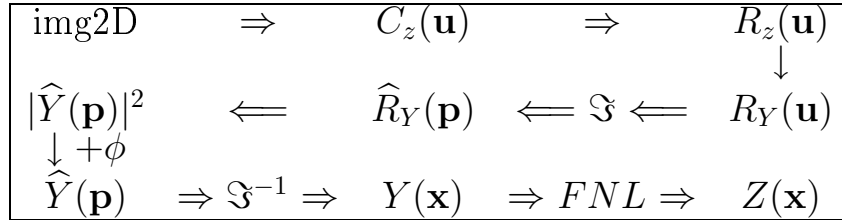
As hipóteses simplificadoras para utilização do método são:

- O meio poroso é homogêneo e isotrópico.
- Todas as informações sobre a geometria do meio poroso estão representadas pelos dois primeiros momentos da função de fase.
- A porosidade ótica é capaz de representar a porosidade real do meio poroso.

### 2.2.1.2 Descrição das etapas

A seqüência do método é apresentada na Figura 2.15 e descrita a seguir.

Figura 2.15: Seqüência da reconstrução de (ZHIRONG et al., 1998).



Determina-se  $C_z(\mathbf{u})$  usando a transformada de Fourier discreta, com a vantagem de se reduzir as oscilações na curva (veja figura 2.12.b).

É necessário obter  $R_Y(u)$ , o que é feito relacionando-se as funções  $R_z(u)$  e  $R_Y^m(u)$  dos campos  $Z$  e  $Y$  através de uma série da forma, (ADLER; JACQUIN; QUIBLIER, 1990):

$$R_z(u) = \sum_{m=0}^{\infty} B_m^2 R_Y^m(u) \tag{2.16}$$

onde  $m$  é o número de pontos da série e os coeficientes  $B_m$  são dados por

$$B_m = \frac{1}{\sqrt{2\pi m!}} \int_{-\infty}^{+\infty} b(y) e^{-\frac{y^2}{2}} H_m(y) dy \tag{2.17}$$

$b(y)$  por

$$b(y) = \begin{cases} \frac{\phi-1}{\sqrt{\phi(1-\phi)}} \{se P(y) \leq \phi \\ \frac{\phi}{\sqrt{\phi(1-\phi)}} \{se P(y) > \phi \end{cases} \tag{2.18}$$

e os polinômios de Hermite  $H_m(y)$  por

$$H_m(y) = (-1)^m e^{\frac{y^2}{2}} \frac{d^m}{dy^m} e^{-\frac{y^2}{2}} \quad (2.19)$$

O cálculo dos coeficientes  $B_m$  envolve a solução da integral 2.17, que é realizada numericamente com o método de Simpson; a integral é avaliada no intervalo -10 a +10 e a série limitada a 35 termos.

No intervalo em que  $R_Y > 0.90$ , utiliza-se a aproximação de (ADLER; JACQUIN; QUIBLIER, 1990);

$$R_z = 1 - a_1(1 - R_Y)^{1/2} \quad (2.20)$$

onde  $a_1$  é determinado para  $R_Y = 0.9$ .

A determinação de  $R_Y(\mathbf{u})$  é dada por  $R_Y(i, j, k) = R_Y(\sqrt{i^2 + j^2 + k^2}) = R(u)$ , para os valores não inteiros utiliza-se uma interpolação.

O próximo passo envolve a determinação da transformada de Fourier de  $R_Y(\mathbf{u})$  obtendo  $|\widehat{Y}|^2$ , eq.2.15. A transformada de Fourier é realizada utilizando-se o algoritmo de Singleton, que apresenta como vantagem um processamento rápido e a não limitação da malha a potências de dois.

Com a geração de ângulos de fase randômicos no intervalo entre 0 e  $2\pi$  [rad] e a transformada de Fourier inversa de  $\widehat{Y}(\mathbf{p})$  obtêm-se o campo  $Y(\mathbf{x})$ .

Finalmente, usa-se o filtro não linear para obter o campo  $Z(\mathbf{x})$ . O filtro não linear transforma o campo  $Y$  (normal, correlacionado, definido para os reais), em um campo  $Z$  (binário, com média igual a porosidade  $\phi$ , e variância igual a  $\phi - \phi^2$ ).

### 2.2.1.3 Filtro não linear

O filtro não linear (*FNL*) é definido da forma:

$$Z = FNL(Y) \quad (2.21)$$

com

$$Z = \begin{cases} 1 & \text{se } P(y) \leq \phi \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (2.22)$$

e

$$P(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^y e^{-\frac{y^2}{2}} dy \quad (2.23)$$

A distribuição de probabilidade da função autocovariância normalizada do campo  $Y$ , é dada por  $P(y)$  uma distribuição normal, pois  $Y(\mathbf{x})$  é normal com média zero e variância

um; sua função autocorrelação é a própria função autocovariância normalizada.

A figura 2.16 apresenta uma imagem da estrutura porosa reconstruída com o método de (ZHIRONG, 1997).

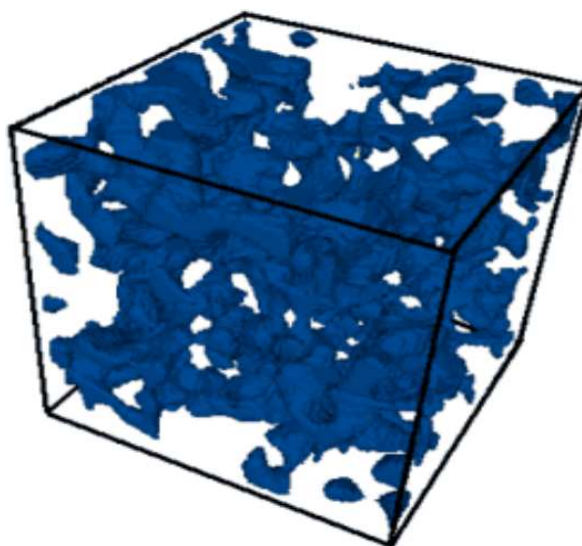


Figura 2.16: Uma representação tridimensional reconstruída com o método da gaussiana truncada.

#### 2.2.1.4 Parâmetros do método de reconstrução

Os parâmetros que podem ser alterados no método de reconstrução de (ZHIRONG, 1997) são:

- $n_{fa}$  O fator de amostragem  $n_{fa}$  indica a discretização adotada na descrição da função autocorrelação. O fator de amostragem interfere fortemente nos resultados obtidos, ou seja, na imagem tridimensional retornada pelo método.
- np** O número de pontos utilizados para descrição da função autocorrelação. Deve-se garantir que o comprimento de correlação esteja no intervalo definido por  $n_{fa}$  e **np**.
- seed** A semente do gerador de números aleatórios.
- N** A dimensão da imagem reconstruída.
- NPS** O número de termos da série.

Uma descrição detalhada das etapas do método, das equações utilizadas e da escolha dos parâmetros pode ser encontrada em (ZHIRONG, 1997).

Segundo os autores, a grande vantagem do método é a brusca redução do tempo de processamento. Para gerar uma estrutura porosa com dimensão de  $100^3$  em uma workstation IBM RISC System/6000-410 o método JQA demora 480 minutos, contra 5 minutos do método de (ZHIRONG, 1997).

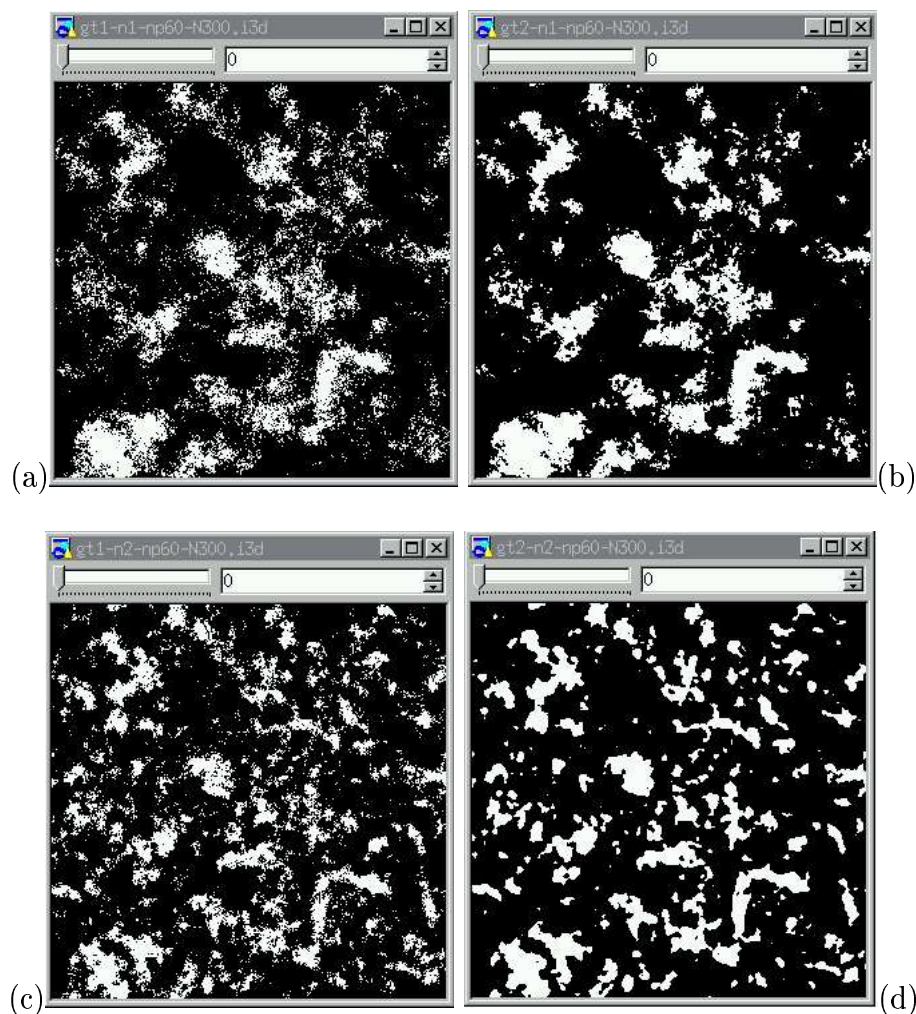
O método de reconstrução da gaussiana truncada é adequado para a geração de meios porosos com alto grau de desordem, no entanto meios fortemente correlacionados, meios fissurados ou com alto grau de ordenação (conjunto de esferas compactadas) não conseguem uma boa representação com este método.

Apesar de reproduzir a porosidade e a função de autocorrelação do meio original, as representações tridimensionais obtidas podem apresentar uma distribuição de tamanho de poros bastante diferente da apresentada pela rocha original. O problema ocorre porque o método tende a gerar um número muito grande de poros pequenos e desconectados, além disso muitas vezes os poros maiores não são adequadamente reproduzidos, quando são grandes em relação ao tamanho da representação tridimensional. Para corrigir estes problemas (ZHIRONG, 1997) aplica um fator de amplificação na imagem, através do aumento do comprimento do voxel  $\alpha_v$ , diminuindo a resolução da imagem, causando a eliminação dos pequenos poros e o aumento do tamanho da representação (em metros), o que permite que os poros maiores sejam representados.

(BUENO, 2001) observa que representações relativamente pequenas não conseguem recuperar a porosidade conectada da amostra, neste caso, a dimensão (em voxéis) da representação deve ser aumentada progressivamente até que o valor da porosidade conectada se torne estável e todas as informações sobre a conectividade sejam recuperadas.

(BUENO, 2001), fez uma avaliação detalhada das representações obtidas com o método da gaussiana truncada (gt1). Desenvolveu ainda o método da gaussiana truncada 2 (gt2), um método que elimina a aproximação utilizada por (ADLER; JACQUIN; QUIBLIER, 1990), a seguir fez uma análise e comparação das representações obtidas com gaussiana truncada 1 (ZHIRONG, 1997) e gaussiana truncada 2. A título ilustrativo, apresenta-se na Figura 2.17 quatro representações tridimensionais do P262\_K70. Em (a) a representação é gerada usando gt1, em (b) gt2, ambos usando  $n_{fa}=1$ . Observe que em (b) a imagem é mais regular, ou seja, com gt2, a representação obtida tem um número menor de píxeis isolados e os objetos tem boa formação. Em (c) e (d), compara-se a representação tridimensional gerada usando gt1-n2 e gt2-n2 respectivamente. Observe que a imagem (d) é extremamente regular, “meio lavada”, com contornos arredondados e praticamente sem píxeis isolados. Em (c) a representação apresenta um número elevado de píxeis isolados.

Figura 2.17: Visualização de representações da rocha P262\_K70, obtidas com gt1,2-n1,2-np60-N300-lp.



## 2.2.2 Método de Reconstrução das Esferas Sobrepostas

Partindo da idéia de que a geometria dos grãos é muito mais simples do que a dos poros, (SANTOS et al., 2002b) formularam um novo método de reconstrução tridimensional onde o principal dado de entrada é a distribuição de tamanho de grãos, além da porosidade, da imagem 2D (original).

A idéia geral do método consiste em distribuir conjuntos de esferas na representação tridimensional, de forma que a proporção do volume ocupado por esferas de diâmetro  $D$  na representação 3D seja equivalente à proporção da área ocupada pelos grãos do mesmo diâmetro  $D$  na imagem bidimensional. Além disso, o volume total ocupado pelas esferas deve ser proporcional à área ocupada pelos grãos na imagem 2D, a fim de preservar a porosidade. Através de operações morfológicas sobre a imagem 2D é possível determinar a distribuição de tamanho de grãos da imagem (FERNANDES, 1994), a partir desta distribuição o cálculo da proporção  $P_A(D)$  da área ocupada por cada conjunto de grãos



do mesmo diâmetro  $D$  é facilmente obtida. Como os princípios da estereologia (COSTER; CHERMANT, 1989) permitem que se extrapole o volume ocupado pelos grãos a partir da área ocupada pelos mesmos na imagem  $2D$ , temos:

$$P_v(D) = P_A(D) \quad (2.24)$$

onde  $P_A(D)$  é a proporção da área ocupada por grãos de diâmetro  $D$ .

A proporção do volume ocupada por esferas de volume  $D$  pode ser calculada por:

$$P_v(D) = \frac{n_e \pi \frac{4}{3} \left(\frac{D}{2}\right)^3}{L^3} = \frac{n_e \pi D^3}{6L^3} \quad (2.25)$$

onde  $n_e = n_e(D)$  é o número de esferas de diâmetro  $D$  existentes na representação  $3D$  e  $L$  é a dimensão da mesma.

A partir das equações 2.24 e 2.25 podemos calcular o número de esferas de diâmetro  $D$  que devem ser geradas na representação tridimensional:

$$n_e(D) = \frac{6L^3 P_A(D)}{\pi D^3} \quad (2.26)$$

Além da porosidade e da distribuição de tamanho de grãos, o método ainda utiliza dois outros dados de entrada: o fator de sobreposição  $f_s$  e o fator de borda  $f_b$ . O fator de sobreposição indica que qualquer esfera de diâmetro  $D > f_s$  será posicionada aleatoriamente na representação  $3D$ , enquanto esferas de diâmetro menor do que  $f_s$  serão obrigatoriamente sobrepostas a outras esferas, permitindo um controle sobre a conectividade (da fase sólida) da representação modelo gerada. Os autores não informam se existe uma forma de calcular  $f_s$  automaticamente, o valor experimental utilizado no algoritmo é  $\frac{L}{40}$  (o software comercial Imago permite que o valor de  $f_s$  seja fornecido pelo usuário). O fator de borda aponta a probabilidade de um voxel localizado na fronteira da representação  $3D$  ser contabilizado no cálculo de volume das esferas.

O algoritmo resume-se a executar iterações, partindo do maior diâmetro  $D$  encontrado na distribuição de tamanho de grãos até o menor. Para cada valor de  $D$ , calcula-se  $P_v(D)$  e gera-se  $n_e(D)$  esferas de diâmetro  $D$  no modelo  $3D$ . Como é provável que ocorra a sobreposição de esferas a proporção do volume ocupado pelas esferas geradas geralmente é menor do que  $P_v(D)$ , sendo necessário gerar um número adicional de esferas para compensar o volume sobreposto. Cada esfera é gerada em uma posição aleatória na representação  $3D$ , caso o diâmetro da esfera seja menor do que  $f_s$  verifica-se se pelo menos um ponto superfície da esfera está contido no volume de outra esfera, caso contrário a esfera é descartada por não estar conectada.

Os autores demonstram a validade do método através da boa reprodução das curvas de autocorrelação e de distribuição de tamanho de poros apresentadas pelas representações geradas pelo método. Apontam ainda vantagens que o método possui em relação aos métodos de reconstrução baseados na gaussiana truncada, como a preservação do volume

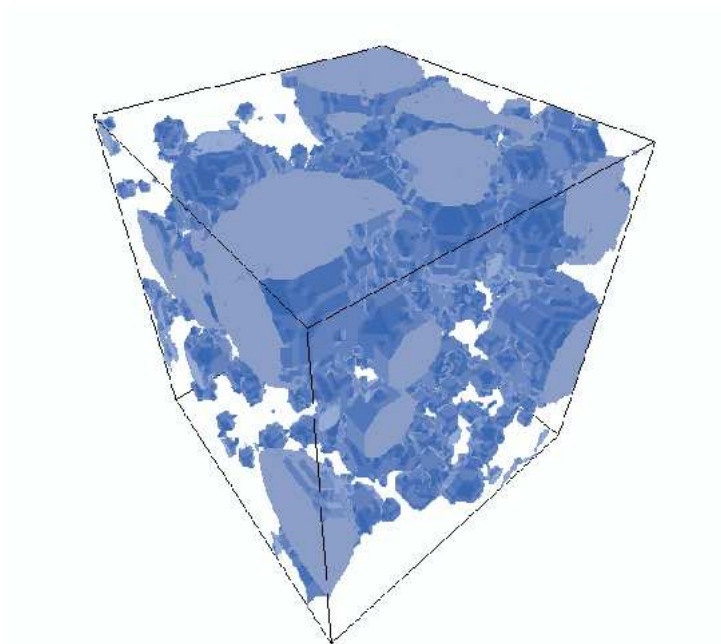


Figura 2.18: Representação tridimensional reconstruída com o método das esferas sobrepostas.

poroso conectado, o seu desempenho computacional (maior velocidade e menor requerimento de memória) e a capacidade de gerar modelos com forte correlação espacial. Estes dados são corroborados por um estudo realizado por (BUENO, 2001).

## 2.3 Estimativa da Permeabilidade

A permeabilidade é função da geometria dos poros e da sua conectividade, as quais podem ser parcialmente observadas em imagens bidimensionais da rocha. A fim de minimizar os erros causados pela perda de informação dimensional devemos utilizar representações da estrutura porosa em 3 dimensões.

Segundo (FENS, 2000), as técnicas para determinação da permeabilidade requerem homogeneidade e isotropia da amostra. Esta afirmação é contestada por (BUENO, 2005), que informa que o problema não está nos métodos de determinação da permeabilidade, e cita como exemplo o método do grafo de conexão serial (que pode ser utilizado com meios não homogêneos e não isotrópicos). O problema está na obtenção das representações tridimensionais, pois os métodos disponíveis, como o de Hagen-Poiseuille, Karman-Kozeny e de redes, requerem que a amostra original seja homogênea e isotrópica.

O modelo mais simples de determinação da permeabilidade intrínseca a partir de imagens petrográficas é o uso de um feixe de tubos capilares com a mesma distribuição de tamanho observada no corte bidimensional da amostra, conhecido como modelo do tipo Hagen-Poiseuille. A permeabilidade  $k [mD]$  é calculada a partir da seguinte fórmula:

$$k = \frac{1}{8} \sum_i \phi_i r_i^2 \quad (2.27)$$

onde  $r_i$  é o raio de cada conjunto  $i$  de poros e  $\phi_i$  é a porosidade considerando apenas a fração do volume ocupada pelo conjunto de poros com raio  $r_i$ .

Entre os modelos mais populares estão os do tipo Karman-Kozeny, por apresentarem melhores resultados do que os de Hagen-Poiseuille e serem igualmente simples. Este modelo se baseia em duas propriedades macroscópicas: porosidade e área específica de superfície.

$$k = c \frac{\phi_{eff}^3}{S_v^2} \quad (2.28)$$

onde  $c$  é uma constante adimensional que representa a tortuosidade do meio.

$S_v$  pode ser determinada a partir de métodos experimentais ou através da análise de imagens de rochas de acordo com a seguinte relação:

$$S_v = \frac{Superfície}{Volume} = \frac{Perímetro}{Superfície} \quad (2.29)$$

Esta fórmula é utilizada para determinar  $S_v$  a partir de microfotografias de lâminas delgadas e se justifica pelos princípios da estereologia (RUSS, 1999), já que o perímetro e a superfície são parâmetros estereológicos que observam as condições de Hadwiger (COSTER; CHERMANT, 1989).

Através da função de distribuição do tamanho de poros e da função conectividade é possível determinar parâmetros, como o número de coordenação, possibilitando a criação de redes de percolação tridimensionais onde nós e arestas representam poros e gargantas, respectivamente (BEDRIKOVETSKY, 1993; SIQUEIRA; BONET; SHECAIRA, 2003; SOUZA, 1993).

Neste trabalho, a permeabilidade será determinada através do modelo do grafo de conexão serial criado por (BUENO, 2001), o mesmo é descrito na seção 2.3.1. O modelo considera que o fluxo ocorre ortogonalmente entre planos bidimensionais do meio poroso reconstruído e que estes planos são formados por objetos conexos. A cada nodo do grafo é associada uma condutância dependente do raio hidráulico através da equação de Poiseuille e a permeabilidade é determinada através da solução de um sistema de equações.

### 2.3.1 Grafo de Conexão Serial

O grafo de conexão serial, proposto por (BUENO; PHILIPPI, 2002), é uma estrutura de dados que simplifica a representação do meio poroso ao mesmo tempo em que preserva informações essenciais sobre a sua morfologia e topologia, de maneira que algoritmos e simulações aplicadas sobre esta estrutura apresentam um desempenho computacional

superior quando comparados a outras abordagens como modelos de gás em rede ou representações com o uso do método de esqueletos (ZHIRONG, 1997; BUENO, 2001).

O grafo de conexão serial é construído a partir da análise de cada plano ortogonal à direção do fluxo de uma representação tridimensional de tamanho  $N^3$ . Cada plano  $z_i$ , entre  $z_0$  e  $z_N$ , é submetido a uma operação de rotulação e cada objeto é armazenado em um vértice do grafo. A seguir, uma intersecção (multiplicação booleana AND) entre o plano  $z_i$  e seu vizinho  $z_{i-1}$  e a imagem binária resultante (note que cada plano também é uma imagem binária) é submetida a uma nova rotulação, onde cada objeto representa uma ligação entre o plano  $z_i$  e o plano  $z_{i-1}$ . Cada ligação têm o seu raio hidráulico calculado a partir da determinação do seu perímetro e área. A informação do raio hidráulico ligando um vértice do plano  $z_i$  a um vértice do plano  $z_{i-1}$  então armazenado na rede gerada (veja a figura 2.19).

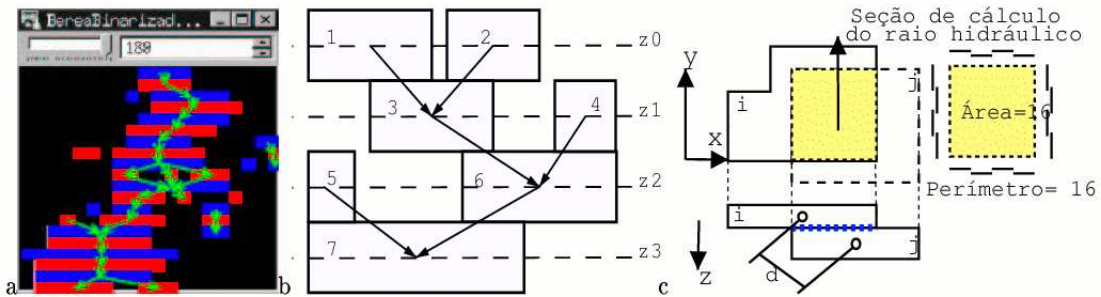


Figura 2.19: O modelo do grafo de conexão serial. (a) seção de uma representação tridimensional; (b) esquema mostrando vértices (retângulos) e arestas (setas) em um grafo com 4 planos; (c) esquema para cálculo do raio hidráulico. Note que em (a) e (b) cada plano é retratado unidimensionalmente para exemplificação.

O cálculo da permeabilidade é realizado considerando-se que as pressões aplicadas sobre os planos  $z_0$  e  $z_N$  são conhecidas e assumindo as seguintes hipóteses simplificadoras:

- Fluxo de massa unidimensional entre vértices, aproximado pela equação de Poiseuille.
- O gradiente de pressão é imposto apenas na direção  $z$ , que é a direção preferencial do escoamento.
- As interfaces  $x_0$ ,  $x_N$ ,  $y_0$  e  $y_N$  são consideradas impermeáveis.
- As pressões são armazenadas unicamente nos vértices.

Além disso, o fluxo de massa através de um vértice  $i$  segue o princípio da conservação de massa, de maneira que o soma do fluxo proveniente de seus  $j$  vizinhos seja nula:

$$\sum_j Q_{ij} = 0 \quad (2.30)$$

A condutância  $g_l$  de cada ligação é dada pela equação de Pouiseuille:

$$g_l = \frac{2\pi r_h^4}{\mu l} \quad (2.31)$$

e a condutância total  $g_{ij}$  das  $n(l)$  arestas que ligam em paralelo dois sítios é igual a:

$$g_{ij} = \sum_l^{n(l)} g_l \quad (2.32)$$

O fluxo de massa entre dois vértices é determinado por:

$$Q_{ij} = g_{ij}(P_i - P_j) \quad (2.33)$$

onde  $P_i$  e  $P_j$  são as pressões nos sítios  $i$  e  $j$ . Resolvendo-se um sistema de equações para a determinação da pressão de todos os vértices, podemos determinar o fluxo de massa que atravessa cada ligação. A permeabilidade intrínseca é finalmente dada por:

$$k = \frac{\mu \cdot L \cdot \sum_i \sum_j Q_{ij}}{A \cdot \Delta P} \quad (2.34)$$

$i$  é o conjunto de sítios localizados em uma interface ( $z_0$  ou  $z_N$ ),  $L$  é a espessura da representação tridimensional e  $\Delta P$  é o gradiente de pressão entre as faces  $z_0$  e  $z_N$ .

A figura 2.20 mostra uma representação 3D em (a), seu esqueleto em (b) e o grafo de conexão serial em (c). Observe que o número de nós é reduzido na representação do grafo.

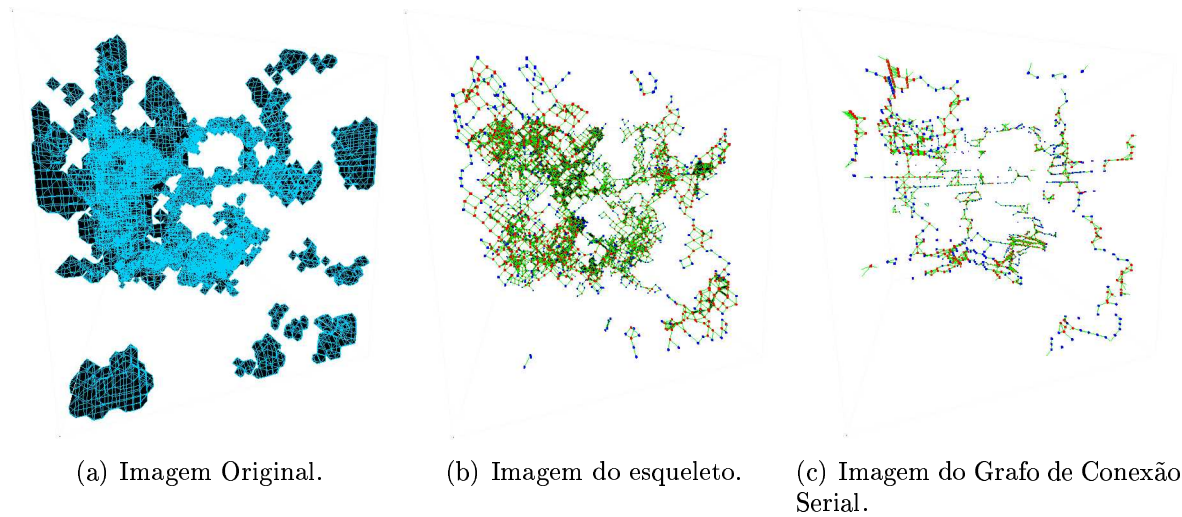


Figura 2.20: Visualização tridimensional de uma imagem (a), seu esqueleto (b) e seu grafo (c).

Na tabela 2.2 compara-se os resultados de permeabilidade experimental  $k_{exp}$  com os obtidos com o método do grafo de conexão serial, com os métodos do esqueleto (k-ske, de (ZHIRONG et al., 1997)), de Gás em Rede (k-LG, de (SANTOS; PHILIPPI; DAMIANI, 2000)) e de Rede de Percolação (k-rede, de De Gasperi (1999)). As permeabilidades obtidas

para as representações tridimensionais ideais estão em **negrito**, em itálico valores obtidos usando modelo 4 (veja informações sobre o modelo 4 em (BUENO, 2001)).

Tabela 2.2: Comparação dos resultados de permeabilidade (mD) obtidos pelo método do grafo de conexão serial (k-gcs), com os métodos do esqueleto (k-ske), de gás em rede (k-LG) e de rede de percolação (k-rede). Fonte: (BUENO, 2001).

Imagem (lâmina)	k-exp [mD]	k-ske [mD]	k-red [mD]	k-LG [mD]	k-gcs [mD]	k-gcs [mD]	k-gcs [mD]
					gt1	esf	gt2
<b>P275_K316</b>	316-275	67	100	290	286	-	<b>309-176</b>
<b>P223_K154</b>	154-132	0	140	50	26	85-94	<b>32</b>
<b>P238_K145</b>	145-121	14	112	170	<b>208- 123</b>	-	
<b>P320_K642</b>	642	34	-	611	<b>828- 480</b>	428- 461	1165-675
<b>P262_K70</b>	69.7-66.8	4	106	60	75	-	<b>139-91</b>
<b>P240_K104</b>	104	-	-	-	109	<b>142- 80</b>	

## 2.4 Dano de Formação

A queda da permeabilidade da formação, isto é, o dano de formação, pode ocorrer durante as operações de perfuração, completação, produção e estimulação. O dano à formação geralmente está associado:

- ao movimento e captura de partículas que podem ser introduzidas por fluidos (água de injeção, lama de perfuração) ou geradas *in situ* pela interação entre fluidos injetados com a matriz rochosa ou os fluidos da formação.
- à precipitação de compostos insolúveis causada por variações termodinâmicas (pressão, temperatura, concentração, pH) decorrentes do processo de produção do petróleo ou pela mistura de fluidos quimicamente incompatíveis no interior da formação.

A queda da permeabilidade da formação próxima ao poço tem um impacto determinante sobre a produtividade (ou injetividade) do poço. A importância desta zona está esquematizada na figura 2.21, que mostra que a redução da permeabilidade na zona danificada ao redor do poço (também chamada de “zona de *skin*”) pode acarretar uma drástica diminuição na produtividade. O raio da zona danificada  $\Delta r_0$  pode medir entre alguns centímetros ou poucos metros, mas a influência da permeabilidade  $k_i$  desta região é determinante. É por este motivo que operações de estimulação química ou fraturação podem trazer um grande aumento de produtividade, especialmente quando a permeabilidade ao redor do poço é menor do que a permeabilidade da formação, isto é, quando  $k_i < k_s$ .

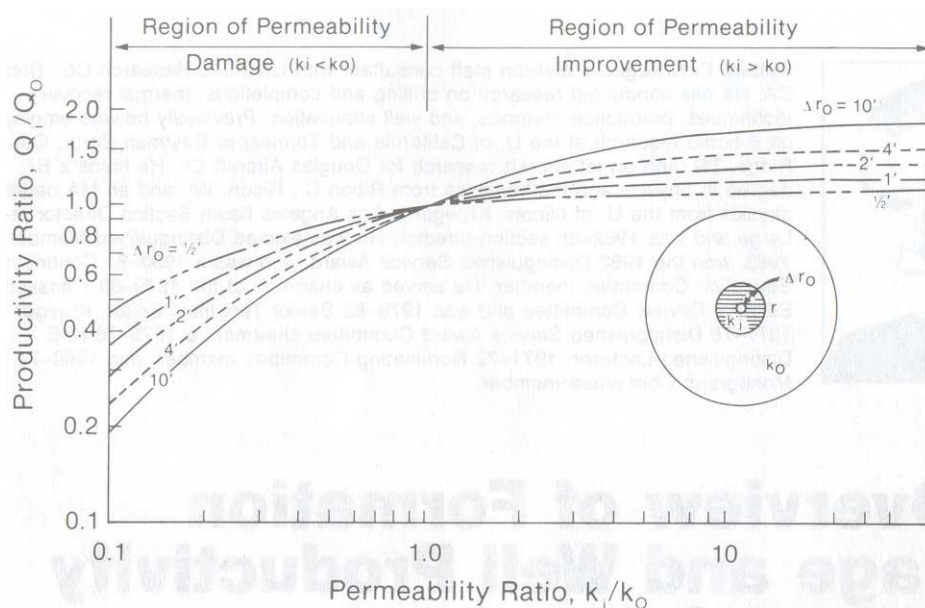


Figura 2.21: Efeito da permeabilidade da formação próxima ao poço. Fonte: (KRUEGER, 1990)

Portanto, o conhecimento das causas do dano de formação, assim como os métodos de previsão, prevenção e remediação dos seus efeitos negativos é fundamental para a manutenção do índice de produtividade (ou injetividade) de um poço.

### 2.4.1 Incrustação por Sulfato de Bário

A incrustação por sulfato de bário no interior de rochas reservatório de petróleo é fonte de grandes prejuízos econômicos, pois causa a redução da permeabilidade e a queda da injetividade e o conseqüente aumento do custo de extração do petróleo. A deposição de barita é especialmente perniciosa porque danifica o reservatório numa área próxima ao poço produtor, onde o efeito da queda da permeabilidade causa uma drástica redução do índice de produtividade (veja a figura 1.1 e 2.21). Outro fator agravante é o fato de que o sulfato de bário apresenta uma solubilidade muito baixa, impossibilitando o controle da incrustação através da acidificação.

A incrustação por sulfato de bário em reservatórios ocorre devido à mistura de águas quimicamente incompatíveis. A reação ocorre quando a água de formação, rica em bário, entra em contato com a água do mar injetada, rica em sulfatos, causando a formação de sulfato de bário. Este é um problema comum nos reservatórios da bacia de Campos, onde a forma mais comum de recuperação secundária é a injeção de água do mar, aplicada em campos cuja produção corresponde a 85% da produção total da bacia. A formação de sulfato de bário sólido a partir da reação entre os íons aquosos ocorre de acordo com a seguinte equação:



É possível prever a ocorrência de incrustação por sulfato de bário através da determinação do índice de supersaturação  $IS$ . Quando  $IS > 1$  a solução se encontra supersaturada e a precipitação pode ocorrer. O índice de supersaturação é dado pelo produto das atividades iônicas dos reagentes dividido pelo produto da solubilidade  $K_{sp}$ :

$$IS = \frac{[Ba^{2+}][SO_4^{2-}]}{K_{sp}} \quad (2.36)$$

(SORBIE; MACKAY, 2000) modelaram os mecanismos de mistura das águas de injeção e de formação. O principal mecanismo de deslocamento da água de formação pela água de injeção é o deslocamento frontal linear, onde um banco de água de injeção desloca um banco de água de formação com uma zona relativamente pequena entre os dois bancos onde ocorre a mistura das águas e deposição de barita. A heterogeneidade vertical e horizontal entre zonas do reservatório com permeabilidades distintas origina um segundo mecanismo de mistura, caracterizado pela formação de *fingers* em regiões com alta permeabilidade que resultam na produção simultânea de água de injeção e água conata no poço produtor e conseqüente dano de formação. O estudo demonstra que a deposição de barita em zonas do reservatório distantes do poço de produção não causa dano de formação significativo, tendo ainda o efeito benéfico de criar uma zona com menor saturação separando o banco de água injetada que desloca o banco de água de formação, diminuindo o dano de formação na área ao redor do poço produtor.

(NANCOLLAS; LIU, 1975) descreveram os eventos do processo de deposição de sulfato de bário: (1) transporte de íons incrustantes até a superfície de um cristal ou outro substrato, (2) o íon é preso à superfície por adsorção ou quimissorção, (3) difusão bidimensional até sítios de crescimento, (4) desidratação do íon e ligação à rede cristalina. A reação é geralmente controlada pelo passo 1, exceto quando a supersaturação é suficientemente grande para gerar cristais dendríticos sendo então controlada pela difusão. Segundo o estudo, a taxa da reação é proporcional ao quadrado da supersaturação e independe da dinâmica de fluxo para baixas velocidades.

(TODD; YUAN, 1992) realizaram experimentos de incrustação de sulfato de bário em altas temperaturas ( $70^\circ C$ ) para diversas salmouras com diferentes graus de supersaturação de sulfato de bário. Três tipos de morfologia cristalina se formaram no interior dos plugs de rochas: tabular romboedral para soluções com supersaturação de 8,4, “desert roses” para supersaturação de 22,7 e dendritos para supersaturação de 63,9. Os resultados para a queda da permeabilidade em função da redução da porosidade para estes experimentos são apresentados na tabela 2.3.

Apesar de poucos experimentos de incrustação terem sido realizados, existe uma tendência para que soluções com maior supersaturação apresentem maior queda de permeabilidade em função da redução da porosidade (ver tabela 2.3), provavelmente devido às



IS	$k_i[mD]$	$k_f[mD]$	$(\Delta k/k_i) * 100$	$\phi_i$	$\phi_f$	$\sigma_r$
8,4	36,5	15,0	58,9	14,20	10,36	27,04
8,4	18,0	6,9	61,7	14,75	10,75	21,82
8,4	147,5	129,2	12,4	21,33	16,62	22,08
8,4	238,0	28,0	88,2	14,67	9,89	32,58
8,4	51,0	20,0	60,8	13,98	9,81	29,83
22,7	68,5	13,5	80,3	13,41	9,38	30,05
22,7	123,5	24,0	80,6	14,74	10,73	27,20
63,9	190,0	13,0	93,2	14,23	10,07	29,23

Tabela 2.3: Experimentos de incrustação de  $BaSO_4$  em *plugs* de arenito Clashach.  $k_i$  = permeabilidade inicial,  $k_f$  = permeabilidade final,  $\Delta k = k_i - k_f$  = variação da permeabilidade,  $\phi_i$  = porosidade inicial,  $\phi_f$  = porosidade final. Fonte: (TODD; YUAN, 1992).

diferenças morfológicas entre os cristais.

(WAT et al., 1992) executaram experimentos injetando águas de formação e marinha sintéticas em *sandpacks* de sílica, com e sem a presença de inibidores. Os autores concluem que o processo de precipitação parece ser dominado pela nucleação heterogênea. A análise de fotografias do filtro colocado na saída dos efluentes não revelou a presença de cristais de barita, sugerindo que a queda de permeabilidade deveu-se ao crescimento dos cristais e não à migração e captura dos mesmos. Os pesquisadores realizaram testes com adição de inibidores e observaram que as quantidades de precipitado e a taxa da reação foram reduzidas em duas ordens de magnitude.

(TORRES, 2006) montou no LENEP, um sistema para o estudo do escoamento em meios porosos. Segundo o autor, "o dimensionamento foi feito analisando diversos esquemas de escoamento em meio poroso, descritos na literatura. A capacidade dos equipamentos foi calculada a partir de parâmetros conhecidos de porosidade, viscosidade dos fluidos e permeabilidade característicos dos reservatórios da Bacia de Campos". O sistema irá permitir: i) estudar a perda da injetividade pela injeção de água do mar com partículas sólidas e líquidas, ii) estudar a re-injeção de água produzida para determinar o dano à formação em função da quantidade de sólidos e líquidos na água injetada, e de propriedades do meio poroso; iii) estudar o descarte da água produzida em aquíferos através da variação da profundidade de penetração das partículas oleosas no meio poroso; e iv) estudar a incrustação dos poços produtores pelos sulfatos de metais (bário, estrôncio, magnésio e outros) inclusive determinação da cinética da reação química e da precipitação dos sais.

# Capítulo 3

## Metodologia

O objetivo deste capítulo é descrever, sob o aspecto científico, itens como: motivação para o tema, caracterização da pesquisa, limitações do tema, pressupostos e hipóteses simplificadoras. A origem dos dados, os equipamentos utilizados e as etapas realizadas são apresentados, para que outros pesquisadores possam reproduzir este trabalho.

### 3.1 Caracterização da Pesquisa

- **Área de estudo:** Fluxo em meios porosos (determinação do dano de formação em rochas reservatório).
- **Subordinação do tema a áreas do conhecimento científico:** ligado à engenharia de reservatório, ao estudo e caracterização do meio poroso, à determinação de propriedades petrofísicas utilizando métodos da área de processamento e análise de imagens.
- **Problema específico:** desenvolvimento de modelos e algoritmos para determinação do dano de formação causado pela incrustação por sulfato de bário em representações tridimensionais da rocha reservatório com uso de técnicas de análise de imagens.
- **Tipo de pesquisa:** A pesquisa desenvolvida é de caráter teórico.

### 3.2 Motivação para o Tema

O interesse sobre o tema surgiu juntamente com os conhecimentos adquiridos nas disciplinas do mestrado, especificamente: “Princípios de Engenharia de Petróleo” e “Análise e Processamento de Imagens - Teoria e Desenvolvimento de Algoritmos Aplicados a Rochas Reservatório”. A importância de caracterizar o problema da incrustação por barita em rochas reservatório foi apontada pelo co-orientador, e em discussões posteriores com

o orientador levantou-se a possibilidade da utilização de técnicas de análise de imagens como uma abordagem viável para a resolução deste problema tecnológico.

O presente trabalho tem como base os estudos desenvolvidos pelo professor André Duarte Bueno em sua tese de doutorado (“Estudo Geométrico das Representações Tridimensionais da Estrutura Porosa e Grafo de Conexão Serial para a Determinação da Permeabilidade Intrínseca de Rochas - Reservatório de Petróleo”) (BUENO, 2001) e os trabalhos desenvolvidos pelo grupo de estudo orientado pelo professor Pavel Bedrikovetsky (BEDRIKOVETSKY et al., 2003; LOPES, 2002; GLADSTONE, 2004) sobre dano de formação devido à incrustação por sulfato de bário.

O conhecimento gerado neste estudo pode ser aplicado para o desenvolvimento de uma tecnologia de previsão do dano à formação por deposição de barita ao redor de poços produtores. Na parte teórica, o estudo avalia o impacto das diferentes morfotopologias assumidas pela matriz rochosa e fase incrustante sobre o dano de formação.

### 3.3 Origem dos Dados

Os dados a serem utilizados neste trabalho se constituem de microfotografias de lâminas delgadas de rochas reservatório e dados de permeabilidade obtidas junto ao CENPES/PETROBRÁS. As representações reconstruídas das rochas analisadas foram obtidas de (BUENO, 2001), cada reconstrução tridimensional foi gerada a partir de um conjunto de microfotografias das rochas originais. As propriedades das representações tridimensionais utilizadas neste estudo são listadas na tabela 3.2. As propriedades das rochas originais fornecidas pelo CENPES/PETROBRÁS e o número de microfotografias utilizadas para cada reconstrução são informados na tabela 3.1.

### 3.4 Hipóteses Simplificadoras

As hipóteses simplificadoras são discutidas detalhadamente na seção 4.2.1.

### 3.5 Instrumentos

O instrumento utilizado para a realização de simulações de incrustação, a obtenção do coeficiente de dano de formação  $\beta$  e a permeabilidade intrínseca é o programa computacional SAIL, apresentado nos apêndices A e B. O software foi desenvolvido em linguagem C++ (BUENO, 2003; BJARNE, 1999) utilizando a biblioteca de interface gráfica QT (BLANCHETTE; SUMMERFIELD, 2004). A execução de simulações e a compilação do programa foi feita nos equipamentos listados na tabela a seguir. Observe que o programa funciona em equipamentos com 512 MB, mas a visualização 3D e as simulações são realizadas mais eficientemente em workstations com 2GB.

Tabela 3.1: Propriedades das rochas. O significado de cada uma das propriedades da tabela pode ser encontrado na lista de símbolos.

Propriedade	Berea 500	P320_K642	P262_K70	P262_K441
$\alpha[\mu m]$	2,56	4,545	3,125	6,00
$D_c [\mu m]$	35		15	10
$\phi_g[m^3/m^3]$		32,0	26,2/26,7	26,2
$\phi_o[m^3/m^3]$		32,0	18,3	15,6
$k_{exp}[mD]$	500	642	69,7/66,8	441
N.Imagens	1	10	20	10

Propriedade	P275_K316	P238_K145	P223_K154	P240_K104	Berea 200
$\alpha[\mu m]$	3,125	3,125	3,125	4,545	2,56
$D_c [\mu m]$	15	12	15		
$\phi_g[m^3/m^3]$	27,5/27,2	23,8/23,7	22,3/22,2	24,0	28
$\phi_o[m^3/m^3]$	18,9	19,2	12,8	20,8	
$k_{exp}[mD]$	316/275	145/121	154/132	104	200
N.Imagens	20	20	20	10	1

Tabela 3.2: Propriedades das representações tridimensionais. O significado de cada uma das propriedades da tabela pode ser encontrado na lista de símbolos.

Propriedade	Berea 500 (gt1)	P320_K642 (gt1)	P262_K70 (gt1)	P262_K70 (gt2)
$\alpha_v[\mu m]$	5,12	9,09	9,375	3,125
$n_{fa}$	2	2	3	1
$\lambda$ [pixels]	60	24	60	60
N [voxeis]	300	200	200	300
$D_{cv}[\mu m]$	20,48	18,18	9,375	12,5
$k_{GCS}[mD]$	808,286	809,508	148,809	115,292

Propriedade	P262_K441 (gt1)	P275_K316 (gt1)	P275_K316 (gt2)	P238_K145 (gt1)
$\alpha_v[\mu m]$	30	12,5	6,25	6,25
$n_{fa}$	5	4	2	2
$\lambda$ [pixels]		72	72	72
N [voxeis]	300	300	300	300
$D_{cv}[\mu m]$	30	23	6,25	12,5
$k_{GCS}[mD]$	274,341	842,062	314,022	207,859

Propriedade	P223_K154 (esf)	P240_K104 (esf)	Berea 200 (gt1)
$\alpha_v[\mu m]$	3,125	4,545	5,12
$n_{fa}$	1	1	2
$\lambda$ [pixels]	-	-	75
N [voxeis]	500	300	200
$D_{cv}[\mu m]$		9,09	10,24
$k_{GCS}[mD]$	88,201	142,844	118,741

Tabela 3.3: Equipamentos utilizados.

	C1	C2	C3
Tipo	Notebook	Computador Desktop	Workstation
Processador	Pentium Centrino 1,7 GHz	P4-HT 3,0 GHz	Dual AMD Opteron 850 64 2,46 GHz
Memória	512 MB	2GB	2GB
Placa de vídeo	ATI radeon 128MB	Nvidia geforce 4 128 MB	PCIEXPRESS 256MB ATI X300 DUAL+DVI

## Capítulo 4

# Modelos e Algoritmos de Incrustação

Apresenta-se neste capítulo os modelos e algoritmos desenvolvidos para realizar a alteração numérica de representações tridimensionais com o objetivo de simular a deposição de sulfato de bário.

Na seção 4.1 é apresentada uma breve revisão de trabalhos anteriores relacionados à formação de microestruturas sobre o substrato das rochas, modeladas com o uso de representações tridimensionais discretizadas. Na seção 4.2 são introduzidos novos modelos para simulação de incrustação por sulfato de bário inspirados nestes estudos.

No capítulo 5 são mostrados os resultados da execução destes algoritmos sobre representações obtidas a partir de microfotografias de rochas reservatório provenientes de bacias petrolíferas brasileiras. No apêndice A apresenta-se o manual do usuário do software desenvolvido para a realização das simulações.

### 4.1 Modelos de Alteração Numérica de Representações Tridimensionais

Apesar de uma bibliografia específica sobre simulação de incrustação de sais em meios porosos não estar disponível, trabalhos recentes descreveram modelos de crescimento de microestruturas em representações tridimensionais com o objetivo de simular processos diagenéticos, como cimentação de quartzo e a precipitação de argilas autigênicas sobre a superfície dos poros.

(KEEHM, 2003) propõe diversos mecanismos de preenchimento de poros relacionados à diagênese. As velocidades de fluxo são obtidas através do método de Lattice-Boltzmann e quatro classes de algoritmos são definidos, (1) deposição ao redor dos grãos, (2) em zonas de alta velocidade de fluxo, (3) em zonas de baixa velocidade de fluxo e (4) aleatório.

(KAMEDA, 2004) formaliza métodos para realizar a alteração numérica da geometria dos poros de representações tridimensionais e investiga os seus efeitos na redução da permeabilidade. O autor utiliza operações morfológicas sobre representações tridimensionais obtidas através de microtomografia de raios-x para modelar diversos processos diagenéticos.

Objetivando simplificar o problema de criar algoritmos complexos para estruturas tridimensionais o autor introduz um procedimento para obter representações tridimensionais a partir da alteração de imagens bidimensionais da rocha, seguida de uma operação de reconstrução tridimensional (veja seção 2.2).

(OREN; BAKKE, 2002) modelam a cimentação de quartzo e a precipitação de argilas autigênicas, que são divididas em três categorias: *pore-lining* (ao redor do poro), *pore-filling* (preenchendo o poro) e *pore-bridging* (formando pontes entre as paredes da matriz rochosa). Argilas que se depositam ao redor do poro como a clorita são modeladas através da deposição aleatória de partículas (voxels) sobre as superfícies da fase sólida. Argilas que preenchem os poros são modeladas com o uso de um algoritmo que favorece a deposição de partículas sobre partículas já depositadas. A deposição de argilas do tipo dendrítico se dá através da geração de linhas de voxels conectando as paredes dos poros, que devem ter o diâmetro menor do que um valor de corte pré-estabelecido.

## 4.2 Algoritmos de Incrustação Desenvolvidos

Os algoritmos aqui descritos se baseiam na hipótese de que a deposição dos cristais de sulfato de bário no meio poroso apresenta uma morfologia semelhante à deposição de argilas (BEDRIKOVETSKY, 2005), podendo ser classificada como *pore-lining*, *pore-filling* ou dendrítica.

### 4.2.1 Hipóteses simplificadoras

Apresenta-se a seguir um conjunto de hipóteses simplificadoras necessárias para o desenvolvimento dos modelos.

- Como a escala em que a simulação é realizada é bastante pequena, da ordem de 1 mm, considera-se que as propriedades da solução (pressão, temperatura, concentrações) não variam dentro do volume estudado e conseqüentemente a mistura da solução dentro do volume estudado (reator) é perfeita.
- A dinâmica do fluxo não influencia o processo de precipitação (NANCOLLAS; LIU, 1975; TODD; YUAN, 1992). Apesar da velocidade do fluxo exercer alguma influência sobre a morfologia dos cristais (TODD; YUAN, 1992; BERNARD-MICHEL; PONS; VIVIER, 2002), acelerar a mistura das águas de formação e de injeção em escalas macroscópicas (SORBIE; MACKAY, 2000) e o coeficiente da taxa da reação  $k_a$  em meios porosos (BEDRIKOVETSKY et al., 2003; ??), estes fenômenos não serão modelados no presente estudo.
- Como a dinâmica do fluxo é desconsiderada, a força de arraste não impede o bloqueio dos poros por material incrustante.

- Apenas o processo de nucleação primária heterogênea é considerado (WAT et al., 1992; TODD; YUAN, 1992), toda precipitação ocorre sobre a superfície da rocha ou sobre cristais preexistentes.
- Cristais não quebram ou migram através do sistema, causando o bloqueio de gargantas de poros (TODD; YUAN, 1992; WAT et al., 1992). (ALLAGA et al., 1992) apontam a migração e captura de partículas por exclusão por tamanho e a formação de pontes nas gargantas dos poros como o principal mecanismo causador da queda de permeabilidade. (SIQUEIRA; BONET; SHECAIRA, 2003) descrevem um modelo computacional de simulação e determinação da queda da permeabilidade devido à captura de partículas em suspensão. Mas como não existe consenso sobre a importância deste mecanismo no dano de formação causado pelo sulfato de bário, optou-se por evitar a elaboração de modelos complexos para simulação de fluxo e captura de partículas.
- Cristais não tem preferência para se alocar em sítios específicos, como poros pequenos ou grandes ou cavidades (TODD; YUAN, 1992). Sabe-se que a nucleação heterogênea tende a ocorrer em sítios que reduzam a energia necessária para a formação da superfície do cristal, como falhas e dobras no substrato da rocha. No entanto, este fenômeno ocorre em uma escala nanométrica, enquanto o presente estudo foi realizado em uma escala micrométrica.
- Devido à grande diversidade de tamanho dos cristais de sulfato de bário, que podem medir entre  $0,5 \mu m$  e  $50 \mu m$  (TODD; YUAN, 1992; BERNARD-MICHEL; PONS; VIVIER, 2002), e ao fato de que a escala dos volumes estudados (relação voxel/micron) ser variável, não existe uma relação unitária entre voxéis incrustados na simulação e cristais individuais de sulfato de bário.
- Como a escala do estudo é muito grande para representar as diferentes morfologias dos cristais individuais (NANCOLLAS; LIU, 1975; TODD; YUAN, 1992; BERNARD-MICHEL; PONS; VIVIER, 2002), os cristais serão representados por cubos (voxéis) na simulação.
- A microporosidade não contribui significativamente para a permeabilidade, podendo ser desprezada para o cálculo da mesma. A microporosidade associada à fase incrustante  $\phi_{BaSO_4}$  é modelada através de voxéis porosos contidos na fase incrustante. Apesar de possuírem um diâmetro relativamente grande (geralmente equivalente ao comprimento do voxel  $\alpha_v$ ) estes voxéis quase sempre se encontram desconectados do restante do volume poroso e não contribuem para o fluxo.

### 4.2.2 Algoritmo de incrustação *pore-lining*

A morfologia mais comum encontrada para os cristais de sulfato de bário são estruturas tabulares ortorrômbicas (veja a figura 4.4.a) com pequena superfície específica (cerca de



$0,66 \text{ m}^{-1}$ ). Como este tipo de cristal não está associado a fenômenos de aglomeração e não apresenta crescimento em direções preferenciais (dendritos), se assumirmos que os cristais não possuem sítios preferenciais de nucleação, podemos associar esta ocorrência de sulfato de bário com a deposição de argilas que podem se depositar ao redor do poro (*pore-lining*), formando uma camada que envolve os grãos de maneira quase uniforme.

O algoritmo de incrustação *pore-filling* procura modelar o crescimento de incrustação de sulfato de bário em uma camada tangencial aos grãos da rocha, acarretando no estreitamento dos poros e conseqüente redução de permeabilidade. A quantidade de volume incrustado é controlada pelo parâmetro  $\sigma_r$  que é definido como o volume do sulfato de bário precipitado  $V_{\text{BaSO}_4}$  dividido pelo volume poroso inicial  $V_{P_0}$ .

$$\sigma_r = \frac{V_{\text{BaSO}_4}}{V_{P_0}} = \frac{V_{\text{BaSO}_4}}{V_{P_+} V_{\text{BaSO}_4}} \quad (4.1)$$

$$\sigma = \frac{V_{\text{BaSO}_4}}{V_{\text{Total}}} \quad (4.2)$$

A simulação é realizada escolhendo voxéis porosos ao acaso que serão incrustados somente caso satisfaçam a restrição definida pela equação 4.3 até que a porosidade seja reduzida a  $1 - \sigma_r$  de seu valor inicial.

Seja  $V_{s_i}$  o número de voxéis incrustados na 6-vizinhança (ver figura 2.14) do voxel  $i$ , e  $V_{r_i}$  o número de voxéis que representam a matriz rochosa na 6-vizinhança do voxel  $i$ , o voxel poroso  $i$  selecionado randomicamente será incrustado apenas se

$$V_{s_i} + V_{r_i} > 1 \quad (4.3)$$

Caso a desigualdade acima fosse  $V_{s_i} + V_{r_i} > 0$ , teríamos como resultado a geração de uma alta microporosidade que tornaria a imagem completamente desconectada mesmo para valores pequenos de  $\sigma_r$ . A figura 4.1(b) revela a presença de microporosidade, em torno de 10% do volume incrustado, gerada no interior da fase incrustante durante a simulação executada com a restrição da equação 4.3. Não temos dados para a microporosidade real apresentada por este tipo de incrustação devido à ausência de estudos que apresentem imagens de lâminas delgadas adequadas para a realização de medidas estereológicas.

A figura 4.2 mostra o resultado de operações de incrustação do tipo *pore-lining* para a rocha Berea 500. Observe que a medida que  $\sigma_r$  aumenta, a espessura da camada incrustante que envolve a superfície da rocha também aumenta mais ou menos uniformemente. Para  $\sigma_r = 0.5$  (figura 4.2.f) boa parte dos poros pequenos (gargantas) se encontra completamente bloqueada, neste ponto o espaço poroso da representação tridimensional ainda percola, mas a permeabilidade é de apenas 5% do valor inicial calculado para a rocha sem incrustação (figura 4.2.a).

É importante ressaltar que não existe uma relação unitária entre o número de voxéis incrustados e o número de cristais, tanto para o modelo de incrustação *pore-lining* como

para os outros modelos. Isto se deve ao fato de que as representações tridimensionais podem apresentar escalas diferentes e que os cristais de sulfato de bário também ocorrem na natureza em diferentes tamanhos (veja as figuras 4.4.a, 4.4.b e 4.6.a). Portanto, um voxel incrustado pode representar parte de um cristal ou até mesmo um conjunto de cristais.

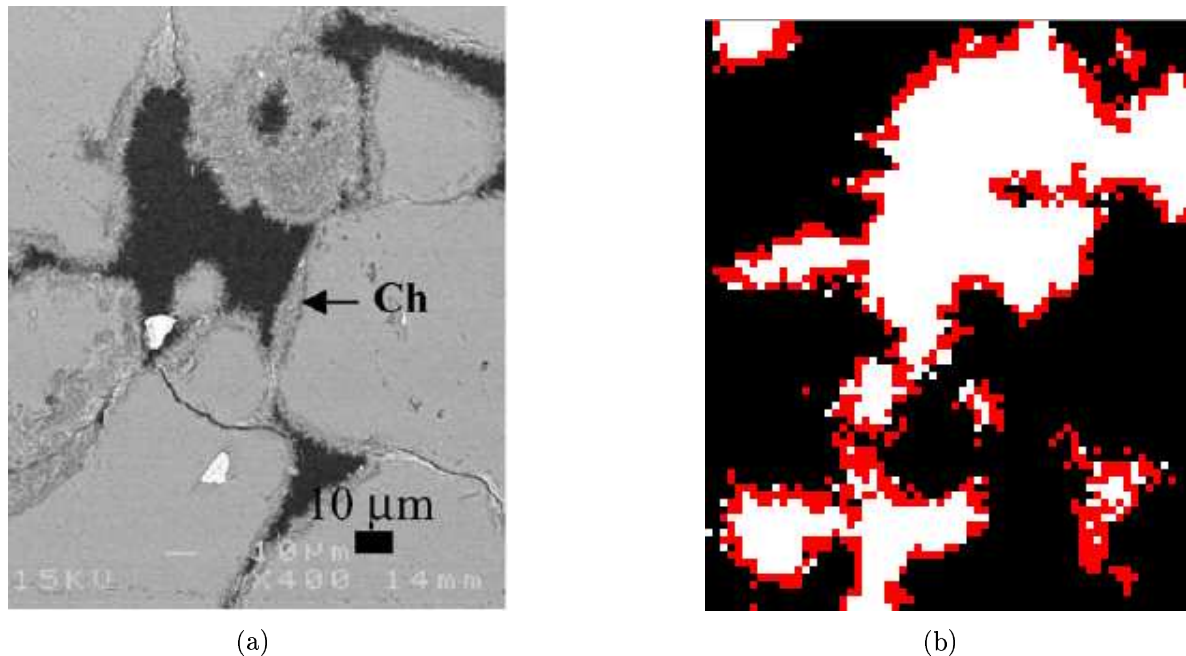


Figura 4.1: Modelo de incrustação *pore-lining*. (a) imagem obtida com um MEV, mostrando um arenito com deposição de clorita do tipo *pore-lining*. Fonte: (CEREPI; DURAND; BROSSE, 2002); (b) seção transversal de uma representação tridimensional da rocha Berea 500 incrustada com o algoritmo de incrustação *pore-lining* com  $\sigma_r = 0.4$ . Note a presença de voxéis porosos (brancos) entre os voxéis incrustados (vermelhos) sobre o substrato da rocha (voxéis pretos). A escala das figuras a e b é aproximadamente igual.

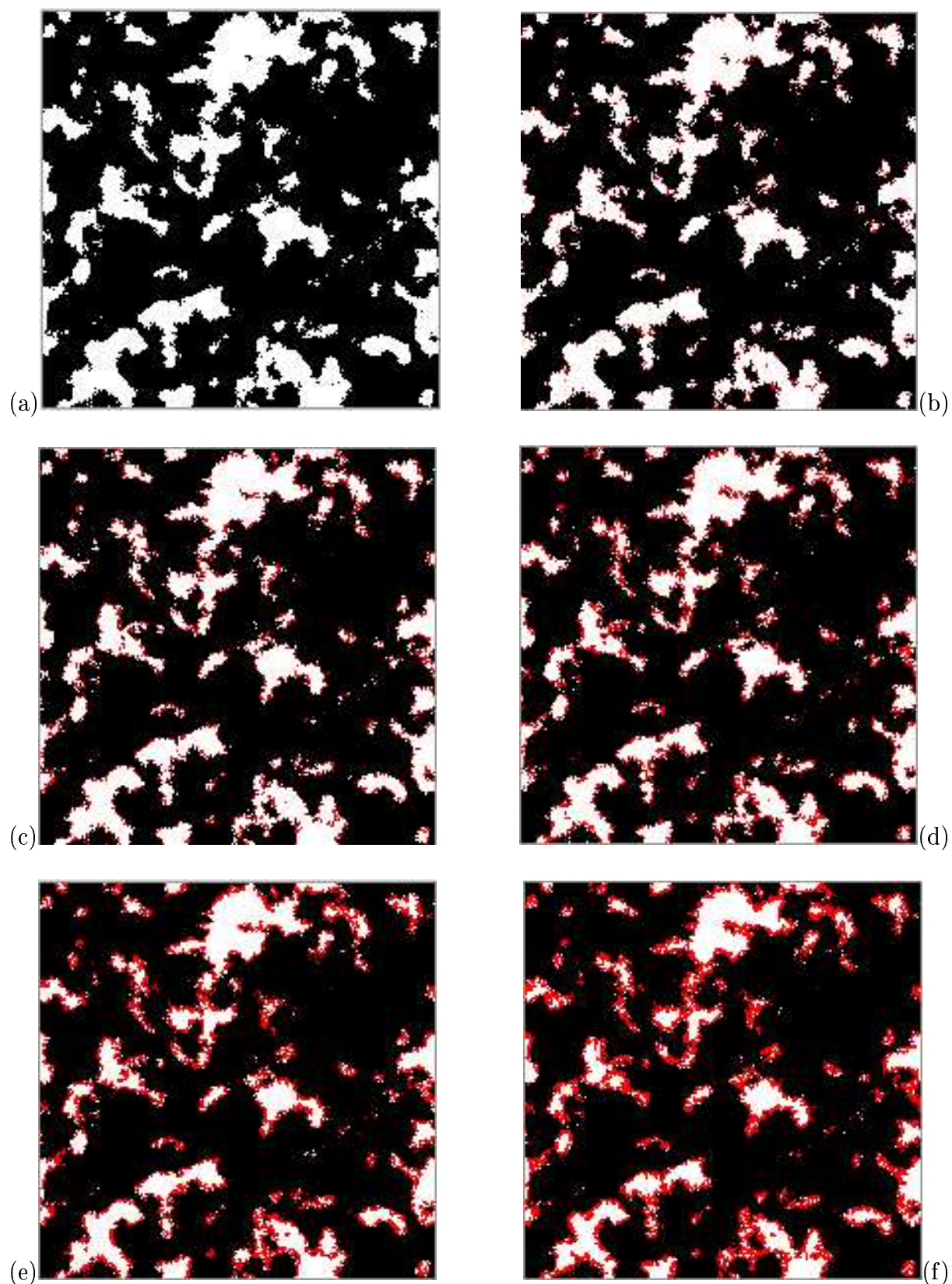
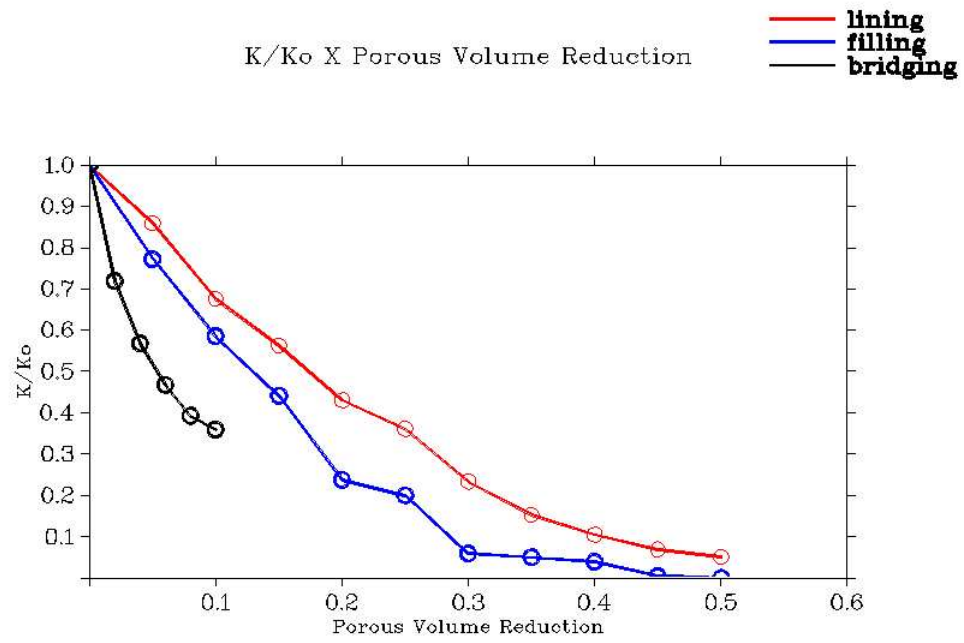
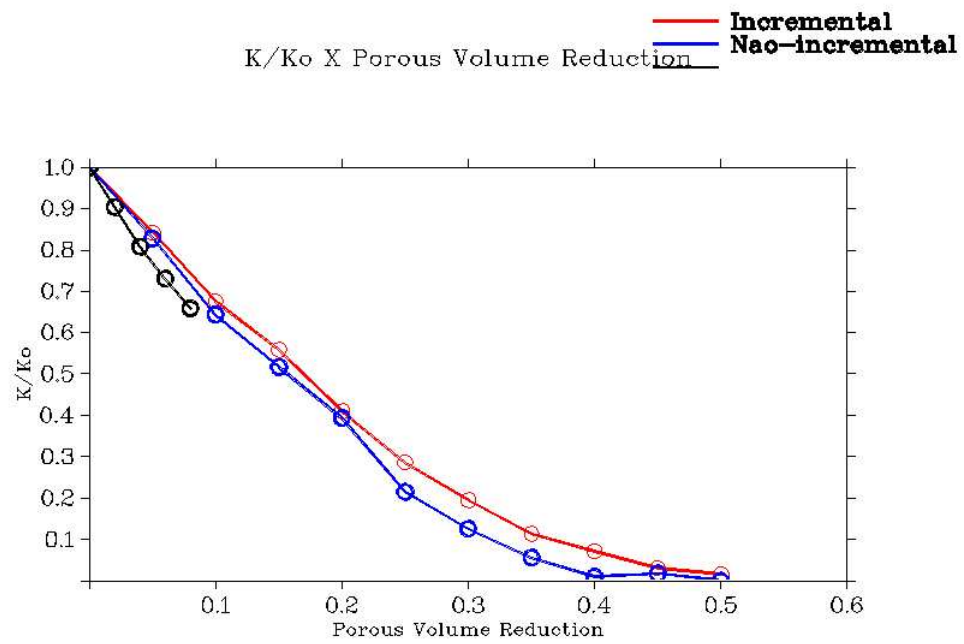


Figura 4.2: Seções transversais da representação reconstruída da rocha Berea 500 e o resultado do algoritmo de incrustação *pore-lining*. (a) representação original; (b) apresentando 10% do volume poroso incrustado; (c) 20% do volume poroso incrustado; (d) 30% do volume poroso incrustado; (e) 40% do volume poroso incrustado; (f) 50% do volume poroso incrustado.



(a) Berea 500



(b) P320-K642

Figura 4.3: Resultados para a queda de permeabilidade em função de  $\sigma_r$  para diferentes algoritmos de incrustação. (a) Berea 500; (b) P320\_K642.

### 4.2.3 Algoritmo de incrustação *pore-filling*

No caso de incrustação do tipo *pore-filling* os cristais tendem a apresentar crescimento localizado devido ao processo de aglomeração (FALOPE; JONES; ZAUNER, 2001; MARCHISIO et al., 2002; WAT et al., 1992) causado pela força de Van der Waals entre partículas de cristais. Outro tipo de estrutura é o cristal conhecido como “rosa do deserto” (veja a figura 4.4.b) que é composto de diversos cristais tabulares, possivelmente unidos pela nucleação secundária e subsequente crescimento de cristais menores sobre cristais maiores. Uma inspeção visual da figura 4.4.b revela a existência de microporosidade entre os cristais formadores da “rosa do deserto”, que provavelmente também ocorre no caso de cristais aglomerados.

Tanto o fenômeno da aglomeração quanto a formação de cristais do tipo “rosa do deserto” são dependentes do grau de supersaturação de sulfato de bário, ocorrendo com o aumento da mesma. A presença de cátions com o mesmo número de valência do bário, como o cálcio e o magnésio e o aumento da razão de água de formação sobre água de injeção também contribuem para a formação de aglomerados (HENNESSY; GRAHAM, 2002).

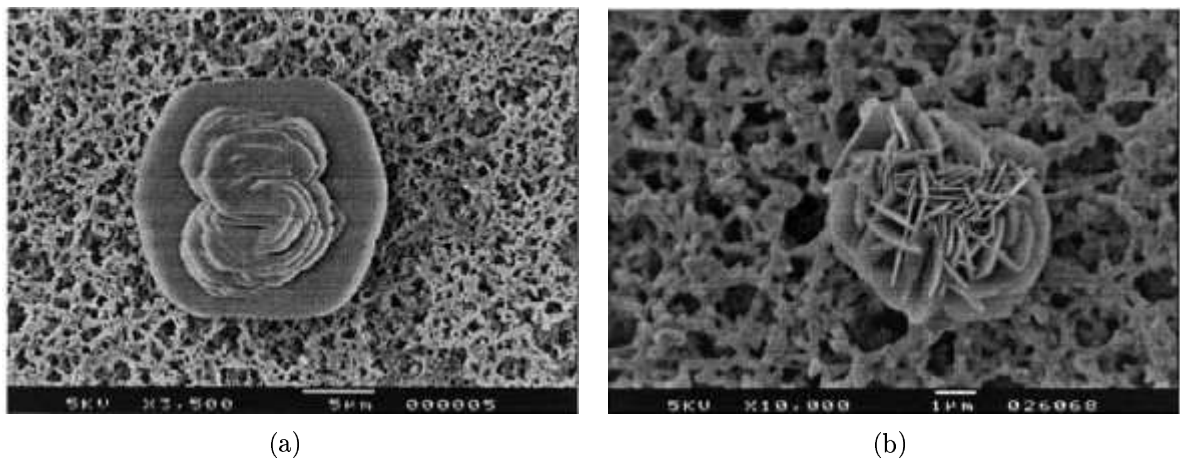


Figura 4.4: Cristais de sulfato de bário apresentando morfologia (a) tabular e (b) “rosa do deserto”. Fonte : (BERNARD-MICHEL; PONS; VIVIER, 2002)

O algoritmo de incrustação do tipo *pore-filling* foi projetado para simular o crescimento localizado de cristais e a formação de microporosidade no interior da fase incrustante. As regras de incrustação são bastante simples e podem ser controladas por três parâmetros (veja a figura A.12):

i) Redução do volume poroso  $\sigma_r$  [ $m^3/m^3$ ]: determina a fração do volume poroso que será incrustada durante o passo da simulação.

ii) Fração de volume aglomerado  $F_{VA}$ : define a fração dos voxels incrustados obedecendo a restrição da equação 4.4, quanto maior o valor do parâmetro maior o tamanho dos aglomerados.

iii) Microporosidade  $\phi_{BaSO_4}$  [ $m^3/m^3$ ]: porosidade interna à fase incrustante.

O processo de incrustação é realizado através de uma simulação de Monte Carlo onde voxéis porosos são escolhidos randomicamente, tendo uma chance  $F_{VA}$  de serem incrustados apenas se:

$$(V_{s_i} + V_{r_i} > 1) \wedge (V_{s_i} > 0) \quad (4.4)$$

e uma chance  $1-F_{VA}$  de serem incrustados apenas caso satisfaçam a equação 4.3. Como  $F_{VA}$  deve ser um valor próximo de 1 estes voxéis agem como sementes na simulação de incrustação. O primeiro termo da equação 4.4 impede a formação descontrolada de microporosidade, enquanto o segundo termo garante que os voxéis serão incrustados somente se existirem vizinhos já incrustados na sua 6-vizinhança. O símbolo  $\wedge$  na equação 4.4 representa a operação lógica OU.

O parâmetro  $\phi_{BaSO_4}$  tem grande impacto na redução da permeabilidade, uma vez que a maior parte da microporosidade gerada é desconexa para representações tridimensionais com 6-vizinhança (ver Figura 2.14), logo a perda efetiva de porosidade conectada  $\Delta\phi_{c6}$  é dada por

$$\Delta\phi_{c6} \cong \phi(\sigma_r(1 + \phi_{BaSO_4})) \quad (4.5)$$

onde  $\sigma_r\phi_{BaSO_4}$  é o volume poroso ocupado pela microporosidade.

A perda de porosidade é dada pela equação:

$$\Delta\phi = \phi\sigma_r \quad (4.6)$$

A equação 4.5 indica que a porosidade da fase incrustante potencializa o dano causado pela incrustação. Na realidade a microporosidade gerada pela incrustação de sulfato no meio poroso em rochas reservatório não é desconectada, no entanto a microporosidade geralmente influencia muito pouco a permeabilidade e a sua contribuição é desprezada no modelo proposto, conforme descrito na seção 4.2.1.

Os cristais que satisfazem à equação 4.3 incrustados no início da simulação darão origem a aglomerados maiores, portanto teremos uma distribuição variada de tamanhos de aglomerados na representação tridimensional incrustada. Os aglomerados formados diminuem o tamanho dos poros e podem chegar a bloqueá-los totalmente, especialmente quando  $\sigma_r$  é grande e  $F_{VA}$  é próximo de 1, ocasionando a formação de grandes aglomerados.

Após a incrustação de um volume proporcional a  $\Delta\phi_{c6}$  (equação 4.5), a microporosidade é modelada pela transformação de um volume incrustado em excesso proporcional a  $\phi_{BaSO_4}$  em volume poroso, através da seleção randômica de voxéis incrustados.

A figura 4.5 mostra o resultado de operações de incrustação do tipo *pore-filling* para a rocha Berea 500. Observe que a medida que  $\sigma_r$  aumenta, o tamanho dos aglomerados também aumenta, enquanto o seu número permanece aproximadamente igual. Para  $\sigma_r = 0.3$  alguns poros pequenos já se encontram completamente bloqueados e os poros maiores

---

apresentam boa parte do seu volume ocupada por aglomerados. Para  $\sigma_r = 0.5$  boa parte dos poros se encontra completamente bloqueada, neste ponto o espaço poroso da representação tridimensional encontra-se completamente desconectado e a permeabilidade é nula.

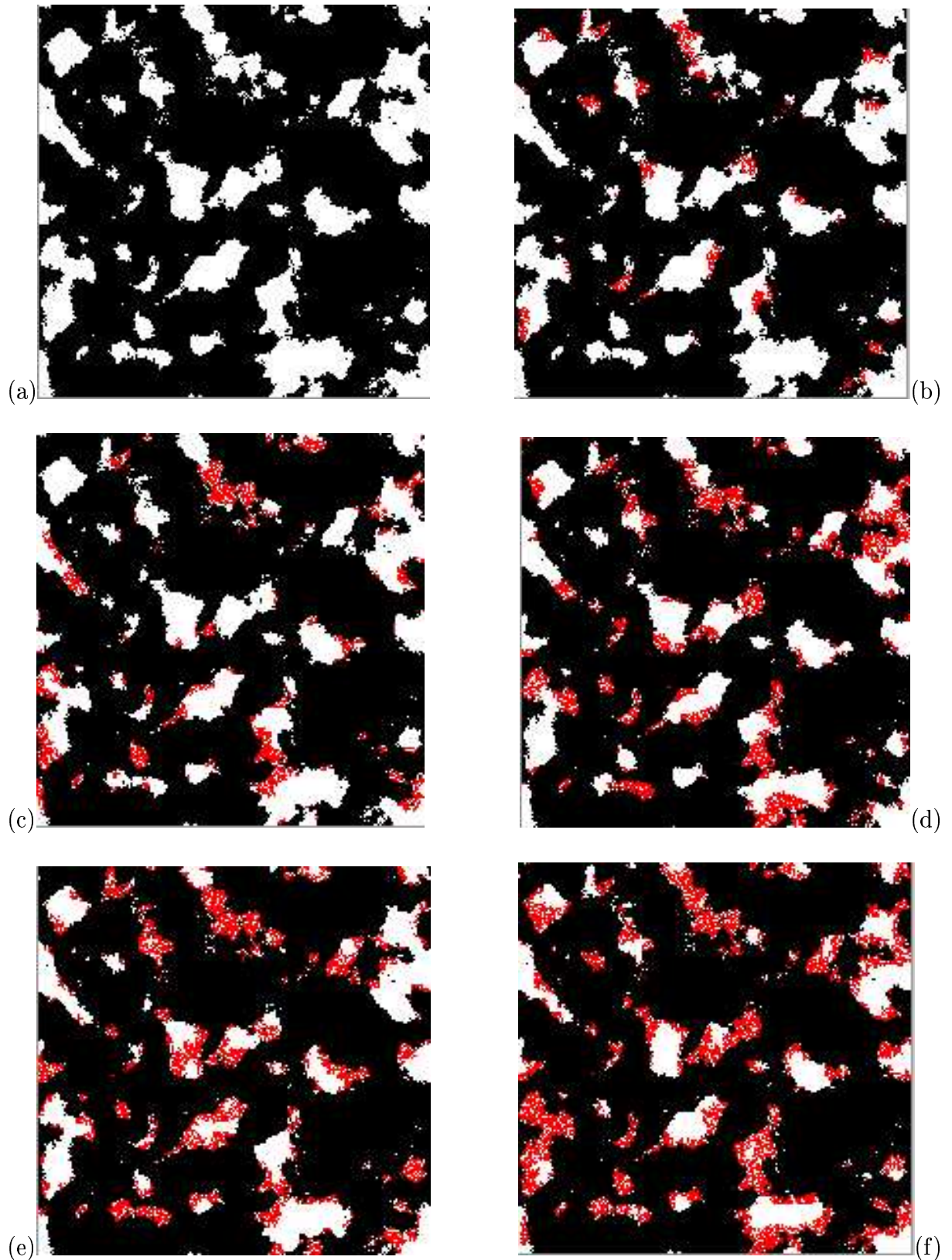


Figura 4.5: Seções transversais da representação reconstruída da rocha Berea 500 e o resultado do algoritmo de incrustação *pore-filling* com  $F_{VA} = 0.99$  e  $\phi_{BaSO_4} = 0.3$ . (a) representação original; (b) apresentando 10% do volume poroso incrustado; (c) 20% do volume poroso incrustado; (d) 30% do volume poroso incrustado; (e) 40% do volume poroso incrustado; (f) 50% do volume poroso incrustado.



#### 4.2.4 Algoritmo de incrustação dendrítica

Durante o processo de crescimento, as faces do cristal se encontram envolvidas por solução com concentrações baixas de reagentes, devido à proximidade da superfície do cristal em crescimento. Isto favorece o crescimento de partes do cristal que se aproximem de zonas com maior concentração de reagentes, ocasionando a formação de cristais alongados e a formação de dendritos (veja a figura 4.7 e 4.7).

Cristais de sulfato de bário com morfologia dendrítica tendem a se formar para concentrações altas de  $BaSO_4$  (maiores do que  $2.10^{-3} \text{mol/L}$  (NANCOLLAS; LIU, 1975)). Estes cristais apresentam grande superfície específica (aproximadamente  $1,33 \text{ m}^{-1}$ ) e dimensões entre 15 e 50  $\mu\text{m}$ , e sua morfologia é semelhante a uma estrela de quatro pontas, podendo apresentar variações na morfologia e no tamanho dependendo da razão molar dos reagentes e da presença de cátions como cálcio, magnésio e inibidores. A incorporação de impurezas na rede cristalina e o aumento da proporção de água injetada em relação à água de formação também estimulam a formação de dendritos (HENNESSY; GRAHAM, 2002). A incrustação por dendritos resulta na fragmentação do espaço poroso e no aumento da tortuosidade, causando uma rápida diminuição da permeabilidade.

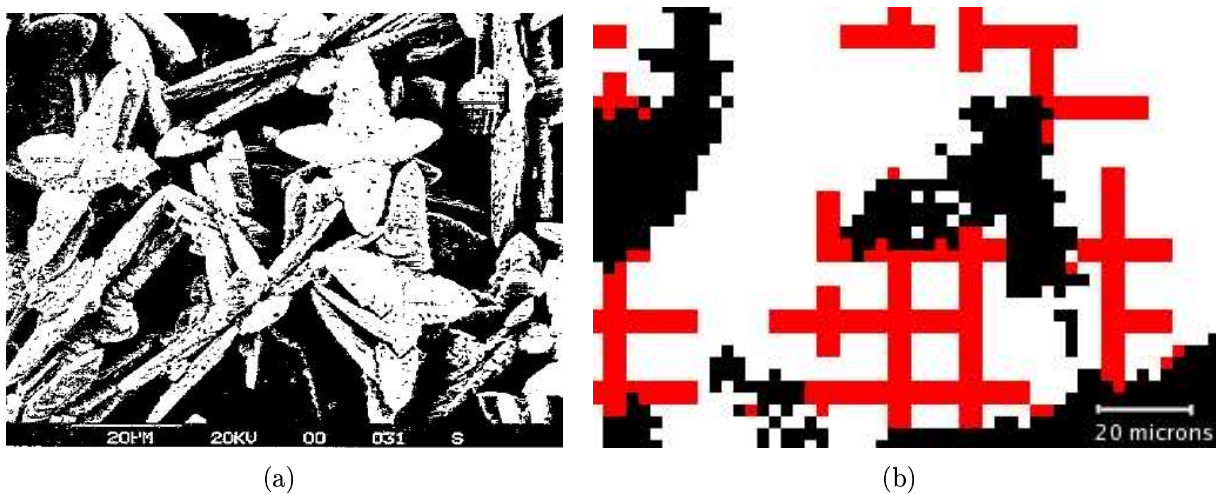


Figura 4.6: Modelo de incrustação dendrítica. (a) microfotografia binarizada de incrustação dendrítica, extraída de (TODD; YUAN, 1992); (b) zoom de seção transversal de uma representação tridimensional incrustada pelo algoritmo dendrítico. Note que a escala da microfotografia e da representação tridimensional são equivalentes.

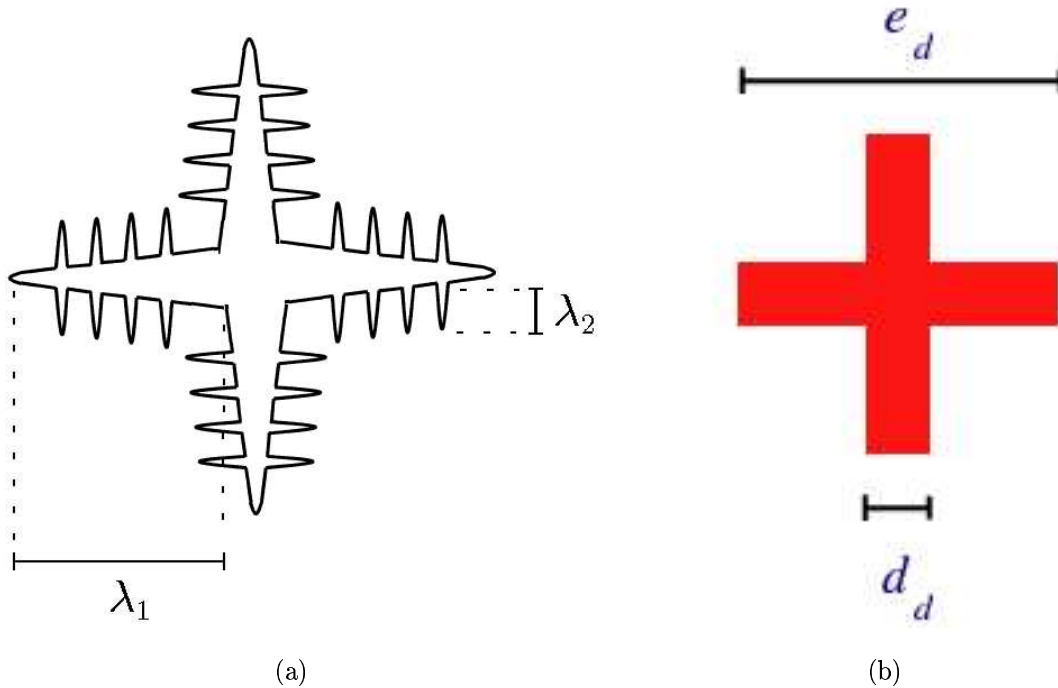


Figura 4.7: Modelo de incrustação dendrítica. (a) esquema de um cristal dendrítico (b) modelo discretizado de um cristal dendrítico, os braços ortogonais ao plano da figura (direção  $z$ ) não são mostrados.

O algoritmo de incrustação do tipo dendrítico foi projetado para simular o crescimento de cristais dendríticos e a conseqüente fragmentação dos poros. As regras de incrustação são relativamente simples e podem ser controladas por quatro parâmetros (veja a figura A.13):

i) Redução do volume poroso  $\sigma_r$  [ $m^3/m^3$ ]: determina a fração do volume poroso que será incrustada durante o passo da simulação.

ii) Fração de volume dendrítico  $F_{VD}$ : define a fração dos voxels incrustados obedecendo a restrição da equação 4.4, quanto maior o valor do parâmetro maior o tamanho dos aglomerados.

iii) Diâmetro dos braços dendríticos primários  $d_d$  [ $voxels$ ]: o diâmetro deve ser discretizado de microns para voxels, para evitar erros causados pelo arredondamento o diâmetro não deve ser muito menor do que o tamanho do voxel  $\alpha_v$  (veja as figuras 4.7.a e 4.7.b).

iv) Tamanho dos dendritos  $e_d$  [ $voxels$ ]: define o tamanho dos dendritos (veja detalhes na figura 4.7.b).

O processo de incrustação é realizado através de uma simulação de Monte Carlo onde voxels porosos são escolhidos randomicamente e têm uma chance  $F_{VD}$  de serem incrustados caso satisfaçam a equação 4.10 e uma chance  $1-F_{VD}$  de serem incrustados caso satisfaçam a equação 4.3 (fazendo as vezes de sementes no processo de incrustação).

Sejam  $x$ ,  $y$  e  $z$  as coordenadas discretas de um voxel selecionado ao acaso na representação tridimensional e  $\vartheta(a, b)$  definida como uma função que retorna o resto da divisão entre dois inteiros, este voxel poroso poderá sofrer uma incrustação dendrítica se o resultado

da equação booleana 4.10 for verdadeiro.

Seja

$$A \leftrightarrow (\vartheta(x/d_d, e_d) = 0) \wedge (\vartheta(y/d_d, e_d) = 0) \quad (4.7)$$

e

$$B \leftrightarrow (\vartheta(x/d_d, e_d) = 0) \wedge (\vartheta(z/d_d, e_d) = 0) \quad (4.8)$$

e

$$C \leftrightarrow (\vartheta(y/d_d, e_d) = 0) \wedge (\vartheta(z/d_d, e_d) = 0) \quad (4.9)$$

tem-se que

$$(A \vee B \vee C) \wedge (V_{s_i} > 0) \quad (4.10)$$

O primeiro termo da equação 4.10 distribui os voxéis incrustados sobre uma rede cúbica regular, como mostra a seção transversal da figura 4.8.c, enquanto o segundo termo garante que os voxéis serão incrustados somente se existirem vizinhos já incrustados na sua 6-vizinhança. O operador  $\vee$  na equação 4.10 representa a operação lógica E, enquanto o símbolo  $\leftrightarrow$  representa uma relação *se e somente se*.

Como, nas microfotografias analisadas (veja a figura 4.6.a), o comprimento dos braços principais  $\lambda_1$  é muito maior do que o comprimento dos braços secundários  $\lambda_2$ , o volume contendo microporosidade causada pelos braços secundários é relativamente pequeno, possuindo uma permeabilidade também pequena devido ao curto intervalo entre braços secundários adjacentes. Isto justifica o uso da hipótese simplificadora de que o espaço poroso entre os braços secundários tem uma contribuição desprezível à permeabilidade e será considerado impermeável (veja as figuras 4.7.a e 4.7.b). Portanto, a escolha do parâmetro  $d_d$  deve ser baseada no diâmetro do braço principal  $d_1$  e no comprimento do braço secundário  $\lambda_2$  de forma que

$$d_d \simeq \frac{d_1 + 2\lambda_2}{\alpha_v} \quad (4.11)$$

enquanto o parâmetro  $e_d$  é definido pela relação

$$e_d \simeq \frac{2\lambda_1}{\alpha_v} \quad (4.12)$$

A discretização de  $e_d$  e principalmente  $d_d$ , deve ser feita com cuidado para que não ocorra uma distorção excessiva na geração dos dendritos. Como as imagens analisadas apresentavam dendritos com braços de aproximadamente  $5\mu m$  de diâmetro, a aplicação do algoritmo fica restrita a representações com  $\alpha_v$  menores do que  $6\mu m$ . O gráfico da figura 4.3(a) mostra uma rápida queda da permeabilidade para um pequeno volume de

incrustação dendrítica, enquanto que na figura 4.3(b) o dano à permeabilidade não é tão acentuado. A diferença entre as duas curvas se deve em parte ao fato de que a representação tridimensional da figura 4.3(a) tem  $\alpha_v = 5,12 \mu m$ , enquanto a representação da figura 4.3(b) tem  $\alpha_v = 9,09 \mu m$ . O resultado é que para  $d_d = 1$  a incrustação correspondente a 4.3(b) acaba sendo gerada com dendritos muito grossos, de maneira que um volume menor da representação é atingido pelos dendritos para um mesmo valor de  $\sigma_r$ .

O volume total atingido por um dendrito é dado por  $e_d^3$ , o volume dos braços paralelos a um dos três eixos do espaço tridimensional é equivalente a  $d_d^2 e_d$  e o volume ocupado pela interseção dos braços no centro do dendrito é dado por  $d_d^3/e_d^3$ . Logo a razão entre o volume de um dendrito e o volume poroso atingido pelo mesmo é:

$$\frac{3(d_d^2 e_d) - 2d_d^3}{e_d^3} \quad (4.13)$$

e o valor máximo de  $\sigma_r$  pode atingir para uma representação tridimensional qualquer é aproximadamente:

$$\frac{3(d_d^2 e_d) - 2d_d^3}{e_d^3 F_{VD}} \quad (4.14)$$

Para uma representação com  $d_d = 1 \text{ voxel}$ ,  $e_d = 5 \text{ voxels}$  e  $F_{VD} = 0,8$ , por exemplo, o volume adimensional máximo que pode ser incrustado é igual a  $\sigma_r = 0,13$ .

A figura 4.6.a mostra uma microfotografia de um poro incrustado por diversos dendritos apresentando uma morfologia cruciforme. O modelo de incrustação dendrítica procura reproduzir este tipo de estrutura, como pode ser visto na figura 4.6.b que apresenta a mesma escala da figura 4.6.a. A figura 4.8 apresenta seções seriais de uma representação tridimensional incrustada pelo algoritmo de incrustação dendrítica. Os dendritos de sulfato de bário podem apresentar outros tipos de morfologia, como o formato de “espigas de milho”, mas o modelo desenvolvido reproduz satisfatoriamente os efeitos causados pelos diferentes tipos de morfologia, como o aumento da superfície específica e a fragmentação do espaço poroso.

A geração de estruturas digitais reproduzindo a complexa geometria dos dendritos e a análise da dinâmica de fluxo resultante pode ser realizada com uma representação tridimensional com alta resolução ( $\alpha$  muito pequeno) e o uso do método *lattice-boltzmann* para determinação da permeabilidade. No entanto, o custo computacional necessário para determinar a permeabilidade de um volume representativo de uma rocha reconstruída seria muito maior, exigindo a utilização de um *cluster* de computadores.

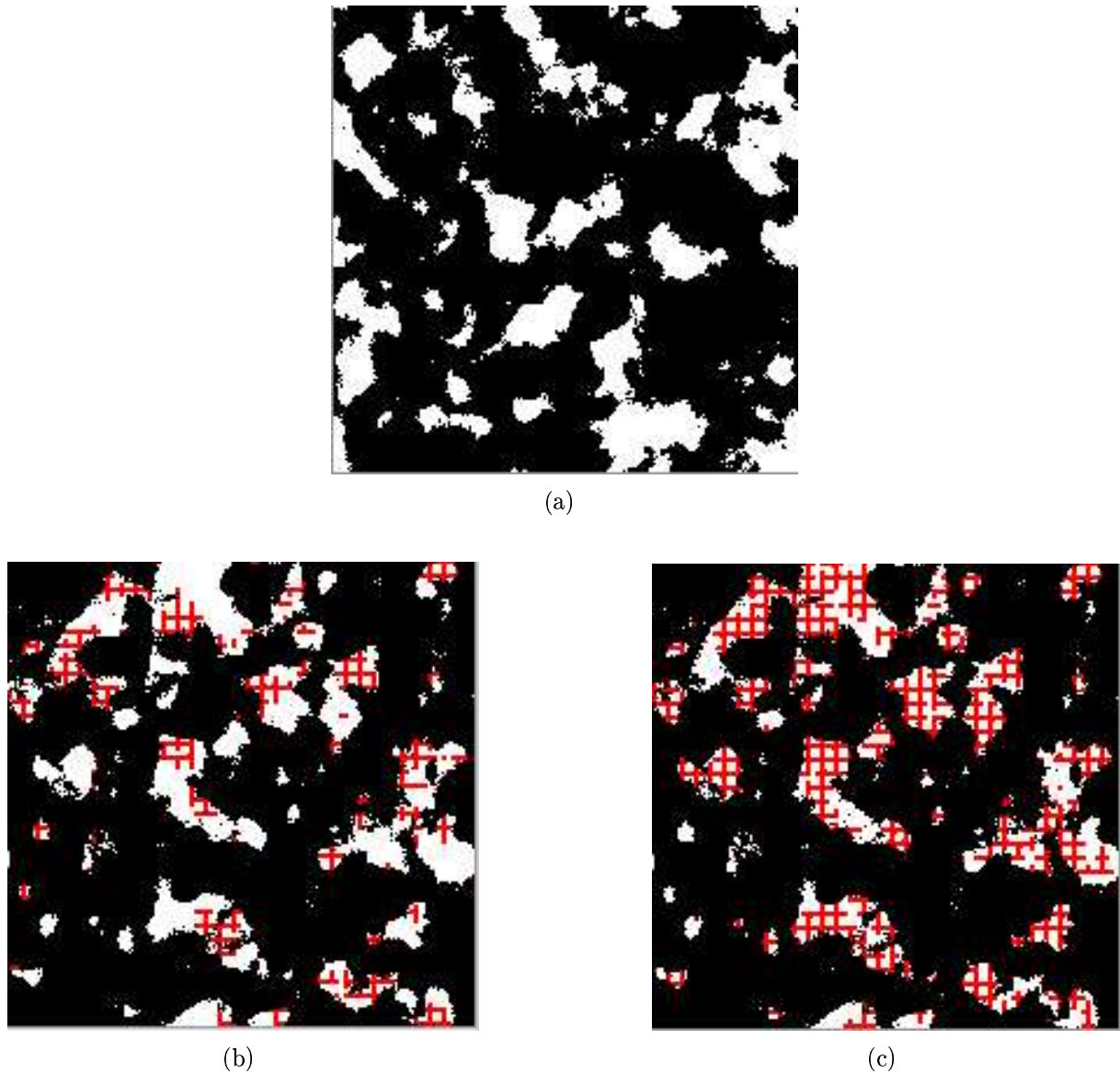


Figura 4.8: Seções transversais da representação reconstruída da rocha Berea 500 e o resultado do algoritmo de incrustação dendrítica com  $F_{VD} = 0,9$ ,  $d_d = 2$  voxéis e  $e_d = 6$  voxéis. (a) representação original; (b) apresentando 10% do volume poroso incrustado; (c) apresentando 20% do volume poroso incrustado. Note que para  $\sigma_r = 0.2$  os dendritos ocupam quase todo o espaço poroso.

#### 4.2.5 Impacto da resolução da representação tridimensional

Na seção 2.1.2 definimos que o comprimento  $\alpha$  de um pixel da imagem de uma rocha deveria ser menor ou igual ao diâmetro crítico  $D_c$ , de maneira que informações sobre um conjunto de poros com influência determinante sobre a permeabilidade não sejam perdidas no processo de discretização. Segundo (SANTOS et al., 2002a), “a idéia é que quando submetido a uma diferença de pressão, o fluido irá atravessar o espaço poroso seguindo um caminho de menor resistência e as maiores resistências hidráulicas neste caminho de fluxo serão representadas por gargantas com raios  $r - R_c$ ”, concluindo que para uma boa

estimativa da permeabilidade intrínseca  $\alpha_v$  deve ser menor do que o diâmetro crítico.

A maioria dos algoritmos aplicados a representações tridimensionais de rochas utiliza 6-vizinhança (ver figura 2.14), isto significa que voxéis adjacentes em uma diagonal não estão conectados. Quando a resolução da representação tridimensional é pequena, o comprimento do voxel em microns  $\alpha_v$  assume valores grandes, resultando na perda de informações sobre estruturas (poros e rugosidades) menores do que o tamanho do voxel. Uma representação tridimensional com baixa resolução pode magnificar o efeito dos algoritmos de incrustação *pore-lining* e *pore-filling*, causando uma rápida eliminação da porosidade conectada  $\phi_{c6}$ , especialmente quando a imagem possui muitos poros com poucos voxéis de diâmetro, como no exemplo da figura 4.9. Estes poros acabam sendo bloqueados, total ou parcialmente, e têm a sua condutividade reduzida a uma fração do que seria o esperado para uma representação com maior resolução.

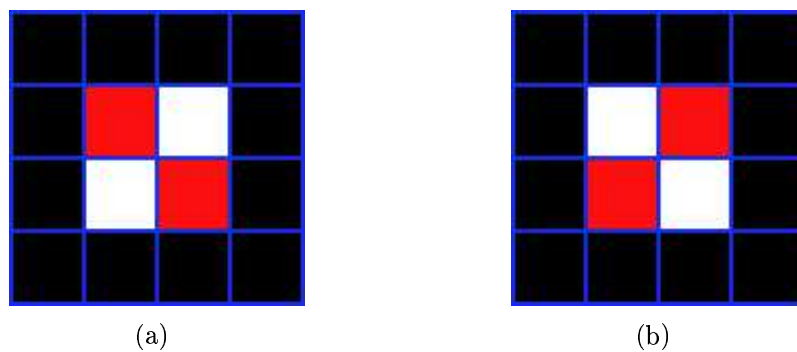


Figura 4.9: Seção transversal de uma representação tridimensional mostrando um poro completamente bloqueado por incrustação *pore-lining* com  $\sigma_r$  pequeno e  $\alpha_v$  grande. (a) seção transversal do poro no plano  $z_i$ ; (b) seção transversal do poro no plano  $z_{i+1}$ .

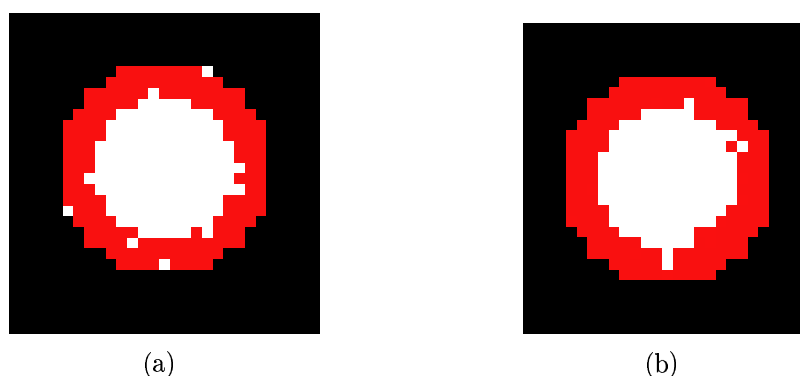


Figura 4.10: Seção transversal de uma representação tridimensional mostrando um poro com incrustação *pore-lining* para  $\sigma_r = 0.5$  e  $\alpha_v$  pequeno. (a) seção transversal do poro no plano  $z_i$ ; (b) seção transversal do poro no plano  $z_{i+1}$ . O raio hidráulico do poro sofreu uma redução de 70%, mas não foi bloqueado. Estatisticamente, os outros planos  $z_{i+n}$  do poro devem apresentar poucas diferenças na morfologia do material incrustante.

Observe que o poro apresentado nas figuras 4.9.a e 4.9.b encontra-se completamente bloqueado, pois os voxéis porosos (em branco) do plano  $z_i$  não têm nenhum voxel poroso

do plano seguinte  $z_{i+1}$  contido na sua 6-vizinhança. O mesmo problema não ocorre no poro apresentado nas figuras 4.10.a e 4.10.b, que têm uma resolução é bem maior. Note que os dois poros (figuras 4.9 e 4.10) apresentam a mesma fração de voxéis incrustados (em vermelho).

A conclusão é que para a realização de simulações de incrustação, a condição  $\alpha_v \ll D_{cv}$  deve ser satisfeita, para que poros no caminho preferencial do fluxo não sejam facilmente bloqueados para pequenos valores de  $\sigma_r$ , onde  $D_{cv}$  é o diâmetro crítico da representação tridimensional, que pode ser obtido através de simulações de intrusão de mercúrio realizadas sobre as rochas reconstruídas (MAGNANI, 1996).

## 4.2.6 Simulação incremental e não-incremental

Uma simulação de incrustação é realizada sobre a representação tridimensional original de uma rocha de maneira que a cada passo da simulação um volume maior de sulfato de bário seja depositado sobre a matriz rochosa. A cada passo da simulação a rocha incrustada é salva em disco com um nome que indique tipo de incrustação e o volume incrustado  $\sigma_r$ . Posteriormente, as permeabilidades de cada rocha são determinadas através do modelo do grafo de conexão serial e uma curva de queda de injetividade em função do volume incrustado é obtida.

A simulação pode ser realizada de forma incremental, onde cada passo da simulação utiliza a representação incrustada obtida no passo anterior, simulando o crescimento das estruturas incrustantes. Este tipo de simulação modela de forma mais fiel o processo de incrustação e as curvas de injetividade obtidas são mais suaves, no entanto os resultados obtidos desta forma são menos representativos pois rochas incrustadas apresentando uma permeabilidade com um desvio grande em relação à média esperada (veja seção 4.2.7) transmitem este erro para os passos posteriores da simulação.

Na simulação não-incremental cada passo da simulação de incrustação é realizado a partir da representação original, isto significa que poros bloqueados em um passo da simulação podem aparecer sem incrustação no passo seguinte, aumentando a instabilidade das curvas de injetividade (veja a figura 4.11). Outra penalidade é o aumento do custo computacional, pois cada passo da simulação (exceto o primeiro) precisa incrustar um volume maior de voxéis, e as pressões calculadas para cada nó do grafo de conexão serial em um passo da simulação não podem ser reaproveitadas no passo seguinte.

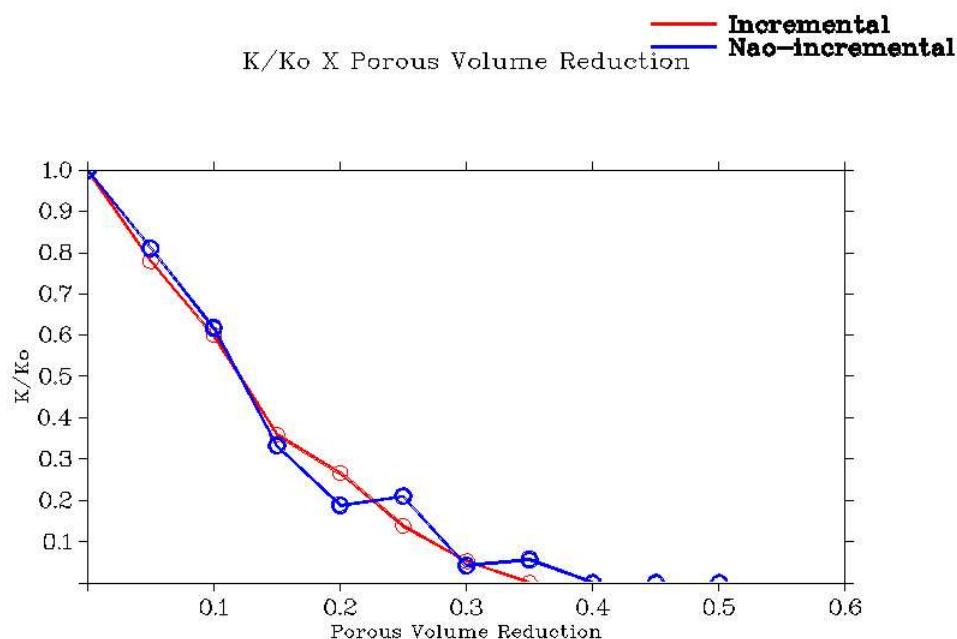


Figura 4.11: Curvas de injetividades adimensionais para simulações incrementais e não-incrementais realizadas para a rocha Berea 200.

### 4.2.7 Estabilidade dos algoritmos

Nas seções 4.2.2, 4.2.3 e 4.2.4 descrevemos os parâmetros de entrada para cada algoritmo. Dois outros parâmetros estão implícitos, um é a representação tridimensional a ser incrustada e o outro é a semente para a geração de números randômicos. O resultado de uma simulação é determinístico se todos os parâmetros de entrada forem iguais, no entanto a semente de geração de números randômicos, utilizada nas simulações de incrustação, não tem qualquer significado físico e pode ser qualquer número natural escolhido ao acaso, o que significa que se os resultados das simulações variarem muito para sementes diferentes a confiabilidade destes resultados se torna questionável.

Diversas propriedades petrofísicas podem ser calculadas a partir de uma representação tridimensional; neste estudo apenas a estabilidade da permeabilidade será determinada. Para três representações tridimensionais escolhidas ao acaso, populações de oito amostras foram geradas para cada algoritmo e conjunto parâmetros de entrada, sendo que para cada simulação a semente de números randômicos foi escolhida ao acaso. Os resultados das simulações não-incrementais (veja a seção 4.2.6) estão listados nas tabelas 4.1, 4.2, e 4.3. O símbolo  $k_0$  representa a permeabilidade da rocha sem incrustação, o símbolo  $\langle k \rangle$  representa a média da permeabilidade calculada para as rochas incrustadas e o símbolo  $s$  é o desvio padrão.



Rocha	$\sigma_r$	$k_o[mD]$	$\langle k \rangle [mD]$	$s[mD]$	$2s / \langle k \rangle$	$2s / \langle k_o \rangle$
Berea 500	0,3	808,29	177,241	13,705	0,153	0,034
P320_K642	0,3	809,51	158,964	5,185	0,065	0,013
P262_K70	0,2	148,81	27,601	5,032	0,365	0,068

Tabela 4.1: Resultados para conjuntos de 8 experimentos para algoritmo *pore-lining*.

Rocha	$\sigma_r$	$k_o[mD]$	$\langle k \rangle [mD]$	$s[mD]$	$2s / \langle k \rangle$	$2s / k_o$
Berea 500	0,1	808,29	456,687	24,162	0,106	0,06
Berea 500	0,3	808,29	62,591	18,297	0,585	0,045
P320_K642	0,1	809,51	529,557	9,885	0,037	0,024
P320_K642	0,3	809,51	103,160	11,101	0,027	0,027
P262_K70	0,1	148,81	67,131	12,55	0,374	0,169
P262_K70	0,2	148,81	19,023	10,06	1,058	0,135

Tabela 4.2: Resultados para conjuntos de 8 experimentos para algoritmo *pore-filling* com  $\phi_{BaSO_4} = 0,3$  e  $F_{VA} = 0,99$ .

Rocha	$\sigma_r$	$k_o[mD]$	$\langle k \rangle [mD]$	$s[mD]$	$2s / \langle k \rangle$	$2s / k_o$
Berea 500	0,1	808,29	374,899	11,802	0,063	0,029
P320_K642	0,1	809,51	442,462	3,914	0,018	0,010
P262_K70	0,1	148,81	81,312	3,946	0,097	0,053

Tabela 4.3: Resultados para conjuntos de 8 experimentos para algoritmo dendrítico com  $F_{VD} = 0,9$ ,  $d_d = 1$  e  $e_d = 5$ .

Para todos os experimentos as representações tridimensionais incrustadas da rocha P320\_K642 apresentaram os melhores resultados, o que se deve à alta porosidade e conectividade da rocha. Os experimentos com os algoritmos *pore-lining* e dendrítico mostram uma boa estabilidade, enquanto o algoritmo *pore-filling* apresentou um desvio padrão  $s$  alto para as representações das rochas Berea 500 e P262\_K70, especialmente para as representações incrustadas com menores permeabilidades. Isto se deve ao alto comprimento de correlação  $\lambda$  destas imagens, e à conseqüente baixa densidade de poros das representações, de forma que o bloqueio de uma única garganta de poro por um aglomerado de sulfato de bário pode causar uma grande variação na permeabilidade.

A conclusão é que todos os algoritmos fornecem uma estimativa estável da redução da permeabilidade inicial, o que pode ser verificado através da análise da coluna  $2s / \langle k_o \rangle$ . Para rochas incrustadas com baixa densidade de poros, o cálculo da permeabilidade varia muito em função da semente de geração de números randômico.

### 4.3 Determinação do coeficiente de dano de formação

O coeficiente de dano à formação é um parâmetro empírico que quantifica o impacto da precipitação na redução da permeabilidade, sendo utilizado como dado de entrada por modelos matemáticos para determinação de curvas de injetividade em função da concentração molar  $\sigma$  de sulfato de bário incrustada (BEDRIKOVETSKY et al., 2003; GLADSTONE, 2004).

Como as curvas de injetividade adimensionais  $J_n(T) = k/k_o$  geralmente assumem uma forma hiperbólica, estes modelos analíticos utilizam a reta dada pela impedância  $J(T) = k_o/k$ , cuja inclinação depende de  $\beta$ :

$$J(T) = \frac{k_o}{k} = 1 + \beta\sigma \quad (4.15)$$

onde  $\sigma$  pode ser obtido a partir da concentração volumétrica adimensional  $\sigma_r$  pela equação 4.1.

Desta forma,  $\beta$  pode ser determinado diretamente a partir da equação 4.15, uma vez que  $k_o$ ,  $k$  e  $\sigma_r$  podem ser determinados a partir das simulações de incrustação.

# Capítulo 5

## Resultados das Simulações de Incrustação

As lâminas analisadas neste capítulo foram fornecidas pelo CENPES/PETROBRAS. As mesmas foram submetidas a um processo de digitalização, binarização e reconstrução tridimensional. A seguir simulou-se um processo de incrustação por sulfato de bário sobre as representações tridimensionais obtidas por (BUENO, 2001), utilizando os modelos e algoritmos apresentados no capítulo 4 e o software descrito no apêndice A.

Todas as simulações foram realizadas de forma não-incremental (veja a seção 4.2.6) utilizando os mesmos parâmetros de entrada que estão listados na tabela 5.1, exceto quando outros parâmetros ou condições forem explicitamente definidos. As propriedades das representações tridimensionais utilizadas neste estudo são listadas na tabela 3.2. As propriedades das rochas originais fornecidas pelo CENPES/PETROBRÁS e o número de microfotografias utilizadas para cada reconstrução são informados na tabela 3.1.

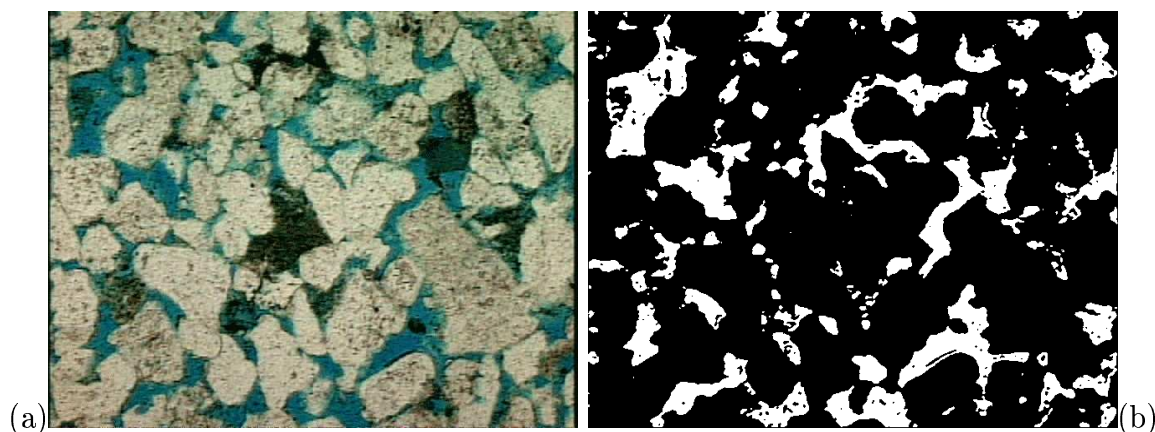
Modelo	Dendrítico			<i>Pore-Filling</i>	
Parâmetro	$d_d[voxels]$	$e_d[voxels]$	$F_{VD}$	$F_{VA}$	$\phi_{BaSO_4}$
Valor	$\simeq 5\mu m$	$\simeq 25\mu m$	0,8	0,99	0,3

Tabela 5.1: Parâmetros utilizados nas simulações.

## 5.1 Resultados para Rocha Berea 500

Na figura 5.1.a é apresentada uma microfotografia de uma lâmina delgada da rocha Berea 500 e em 5.1.b resultado da operação de binarização da imagem original. A permeabilidade experimental  $k_{exp}$  para amostra e a permeabilidade obtida com o método do grafo de conexão serial  $k_{GCS}$  para a representação tridimensional reconstruída são listadas na tabela 3.1. A reconstrução tridimensional foi realizada com o uso do método da gaussiana truncada e do método das esferas sobrepostas, dentre as várias representações obtidas a que apresentou o melhor ajuste com a rocha original foi gerada com a gaussiana truncada com  $n_{fa} = 2$ .

Figura 5.1: Imagem Berea 500, colorida (a) e binarizada (b).



Os gráficos 5.2 e 5.3 mostram uma dramática redução da permeabilidade causada pela formação de dendritos, que reduzem  $k$  em 65% com uma redução de apenas 10% do volume poroso. O impacto da incrustação dendrítica sobre a distribuição de tamanho de poros pode ser visto na figura 5.5, onde constata-se a fragmentação de quase todos os poros maiores do que  $15 \mu m$  e o conseqüente aumento da proporção de poros pequenos. O comportamento da curva de permeabilidade *pore-filling* indica que as representações com  $\sigma_r \geq 0,2$  não são estatisticamente representativas, isto se deve ao reduzido número de poros contidos na representação tridimensional, de modo que o bloqueio de um único poro pode causar uma grande variação em  $k$ . O problema das oscilações nas curvas podem ser contornados de três maneiras: i) usando representações com maior dimensão, ii) gerando várias representações e trabalhando com médias, ou iii) usando modelos de incrustação seqüencial (veja seção 4.2.6). A solução ideal é usar (i), (ii) e (iii), mas a mesma requer o uso de clusters de computadores.

A figura 5.6 apresenta a variação da superfície total da matriz rochosa e é um dado relevante, uma vez que existem equações para a determinação da taxa de crescimento dos cristais que utilizam a área disponível para precipitação como parâmetro, e modelos que consideram a cinética da precipitação podem usar uma função de  $S(\sigma)$  pré-calculada

pelo programa como dado de entrada. A superfície diminui para a incrustação *pore-lining* devido à redução dos poros, mas aumenta para *pore-filling* por causa da microporosidade  $\phi_{BaSO_4}$  interna à fase incrustante. A deposição de dendritos tem a maior taxa de crescimento da superfície, consequência da grande superfície específica dos cristais dendríticos.

A figura 5.4 mostra que a redução na porosidade conectada é maior no modelo pore-filling. Para uma redução do volume poroso de 40%, temos uma redução na porosidade conectada de 50%, e uma redução na permeabilidade de 95%.

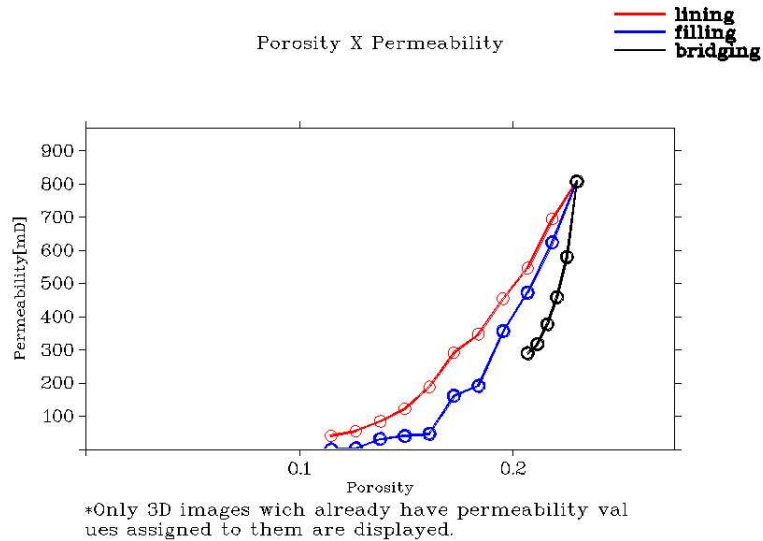


Figura 5.2: Resultados para a rocha Berea 500: Queda de permeabilidade em função da queda da porosidade.

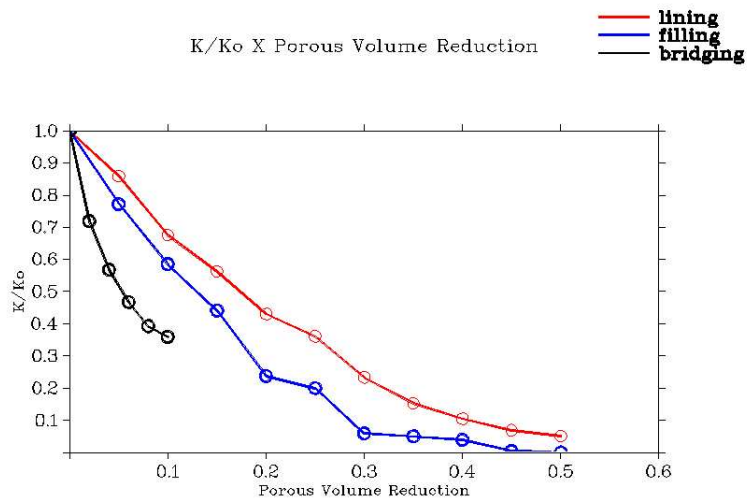


Figura 5.3: Resultados para a rocha Berea 500: queda da permeabilidade em função de  $\sigma_r$ .

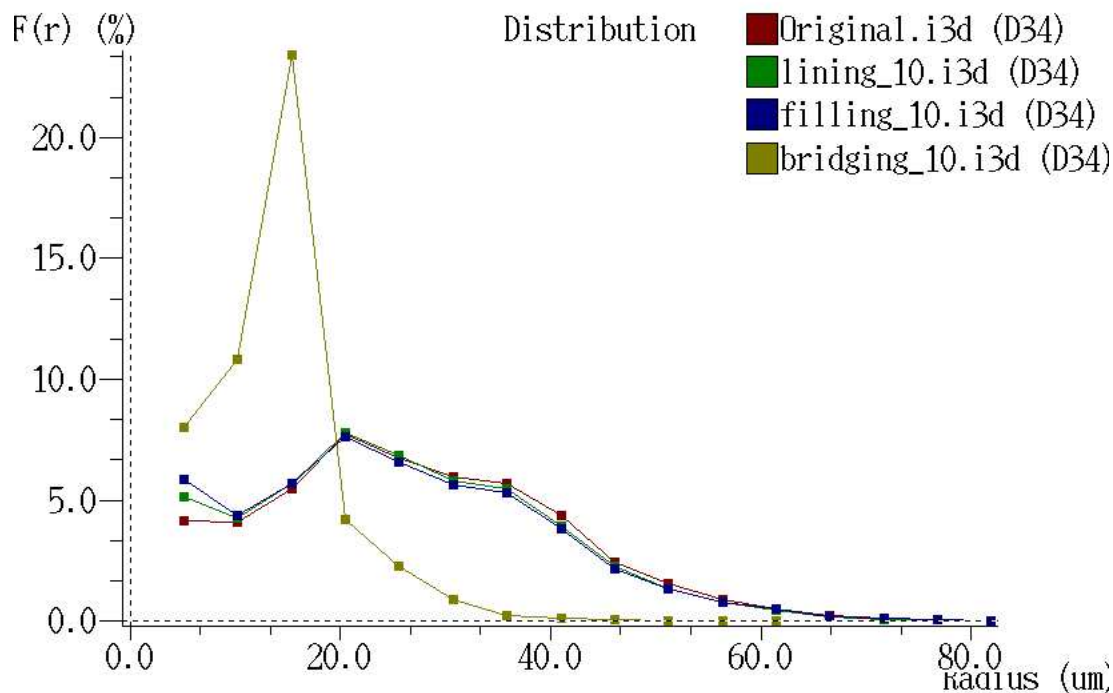


Figura 5.5: Resultados para a rocha Berea 500: Distribuição de tamanho de poros para diferentes modelos de incrustação e  $\sigma_r = 0, 1$ . Note o impacto da incrustação dendrítica (em amarelo) sobre os poros maiores.

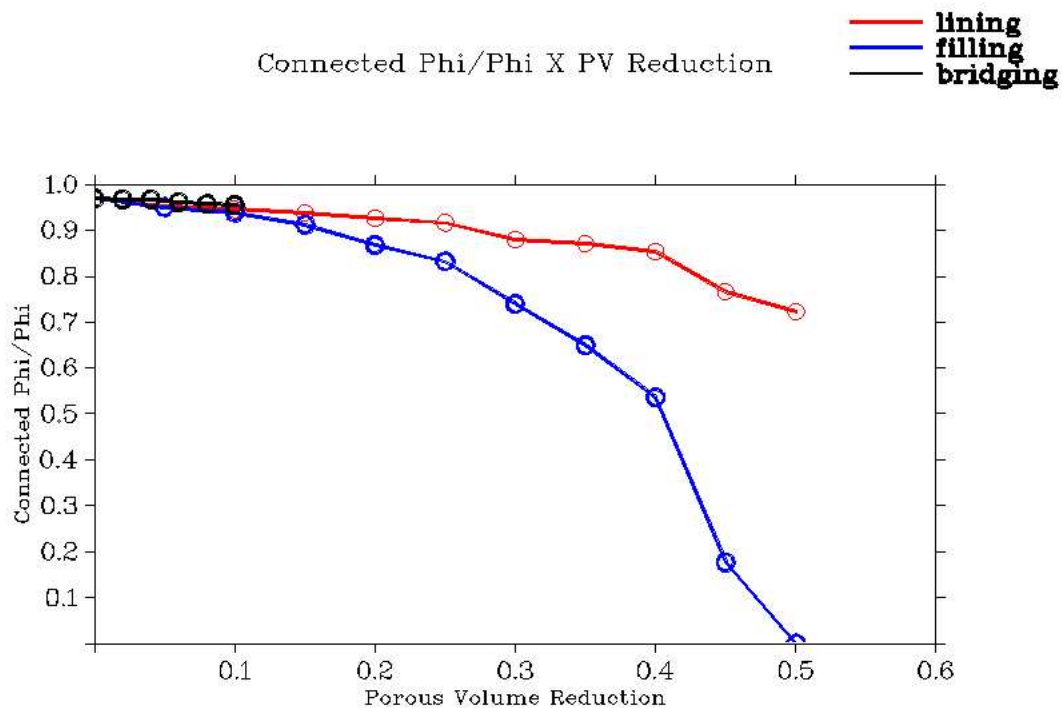


Figura 5.4: Resultados para a rocha Berea 500: Razão  $\phi_{c6}/\phi$  em função de  $\sigma_r$ .

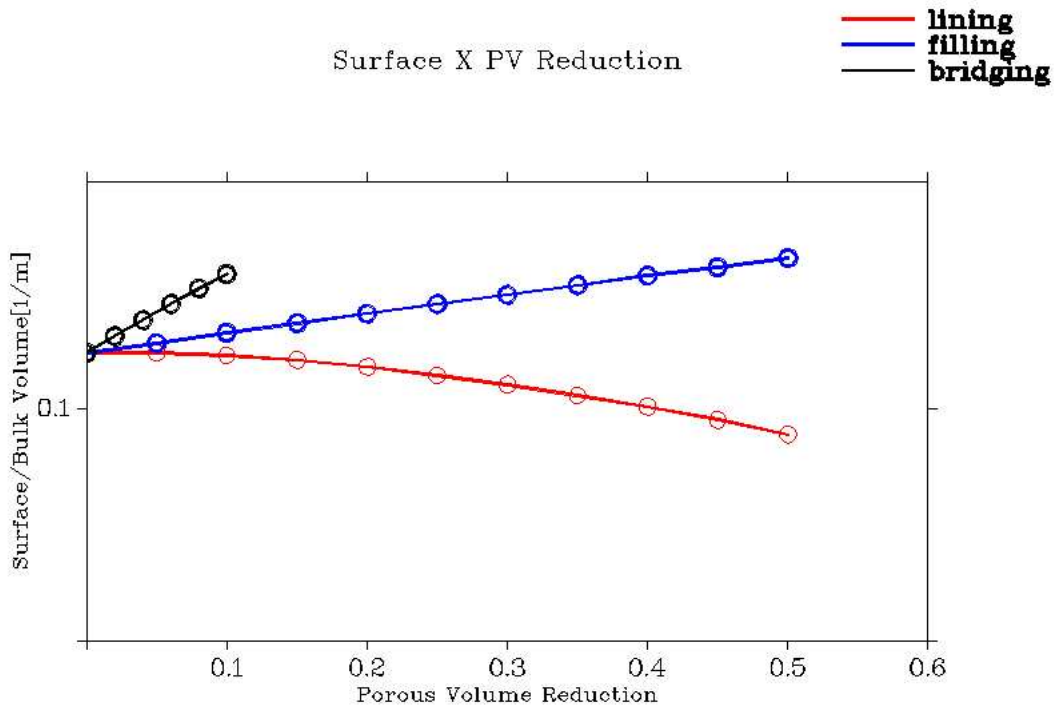


Figura 5.6: Resultados para a rocha Berea 500: Superfície total em função de  $\sigma_r$ .

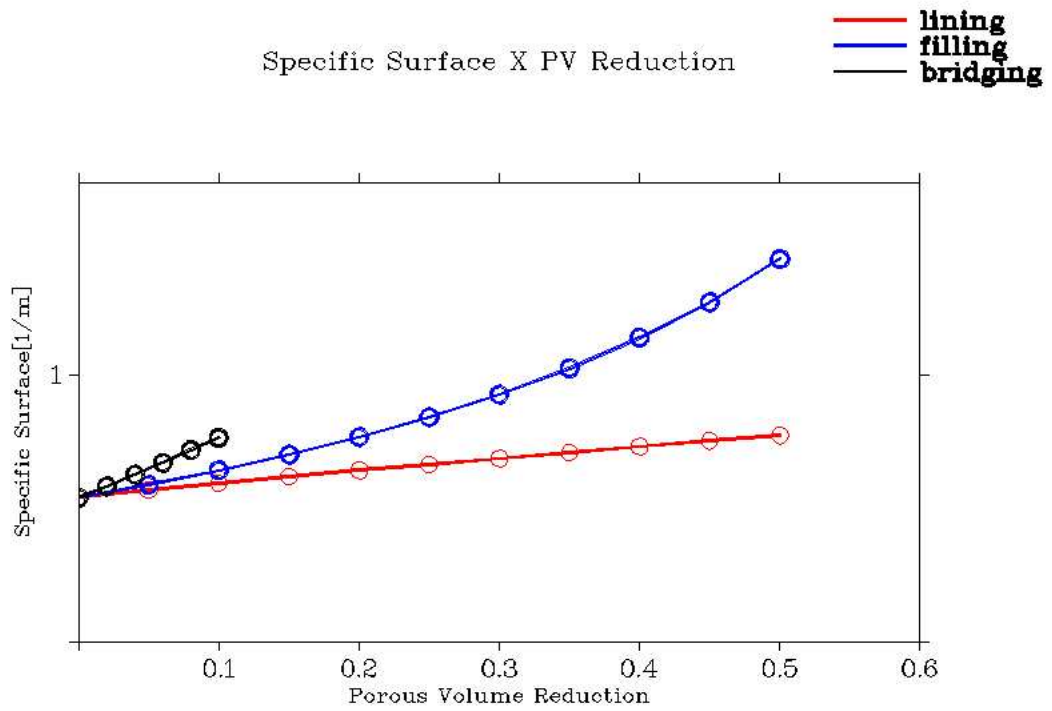
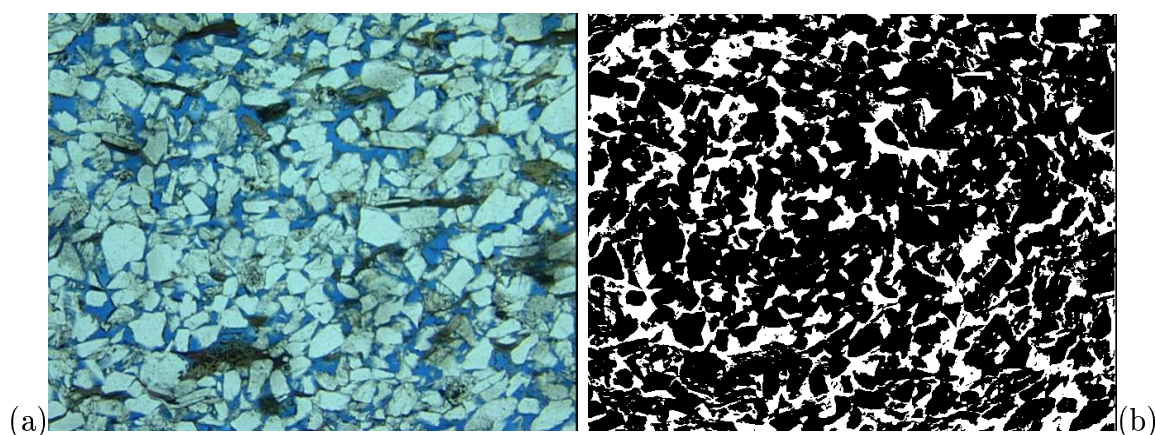


Figura 5.7: Resultados para a rocha Berea 500: superfície específica  $S_v$  em função de  $\sigma_r$ .

## 5.2 Resultados para Rocha P320\_K642

Na figura 5.8(a) é apresentada uma microfotografia de uma lâmina delgada da rocha P320\_K642 e em 5.8(b) resultado da operação de binarização da imagem original. A permeabilidade experimental  $k_{exp}$  para amostra e a permeabilidade obtida com o método do grafo de conexão serial  $k_{GCS}$  para a representação tridimensional reconstruída são listadas na tabela 3.1. A reconstrução tridimensional foi realizada com o uso do método da gaussiana truncada e do método das esferas sobrepostas, dentre as várias representações obtidas a que apresentou o melhor ajuste com a rocha original foi gerada com a gaussiana truncada com  $n_{fa} = 2$ .

Figura 5.8: Imagem P320\_K642, colorida (a) e binarizada (b).



Observa-se na figura 5.10 que existe pouca diferença entre as curvas de queda de permeabilidade até  $\sigma_r = 0,2$  para as simulações de incrustação *pore-lining* e *pore-filling*, e em seguida ocorre uma redução maior da permeabilidade para incrustação *pore-filling*. A figura 5.11 mostra que a partir de  $\sigma_r = 0,4$  a brusca diminuição da porosidade conectada  $\phi_{c6}$  não pode mais ser explicada pelo aumento do volume ocupado por  $\phi_{BaSO_4}$ , mas pelo bloqueio de poros e gargantas por material incrustante levando a uma rápida convergência para o limite de percolação.

As distribuições de tamanho de poros para incrustações *pore-lining* e *pore-filling* com  $\sigma_r = 0,2$  representadas na figura 5.13 apresentam poucas diferenças, o que não justifica plenamente os valores de permeabilidade praticamente idênticos para esta quantidade de volume incrustado, já que a deposição *pore-filling* possui maior microporosidade. Uma possível explicação para o comportamento das curvas de permeabilidade é a alta conectividade da rocha, que possibilitou a formação de caminhos preferenciais que permaneceram completamente desobstruídos na incrustação *pore-filling* até  $\sigma_r = 0,2$ . Observe também a pequena diferença no aumento da superfície específica para as duas curvas da figura 5.12 (compare com a figura 5.7).



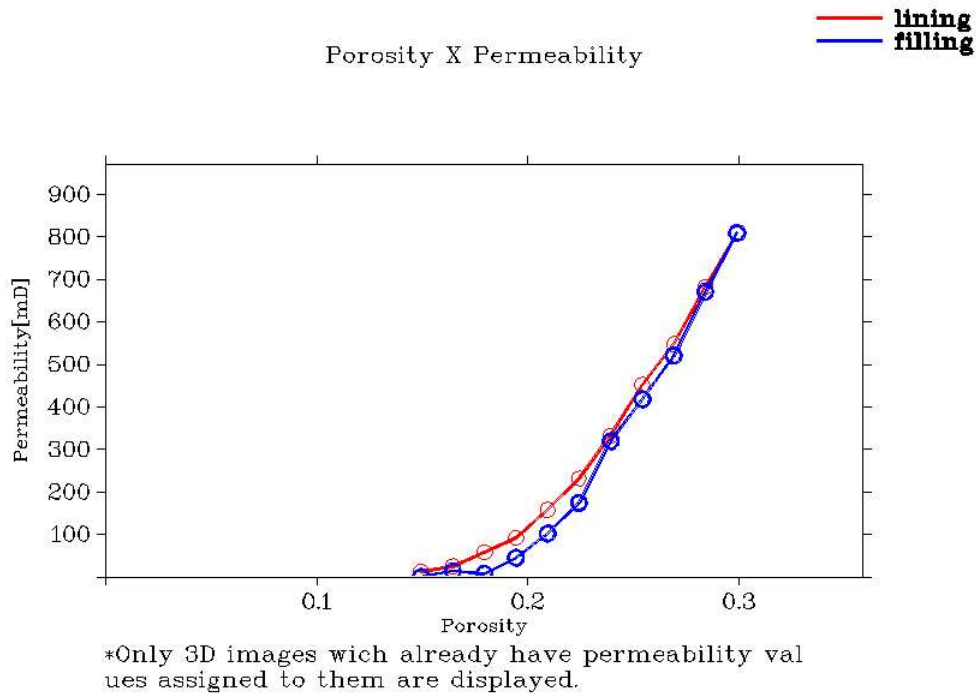


Figura 5.9: Resultados para a rocha P320\_K642: Queda de permeabilidade em função da queda da porosidade.

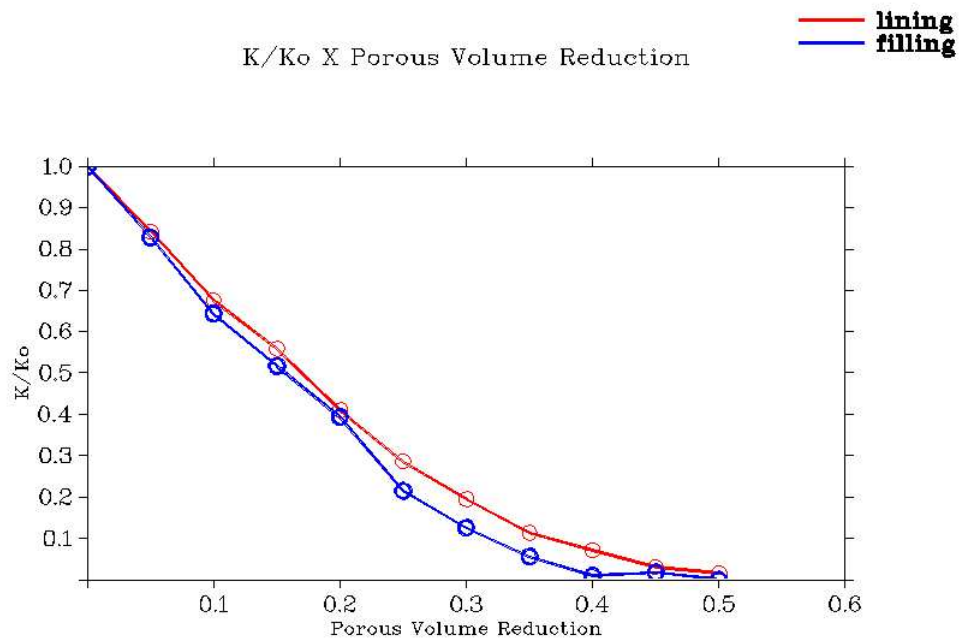


Figura 5.10: Resultados para a rocha P320\_K642: Queda da permeabilidade em função de  $\sigma_r$ .

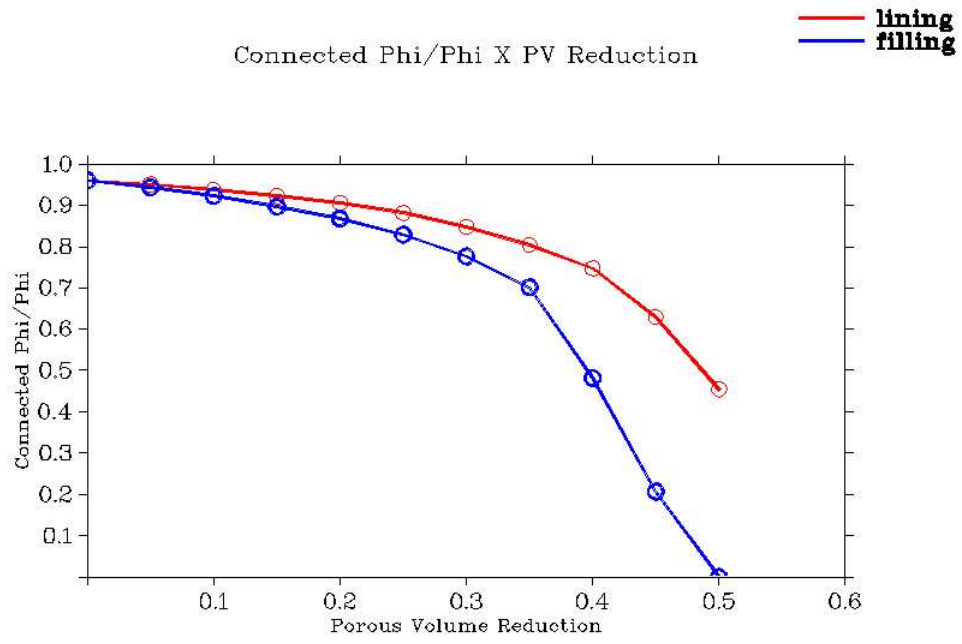


Figura 5.11: Resultados para a rocha P320\_K642: Razão  $\phi_{c6}/\phi$  em função de  $\sigma_r$ .

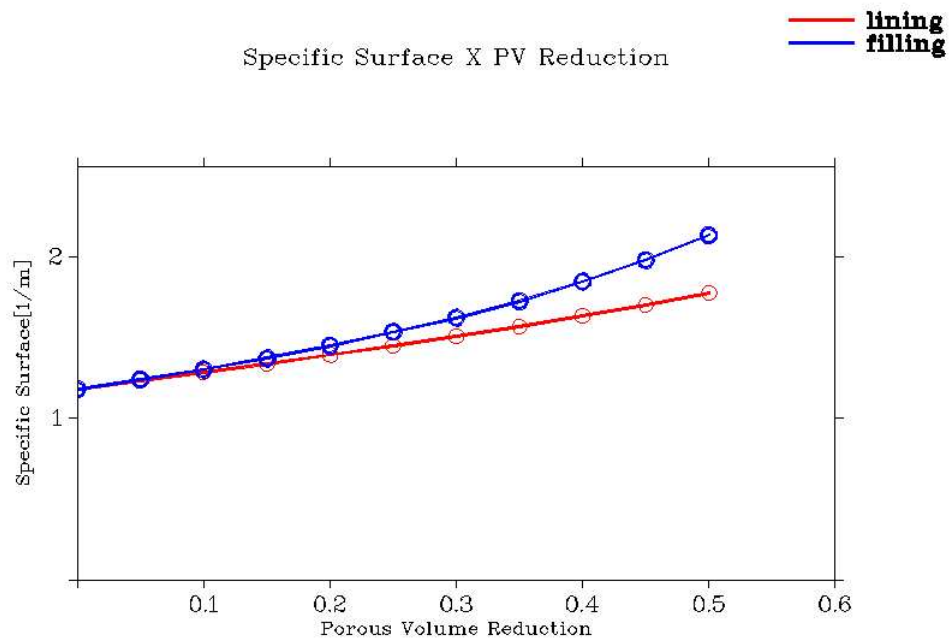


Figura 5.12: Resultados para a rocha P320\_K642: Superfície específica  $S_v$  em função de  $\sigma_r$ .

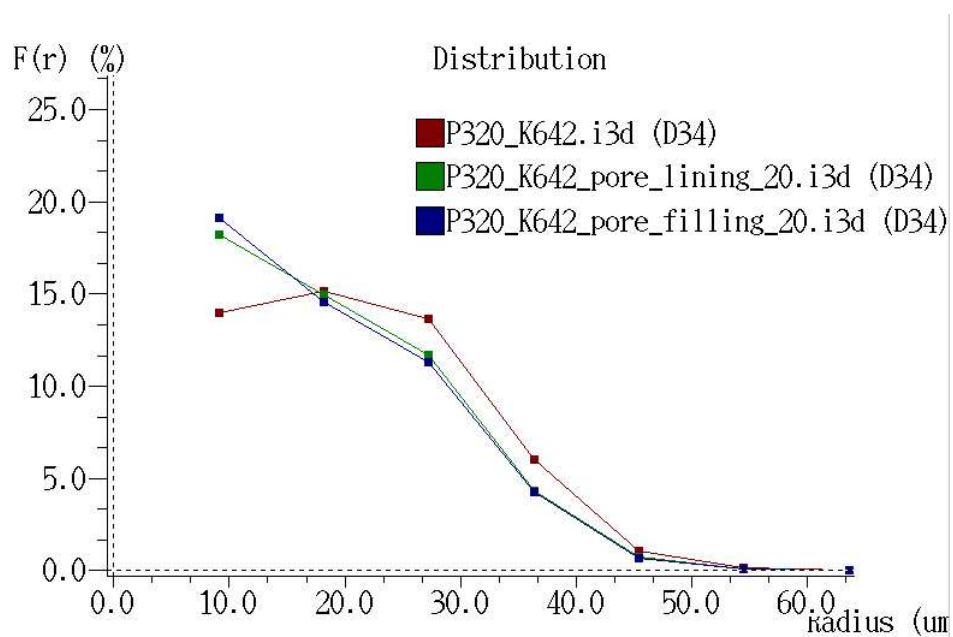
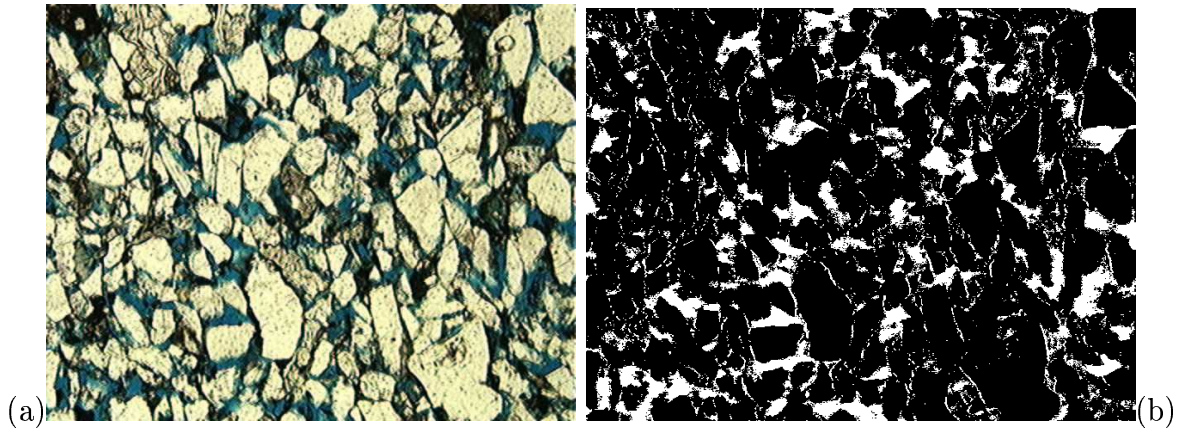


Figura 5.13: Resultados para a rocha P320\_K642: Distribuições de tamanho de poros com  $\sigma_r = 0,2$ .

### 5.3 Resultados para Rocha P262\_K70

Na figura 5.14.a é apresentada uma microfotografia de uma lâmina delgada da rocha P262\_K70 e em 5.14.b resultado da operação de binarização da imagem original. A permeabilidade experimental  $k_{exp}$  para amostra e a permeabilidade obtida com o método do grafo de conexão serial  $k_{GCS}$  para a representação tridimensional reconstruída são listadas na tabela 3.1. A reconstrução tridimensional foi realizada com o uso do método da gaussiana truncada e do método das esferas sobrepostas, dentre as várias representações obtidas a que apresentou o melhor ajuste com a rocha original foi gerada com a gaussiana truncada 2 com  $n_{fa} = 1$ . Entre as representações obtidas com a gaussiana truncada 1 a que apresentou o melhor ajuste com a rocha original foi gerada com  $n_{fa} = 2$ , que será analisada a título de exemplo.

Figura 5.14: Imagem P262\_K70, colorida (a) e binarizada (b).



#### 5.3.1 Resultados para a rocha P262\_K70 reconstruída com gt1

Os gráficos das figuras 5.15 e 5.16 mostram que a rápida queda da permeabilidade se deve à redução, seguida da eliminação da porosidade conectada. O gráfico 5.16 mostra apenas a relação entre o volume poroso conectada e o volume poroso total, mas podemos deduzir que o volume poroso conectada que não contribui efetivamente ao fluxo (poros *dead-end*) é reduzido na mesma proporção, de forma que para  $\sigma_r = 0.25$  a permeabilidade da representação é praticamente nula.

Uma inspeção visual de seções transversais da representação tridimensional da rocha P262\_K70 revela que a grande maioria dos poros apresenta um diâmetro em voxels muito pequeno, o que resulta na potencialização do dano à permeabilidade causado pelos algoritmos de incrustação. Como foi discutido na seção 4.2.5, poros com poucos voxels de diâmetro são facilmente bloqueados, mesmo para pequenos volumes de incrustação. Quando estes poros pequenos exercem uma contribuição determinante para a permeabilidade o resultado é uma abrupta queda de permeabilidade em representações com baixa

resolução ( $\alpha_v$  grande). A tabela 3.1 parece contradizer esta informação, pois a representação tridimensional P262\_K70 tem um valor razoável para o diâmetro crítico equivalente a dois voxels, no entanto a saturação de mercúrio para a pressão crítica é de apenas 53% e para  $\sigma_r = 0.1$  o diâmetro crítico da representação é de apenas um voxel. O gráfico da figura 5.17 confirma a hipótese de que a imagem possui uma resolução muito baixa, já que mesmo com um aumento da dimensão  $N$  da representação a porosidade conectada continua caindo abruptamente.

Portanto, os resultados apresentados para a rocha P262\_K70 não refletem o fenômeno modelado adequadamente, devendo ser considerados com cautela. Uma possível solução seria realizar uma operação de *resampling* sobre a representação tridimensional, aumentando a resolução e o tamanho em voxels e diminuindo o comprimento de  $\alpha_v$ . No entanto esta operação tem como efeito colateral a diminuição da superfície específica da nova representação, o que impede a sua utilização. Outra opção seria aumentar a resolução das imagens que deram origem à representação tridimensional, isto é, obter imagens com um comprimento de pixel  $\alpha$  menor para que o comprimento  $\alpha_v$  dos voxels da representação tridimensional também seja reduzido.

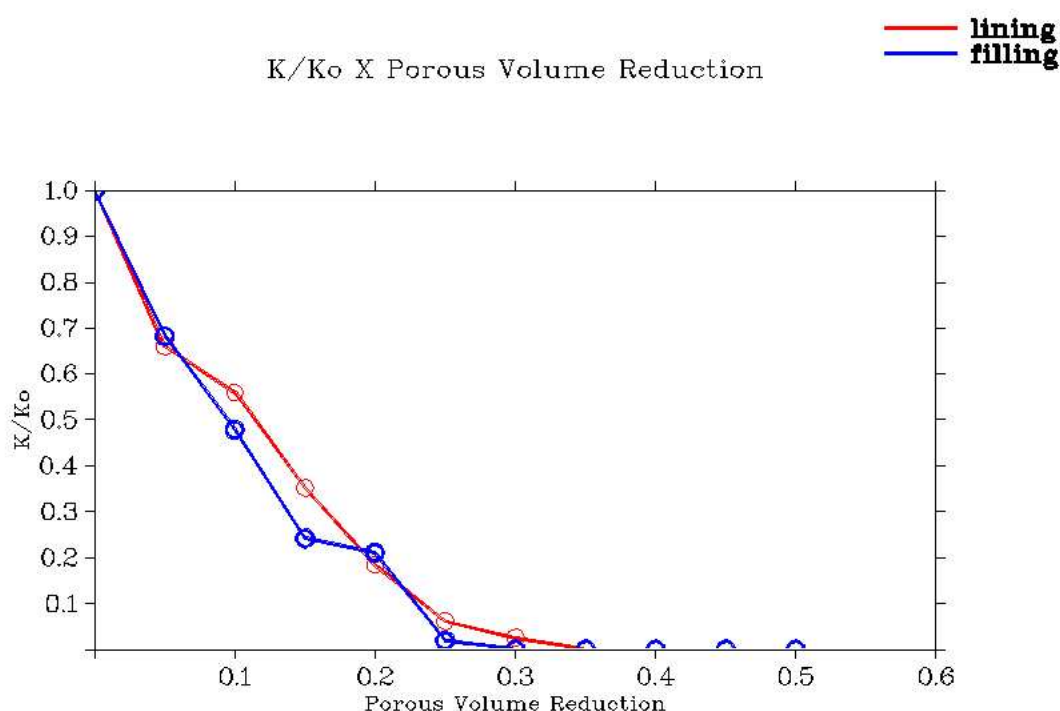


Figura 5.15: Resultados para a rocha P262\_K70: Queda da permeabilidade em função de  $\sigma_r$ .

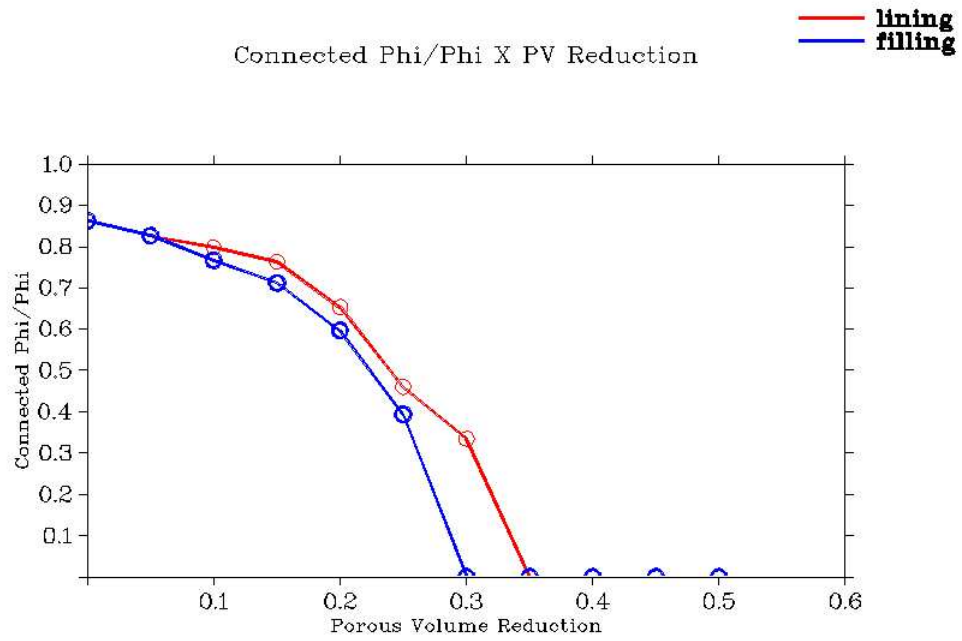


Figura 5.16: Resultados para a rocha P262\_K70: Queda da porosidade conectada em função de  $\sigma_r$ .

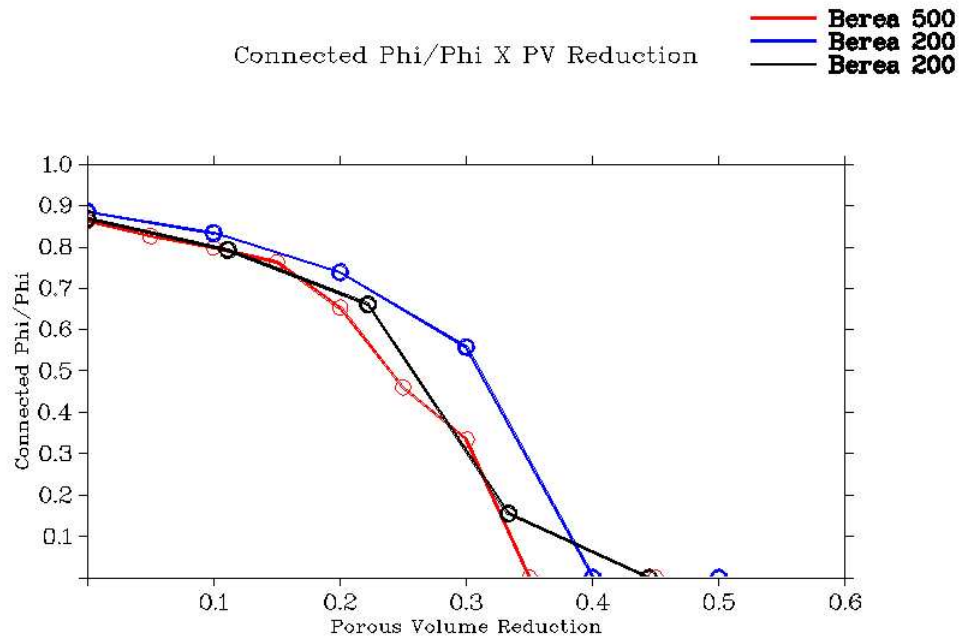


Figura 5.17: Resultados para a rocha P262\_K70: Queda da porosidade conectada em função de  $\sigma_r$  para representações de diferentes dimensões.

### 5.3.2 Resultados para a rocha P262\_K70 reconstruída com gt2

A simulação realizada a partir da representação reconstruída com a gaussiana truncada 2 apresentou resultados bem melhores do que os obtidos a partir da reconstrução realizada com a gaussiana truncada 1, como pode ser visto nas figuras 5.18 e 5.19 que apresentam curvas bem mais suaves. A melhora obtida deve-se ao aumento da resolução da representação, que permitiu que o diâmetro crítico fosse reproduzido com um erro de apenas 3  $\mu\text{m}$  ou 20%, com um comprimento equivalente a quatro *voxels*.

A rocha demonstrou maior sensibilidade à incrustação do tipo *pore-filling* a partir de  $\sigma_r = 0,15$ , quando as curvas de redução da porosidade conectada também passam a divergir. O brusco aumento da permeabilidade para a incrustação do tipo *pore-filling* para  $\sigma_r = 0,3$  deve-se ao fato de que a simulação foi realizada de maneira não-incremental (veja a seção 4.2.6).

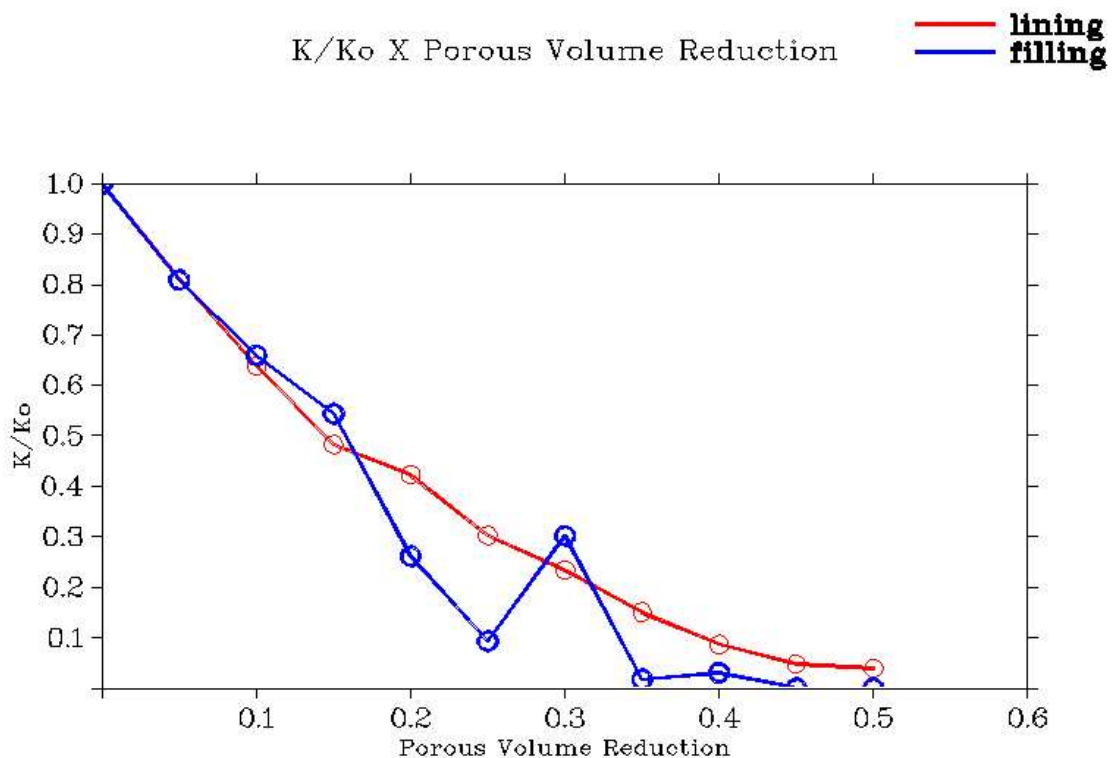


Figura 5.18: Resultados para a rocha P262\_K70 (gt2): Queda da permeabilidade em função de  $\sigma_r$ .

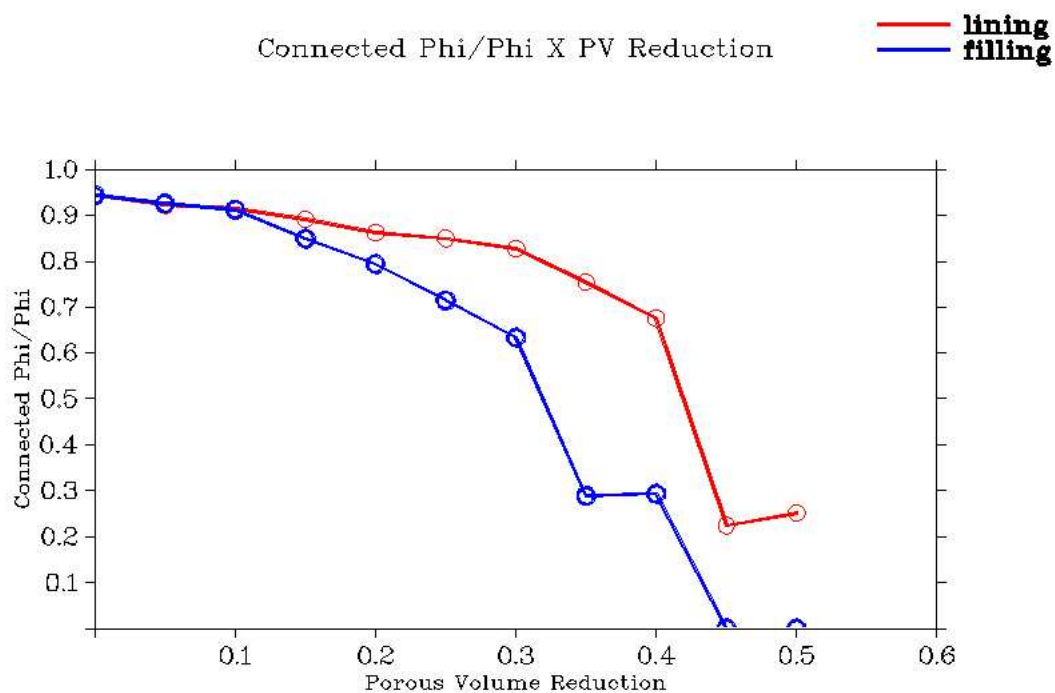


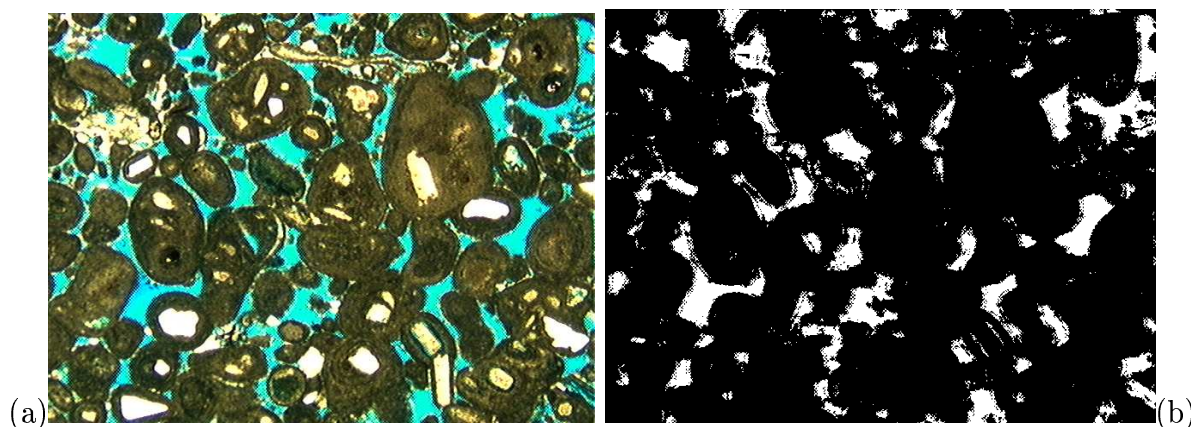
Figura 5.19: Resultados para a rocha P262\_K70 (gt2): Queda da porosidade conectada em função de  $\sigma_r$ .



## 5.4 Resultados para Rocha P262\_K441

Na figura 5.20.a é apresentada uma microfotografia de uma lâmina delgada da rocha P262\_K441 e em 5.20.b resultado da operação de binarização da imagem original. A permeabilidade experimental  $k_{exp}$  para amostra e a permeabilidade obtida com o método do grafo de conexão serial  $k_{GCS}$  para a representação tridimensional reconstruída são listadas na tabela 3.1. A reconstrução tridimensional foi realizada com o uso do método da gaussiana truncada e do método das esferas sobrepostas, dentre as várias representações obtidas a que apresentou o melhor ajuste com a rocha original foi gerada com a gaussiana truncada com  $n_{fa} = 5$ .

Figura 5.20: Imagem P262\_K441, colorida (a) e binarizada (b).



Os gráficos 5.21 e 5.22 apresentam o mesmo comportamento dos gráficos 5.15 e 5.16 para a rocha P262\_K70, indicando que a representação tridimensional da rocha P262\_K441 apresenta o mesmo problema de baixa resolução. O alto comprimento de  $\alpha_v$ , com  $30 \mu m$ , e a análise visual de seções transversais da representação tridimensional revelando a presença de uma grande maioria de poros com poucos voxels de diâmetro, confirmam o problema descrito na seção 4.2.5. Além disso, o diâmetro crítico da representação tridimensional é muito pequeno (equivalente a  $\alpha_v$ ) e o aumento da dimensão  $N$  da representação não resolve o problema da rápida queda da porosidade conectada, deixando claro que a representação possui uma resolução aquém da ideal. Portanto, os resultados para a rocha P262\_K441 figuram aqui apenas como um exemplo ilustrativo dos problemas associados à baixa resolução das representações tridimensionais e ao uso de um  $n_{fa}$  alto, devendo ser considerados com cautela.

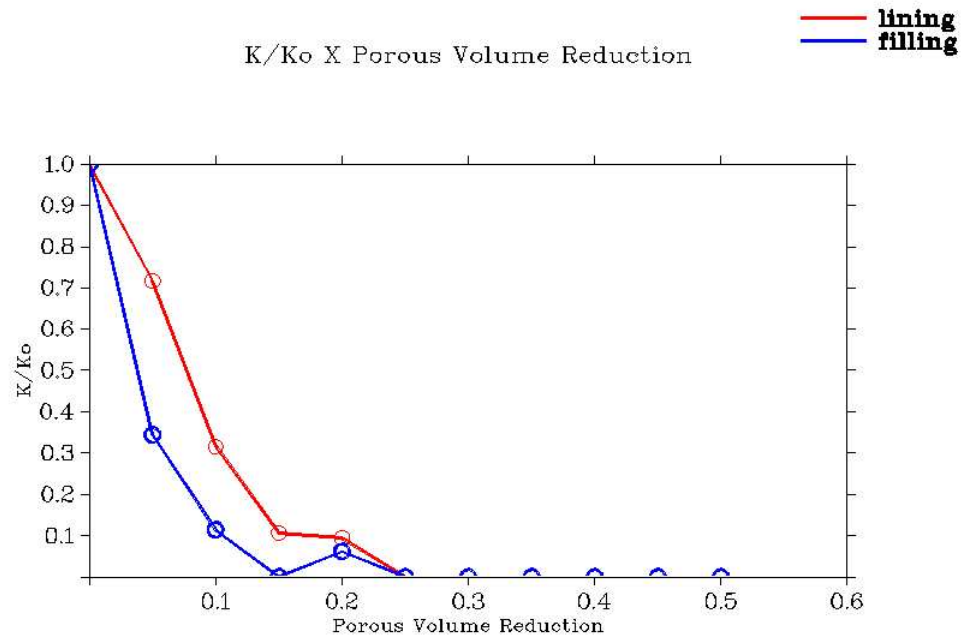


Figura 5.21: Resultados para a rocha P262\_K441: Queda da permeabilidade em função de  $\sigma_r$ .

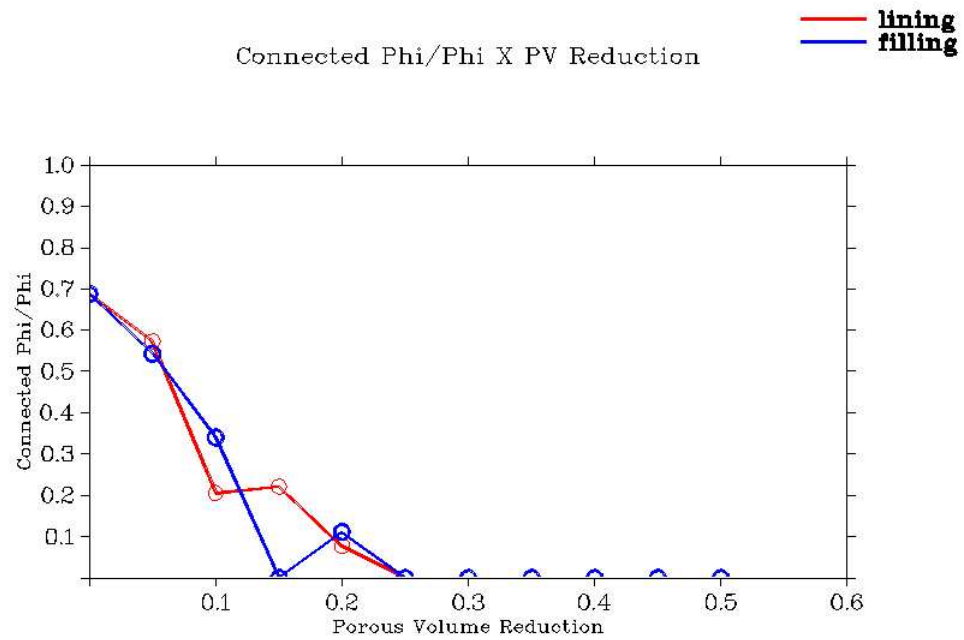


Figura 5.22: Resultados para a rocha P262\_K441: Queda da porosidade conectada em função de  $\sigma_r$ .

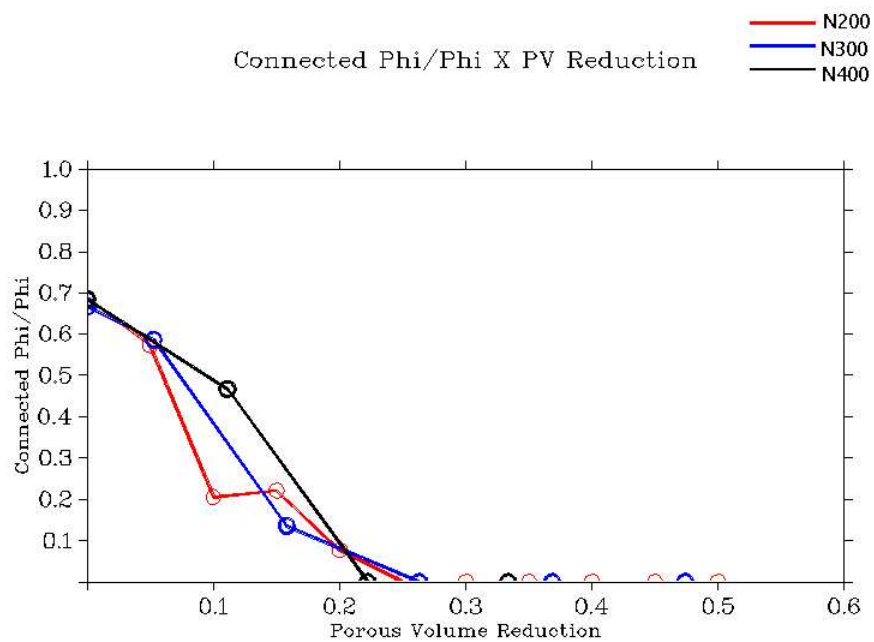
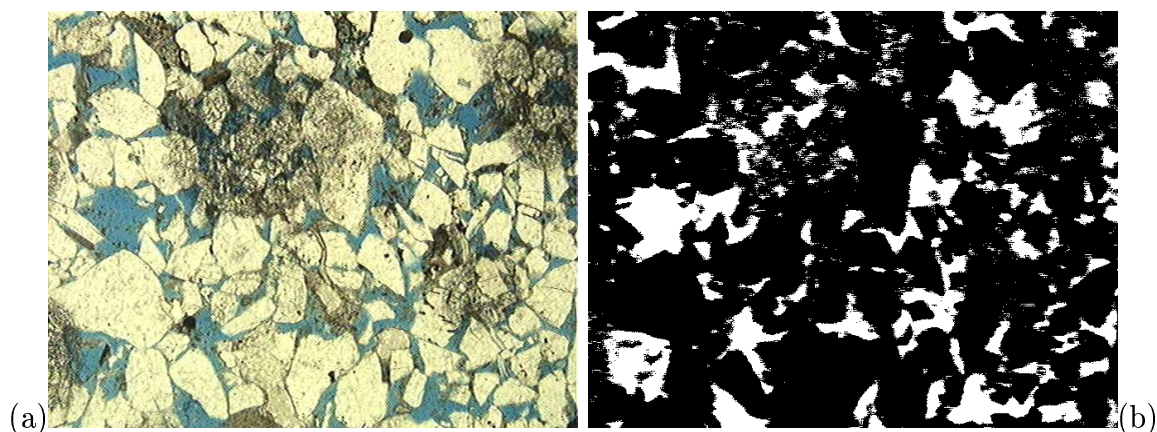


Figura 5.23: Resultados para a rocha P262\_K441: Queda da porosidade conectada em função de  $\sigma_r$  para representações de diferentes dimensões.

## 5.5 Resultados para Rocha P275\_K316

Na figura 5.24(a) é apresentada uma microfotografia de uma lâmina delgada da rocha P275\_K316 e em 5.24(b) resultado da operação de binarização da imagem original. A permeabilidade experimental  $k_{exp}$  para amostra e a permeabilidade obtida com o método do grafo de conexão serial  $k_{GCS}$  para a representação tridimensional reconstruída são listadas na tabela 3.1. A reconstrução tridimensional foi realizada com o uso do método da gaussiana truncada e do método das esferas sobrepostas, dentre as várias representações obtidas a que apresentou o melhor ajuste com a rocha original foi gerada com a gaussiana truncada 2 com  $n_{fa} = 2$ . Entre as representações obtidas com a gaussiana truncada 1 a que apresentou o melhor ajuste com a rocha original foi gerada com  $n_{fa} = 4$ , que será analisada para a realização de uma comparação com a representação obtida com a gaussiana truncada 2.

Figura 5.24: Imagem P275\_K316, colorida (a) e binarizada (b).



### 5.5.1 Resultados para a rocha P275\_K316 reconstruída com gt1

As curvas de queda de permeabilidade e de porosidade para a rocha P275\_K316 apresentadas nos gráficos 5.28 e 5.29, são extremamente estáveis e suaves, mostrando que a representação tridimensional da rocha possui uma resolução e dimensão suficientes para a realização de simulações de incrustação. Isto se deve em parte ao grande número de poros existentes nesta representação tridimensional, que a tornam mais representativa estatisticamente. A rocha P275\_K316 apresentou uma baixa sensibilidade ao algoritmo de incrustação *pore-filling*, o que também é consequência de uma grande população de poros altamente conectados, que acabam compensando o bloqueio de alguns poros através da formação de caminhos de fluxo alternativos.

Nas figuras 5.27.a, 5.27.b, 5.27.c e 5.27.d é possível perceber uma grande diferença morfológica entre as incrustações *pore-lining* e *pore-filling*. A incrustação *pore-lining* reduz os poros maiores e fragmenta poros menores e estreitamentos, enquanto a incrustação

*pore-filling* causa a diminuição de alguns poros e o bloqueio completo de outros, além da formação de um grande número de pequenos poros internos à fase incrustante. Apesar dos mecanismos de deposição serem bastante diferentes, as figuras 5.25 e 5.26 apresentam curvas semelhantes para os dois tipos de incrustação devido ao grande aumento percentual da área ocupada por pequenos poros, que ocorre tanto na incrustação *pore-filling* como na *pore-lining*.

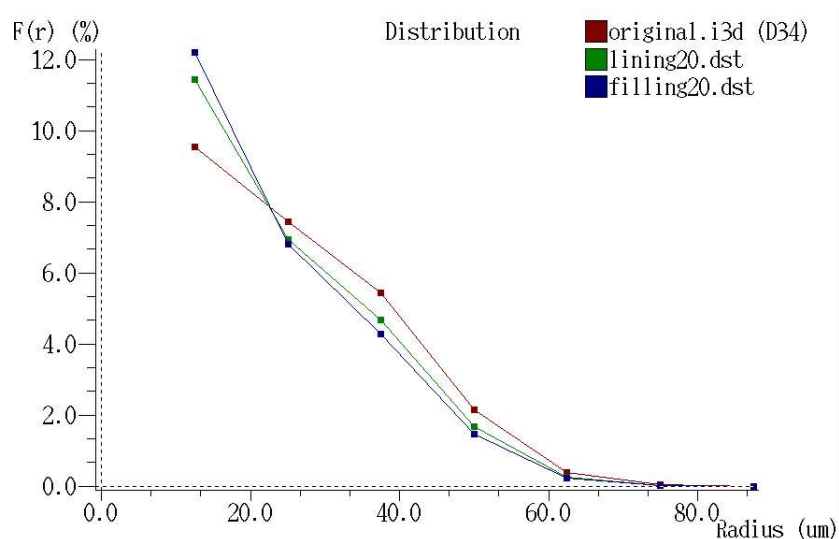


Figura 5.25: Resultados para a rocha P275\_K316: Distribuições de tamanho de poros para  $\sigma_r = 0.2$ .

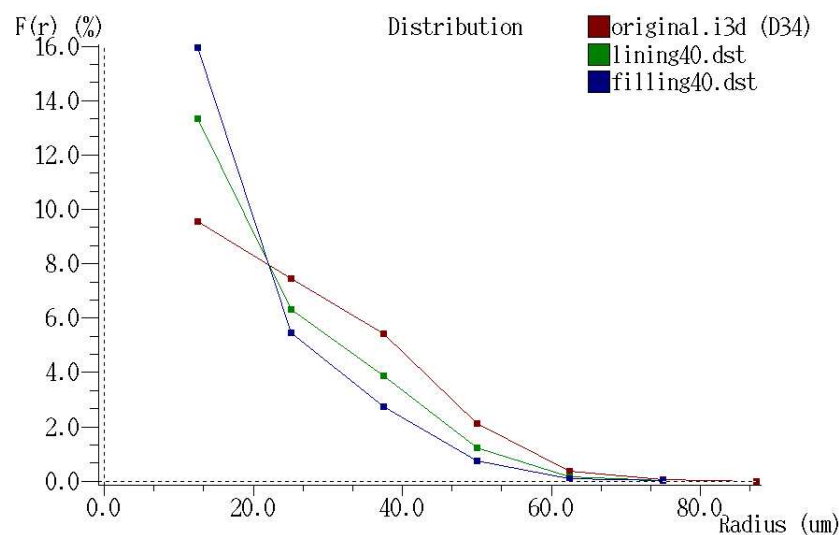


Figura 5.26: Resultados para a rocha P275\_K316: Distribuições de tamanho de poros para  $\sigma_r = 0.4$ .

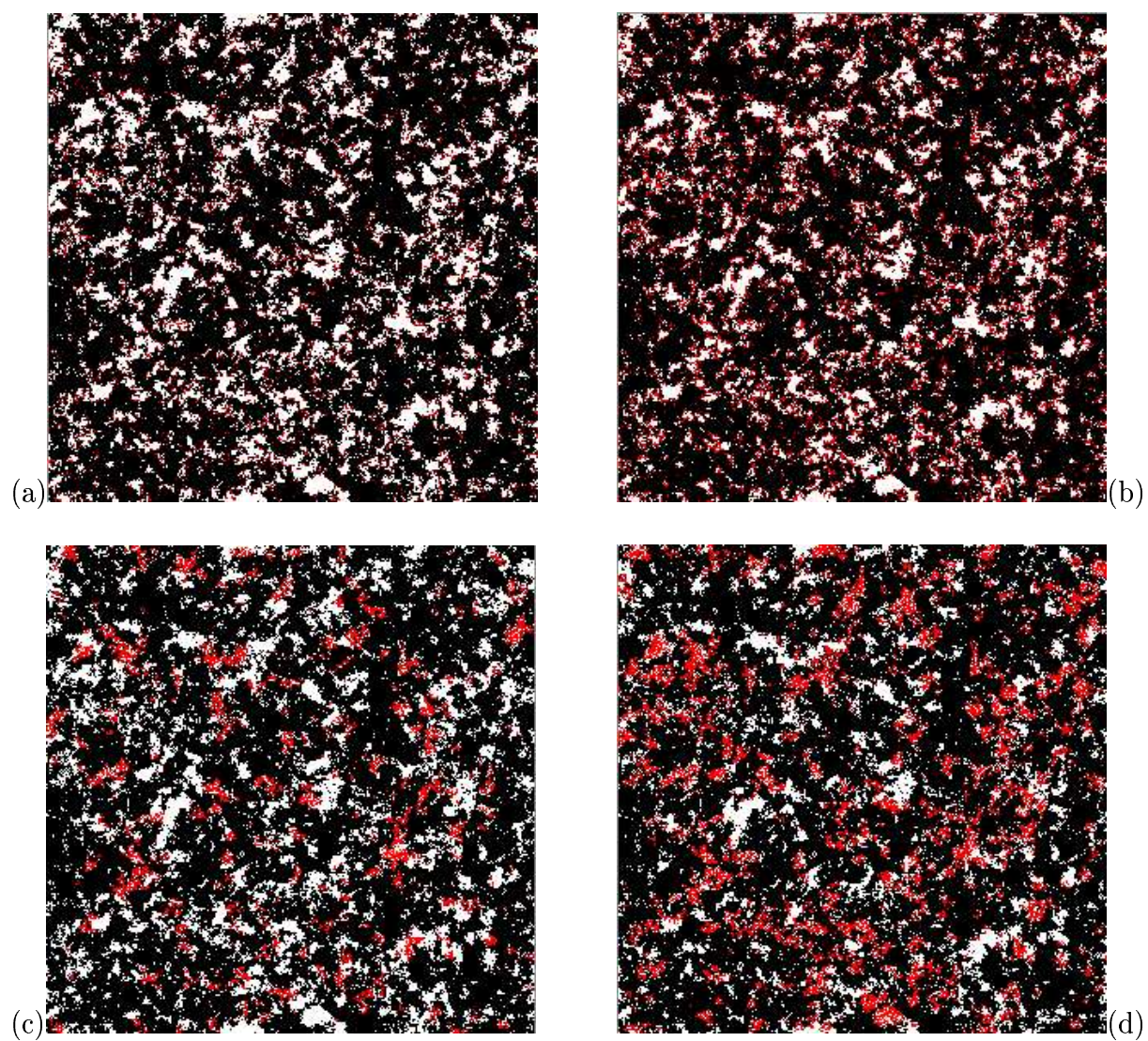


Figura 5.27: Seções seriais da rocha P275\_K316 (gt1): (a) incrustação *pore-lining* com  $\sigma_r = 0.2$ ; (b) incrustação *pore-lining* com  $\sigma_r = 0.4$ ; (c) incrustação *pore-filling* com  $\sigma_r = 0.2$ ; (d) incrustação *pore-filling* com  $\sigma_r = 0.4$ .

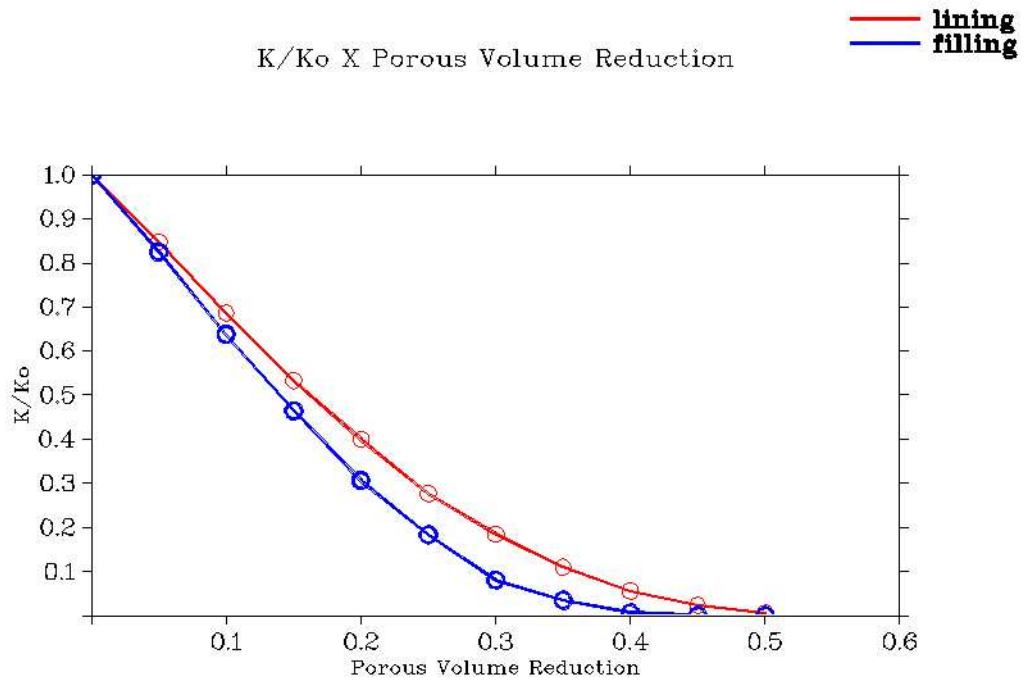


Figura 5.28: Resultados para a rocha P275\_K316 (gt1): Queda da permeabilidade em função de  $\sigma_r$ .

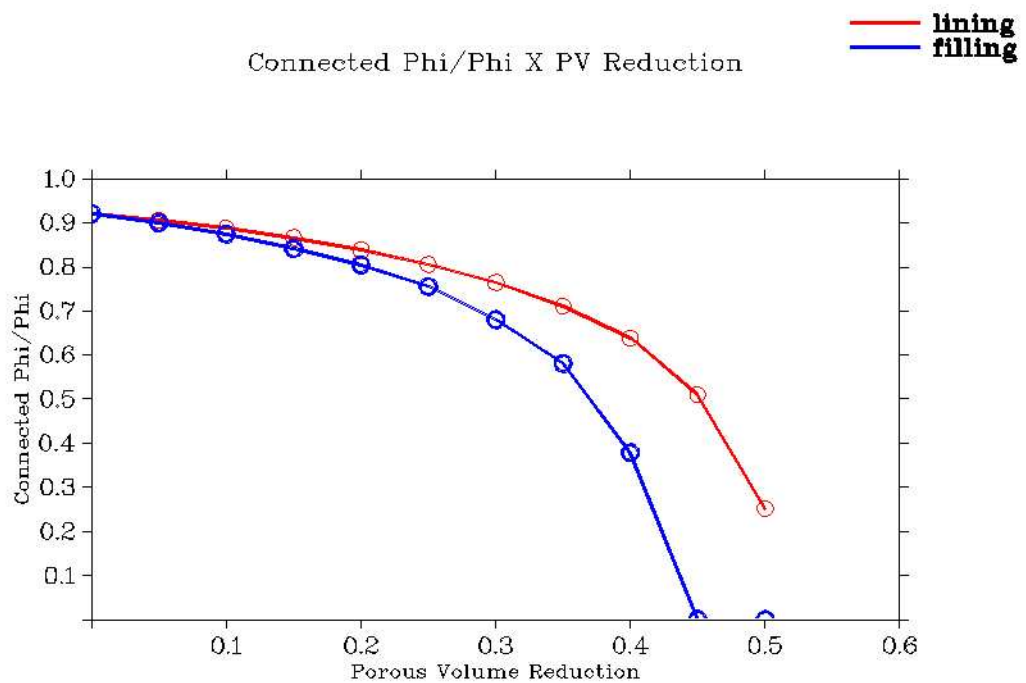


Figura 5.29: Resultados para a rocha P275\_K316 (gt1): Razão  $\phi_{c6}/\phi$  em função de  $\sigma_r$ .

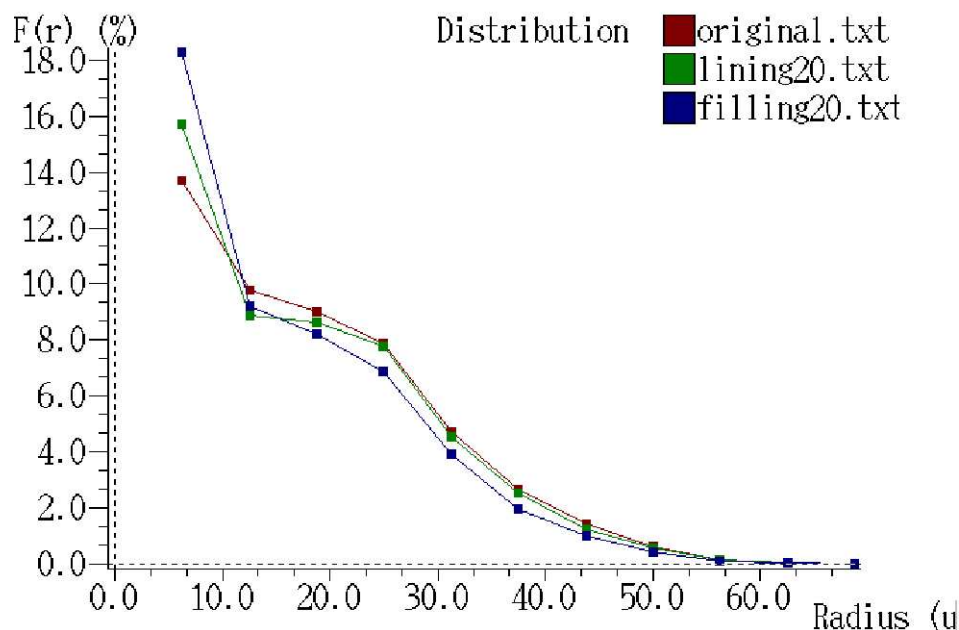


Figura 5.30: Resultados para a rocha P275\_K316 (gt2): Distribuições de tamanho de poros para  $\sigma_r = 0.2$ .

### 5.5.2 Resultados para a rocha P275\_K316 reconstruída com gt2

A simulação realizada para a representação P275\_K316 reconstruída com a gaussiana truncada 2 apresentou menor sensibilidade à incrustação do tipo *pore-lining*, mostrando que este tipo de incrustação tem seu efeito aumentado quando a resolução da imagem é insuficiente para reproduzir fielmente a morfologia dos poros (compare as figuras 5.27 e 5.32). O reflexo deste problema pode ser visto através de uma comparação entre as distribuições de tamanhos de poros e queda da porosidade conectada para as duas representações. Note que a figura 5.26 possui um volume proporcionalmente maior de poros pequenos do que a distribuição para a representação obtida com a gt2 mostrada na figura 5.30. A porosidade conectada também sofre uma redução menos acentuada para altos valores de  $\sigma_r$ , o que é uma consequência do aumento da resolução de acordo com a discussão realizada na seção 4.2.5.

As curvas para a queda da permeabilidade para a representação obtida com gt2, apresentadas nas figuras 5.34 e 5.35 são menos estáveis do que as curvas calculadas para a representação obtida com gt1, mostradas nas figuras 5.28 e 5.29, o que pode ser explicado pelo menor número de poros da representação obtida com gt2 (compare as figuras 5.27 e 5.32).



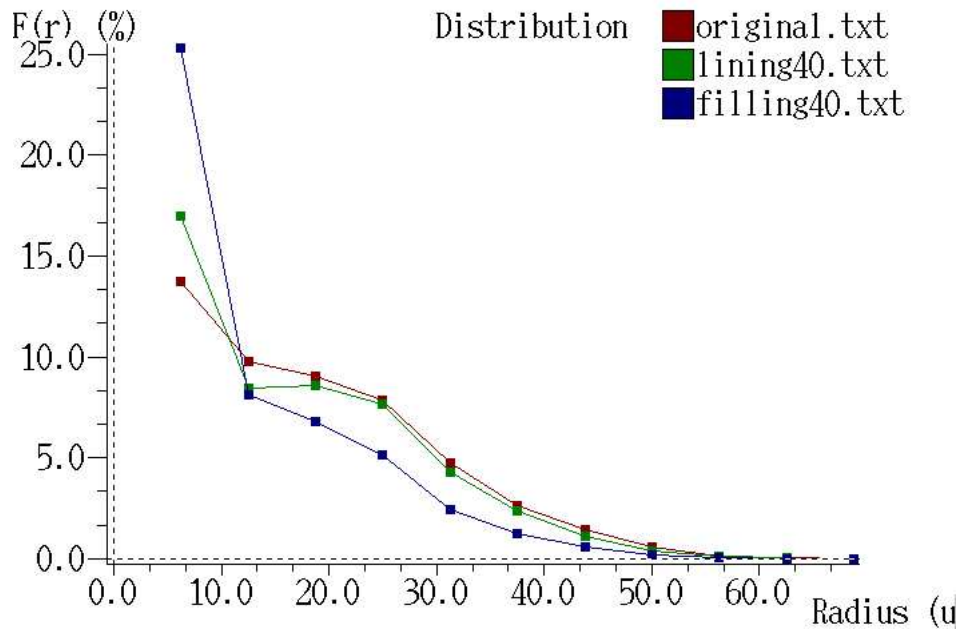


Figura 5.31: Resultados para a rocha P275\_K316 (gt2): Distribuições de tamanho de poros para  $\sigma_r = 0.4$ .

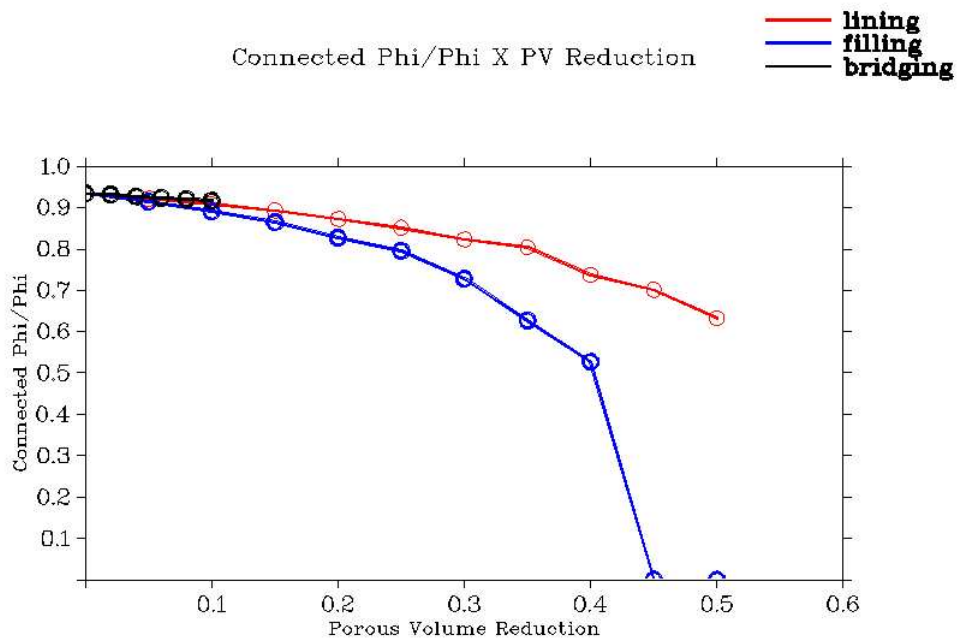


Figura 5.35: Resultados para a rocha P275\_K316 (gt2): Razão  $\phi_{c6}/\phi$  em função de  $\sigma_r$ .

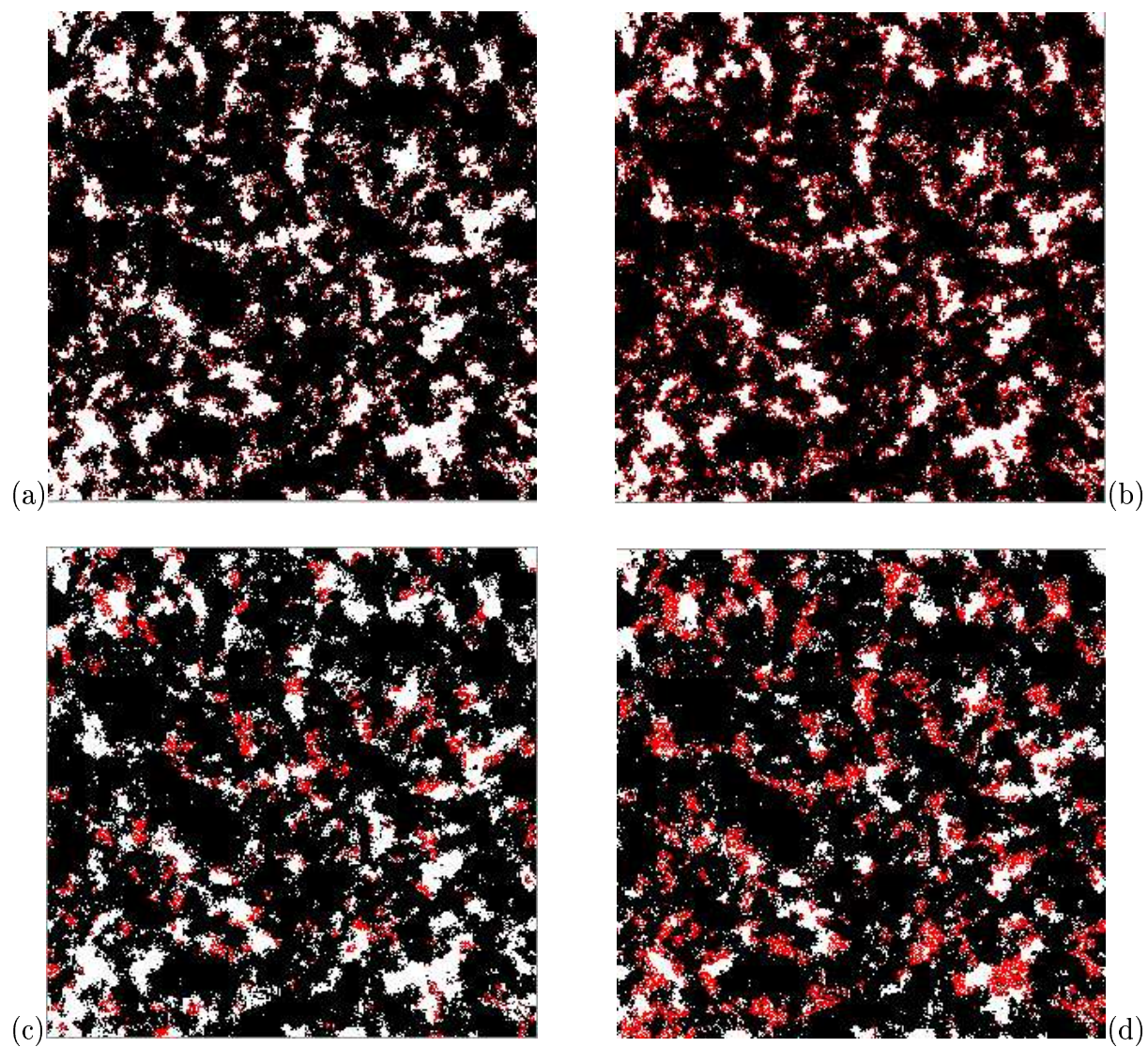


Figura 5.32: Seções seriais da rocha P275\_K316 (gt2): (a) incrustação *pore-lining* com  $\sigma_r = 0.2$ ; (b) incrustação *pore-lining* com  $\sigma_r = 0.4$ ; (c) incrustação *pore-filling* com  $\sigma_r = 0.2$ ; (d) incrustação *pore-filling* com  $\sigma_r = 0.4$ .

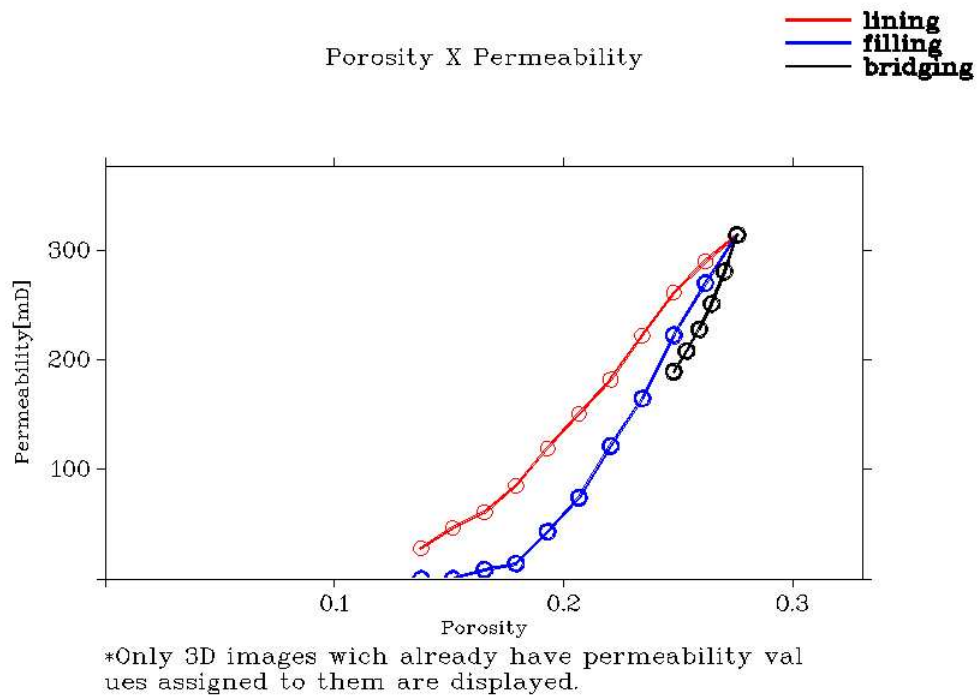


Figura 5.33: Resultados para a rocha P275\_K316 (gt2): Queda da permeabilidade em função de  $\sigma_r$ .

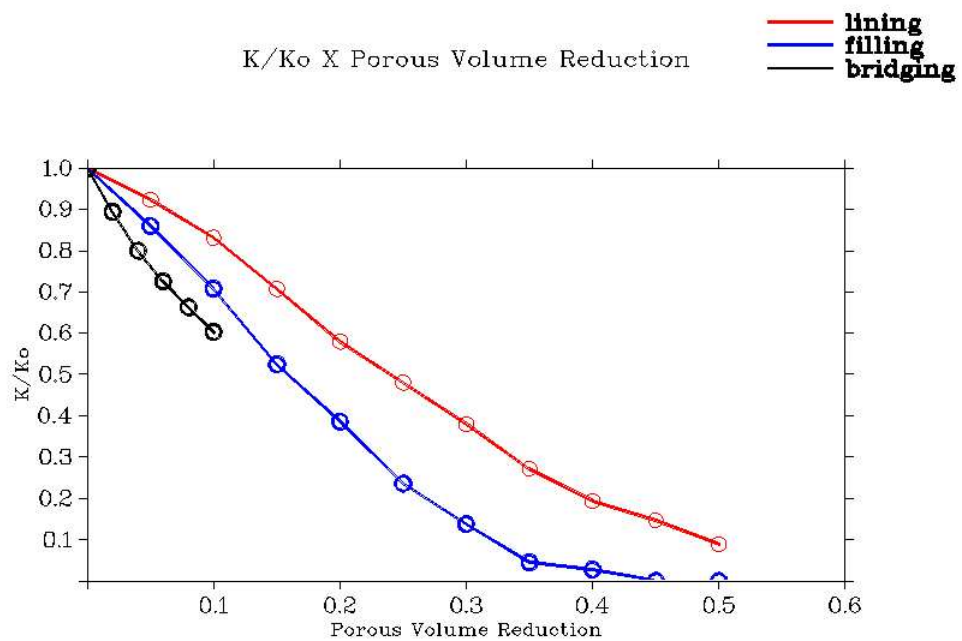
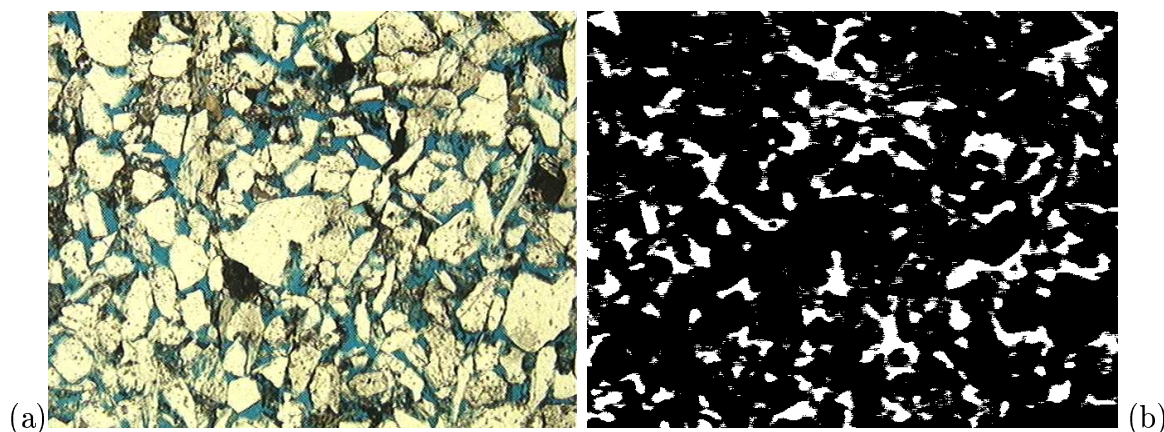


Figura 5.34: Resultados para a rocha P275\_K316 (gt2): Queda da permeabilidade em função de  $\sigma_r$ .

## 5.6 Resultados para Rocha P238\_K145

Na figura 5.36(a) é apresentada uma microfotografia de uma lâmina delgada da rocha P238\_K145 e em 5.36(b) resultado da operação de binarização da imagem original. A permeabilidade experimental  $k_{exp}$  para amostra e a permeabilidade obtida com o método do grafo de conexão serial  $k_{GCS}$  para a representação tridimensional reconstruída são listadas na tabela 3.1. A reconstrução tridimensional foi realizada com o uso do método da gaussiana truncada e do método das esferas sobrepostas, dentre as várias representações obtidas a que apresentou o melhor ajuste com a rocha original foi gerada com a gaussiana truncada com  $n_{fa} = 2$ .

Figura 5.36: Imagem P238\_K145, colorida (a) e binarizada (b).



Ao comparar os gráficos das figuras 5.3 e 5.38 e os gráficos das figuras 5.4 e 5.39, nota-se que a sensibilidade da rocha P238\_K145 à incrustação dendrítica é bem menor do que a demonstrada pela rocha Berea 500. Isto pode ser explicado pela distribuição de tamanhos de poros das duas rochas, uma vez que a rocha Berea 500 possui poros maiores e que sofrem um maior dano relativo ao serem fragmentados pelos dendritos. Outro fator contribuinte são os diferentes diâmetros dos braços dendríticos nas duas representações, apesar de ambas terem sido incrustadas com o mesmo diâmetro em voxels, o comprimento do voxel  $\alpha_v$  da rocha P238\_K145 é um pouco maior do que o da rocha Berea 500. O resultado é que as duas representações têm o mesmo volume relativo de incrustação, mas um número maior de dendritos é gerado para a rocha Berea 500. A distribuição de tamanho de poros para  $\sigma_r = 0,1$  apresentada na figura 5.40 mostra que a representação tridimensional da rocha P238\_K145 sem incrustação possui poucos poros maiores do que  $30 \mu m$  e que os poros de  $20 \mu m$  ou menos, onde se encontram as gargantas dos poros, foram preservados pela incrustação dendrítica.

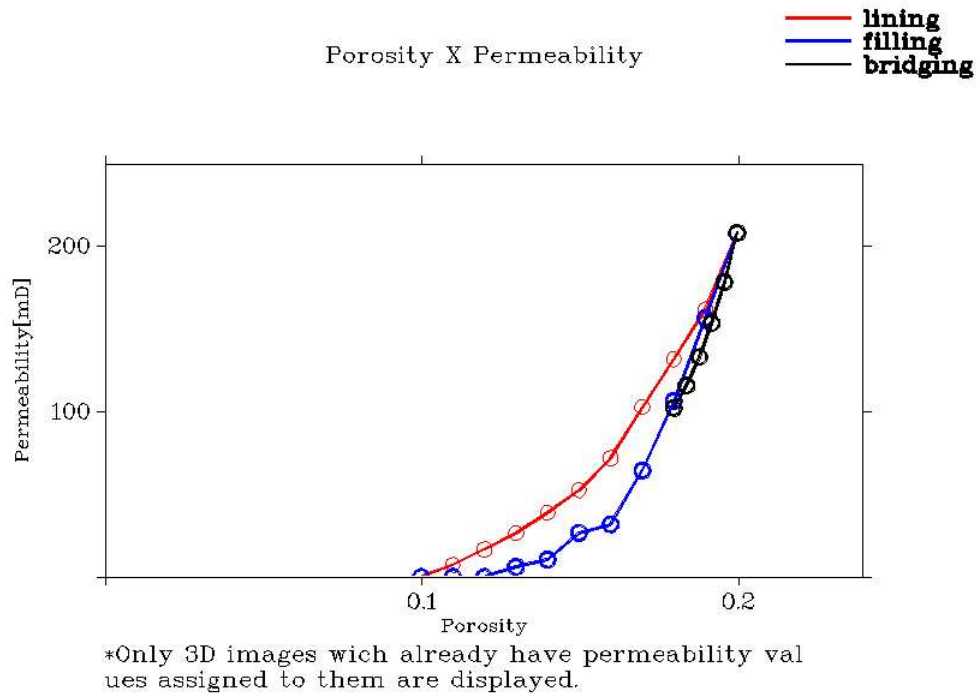


Figura 5.37: Resultados para a rocha P238\_K145: Queda de permeabilidade em função da queda da porosidade.

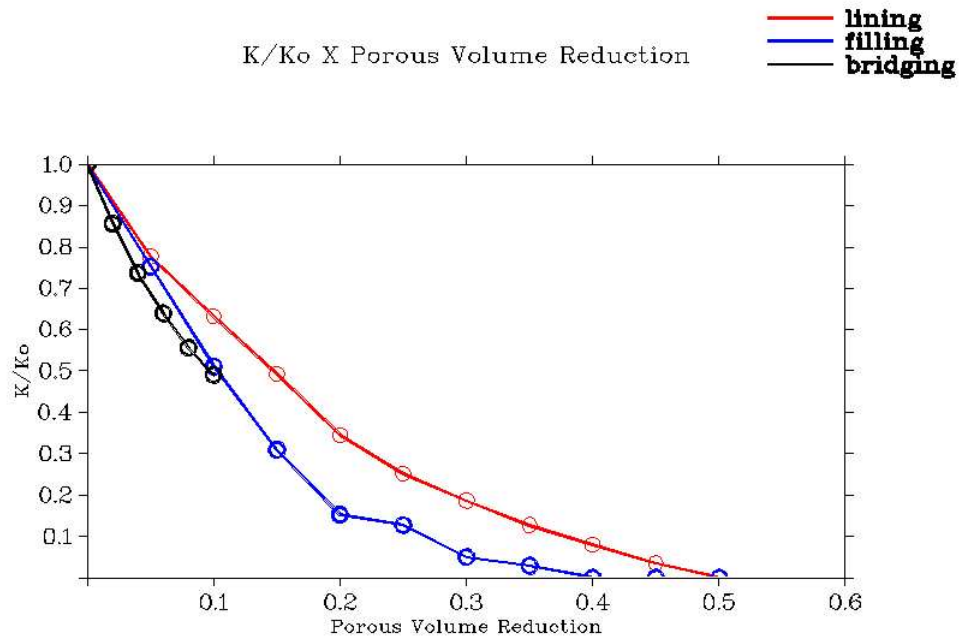


Figura 5.38: Resultados para a rocha P238\_K145: Queda da permeabilidade em função de  $\sigma_r$ .

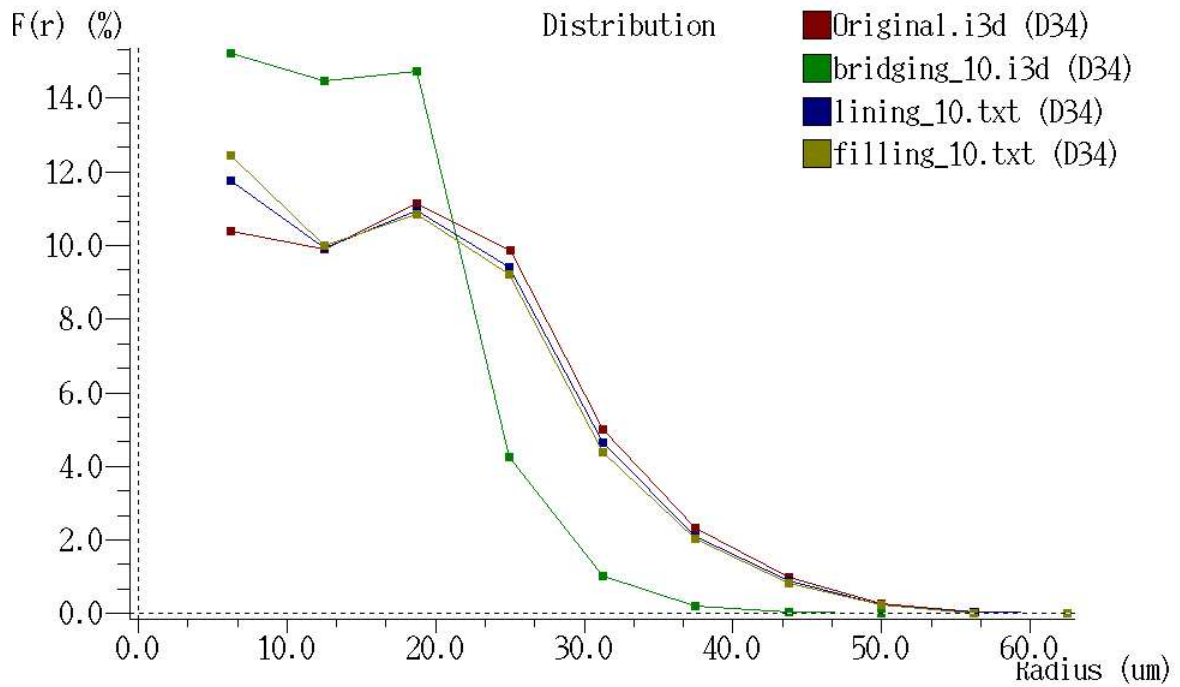


Figura 5.40: Resultados para a rocha P238\_K145: Distribuições de tamanho de poros para  $\sigma_r = 0, 1$ .

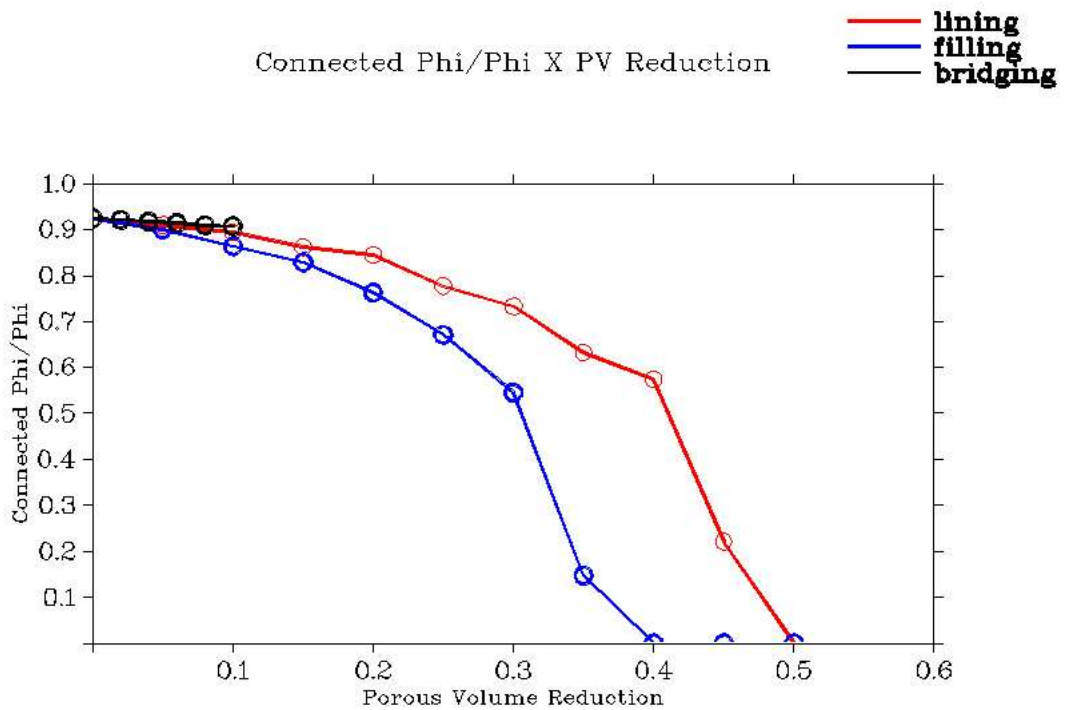
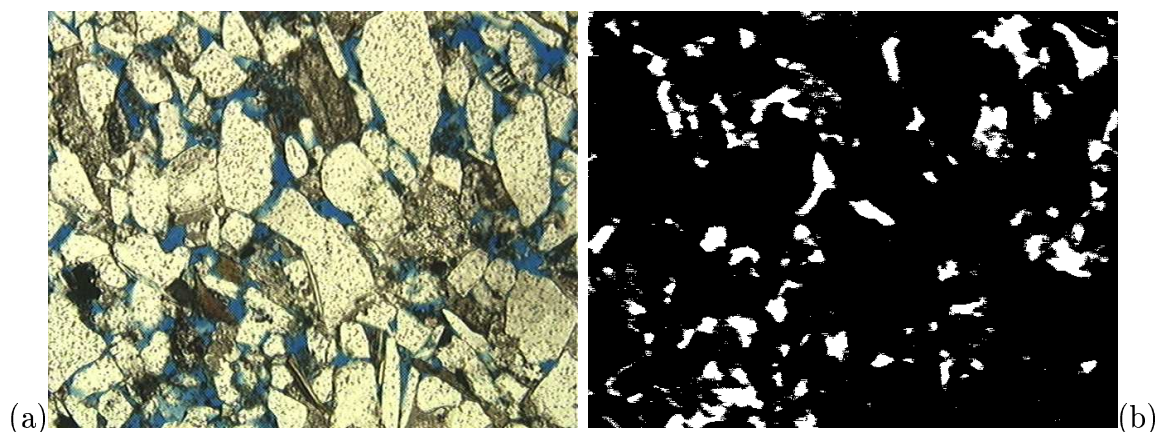


Figura 5.39: Resultados para a rocha P238\_K145: Razão  $\phi_{c6}/\phi$  em função de  $\sigma_r$ .

## 5.7 Resultados para Rocha P223\_K154

Na figura 5.41(a) é apresentada uma microfotografia de uma lâmina delgada da rocha P223\_K154 e em 5.41(b) resultado da operação de binarização da imagem original. A permeabilidade experimental  $k_{exp}$  para amostra e a permeabilidade obtida com o método do grafo de conexão serial  $k_{GCS}$  para a representação tridimensional reconstruída são listadas na tabela 3.1. A reconstrução tridimensional foi realizada com o uso do método da gaussiana truncada e do método das esferas sobrepostas, dentre as várias representações obtidas a que apresentou o melhor ajuste com a rocha original foi gerada com esferas sobrepostas com fator de amplificação  $n_{fa} = 1$ .

Figura 5.41: Imagem P223\_K154, colorida (a) e binarizada (b).



Apesar de apresentar uma porosidade de 22.3%, a representação da rocha P223\_K154 tem quase todo seu espaço poroso conectado. Como foi mencionado na seção 2.2.2, uma das vantagens do método de reconstrução das esferas sobrepostas é a preservação da porosidade conectada. Esta propriedade parece persistir durante todos os passos da simulação de incrustação, como podemos observar no gráfico da figura 5.43, onde o valor de  $\sigma_r$  crítico para a incrustação do tipo *pore-filling* é de 50%, um valor relativamente alto para uma rocha com uma porosidade inicial de 22.3%.

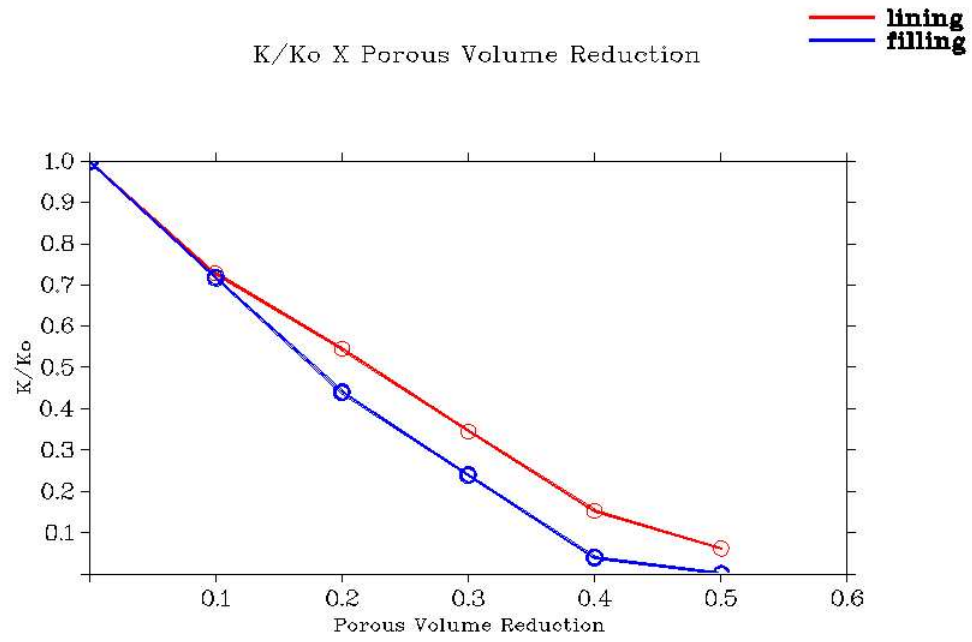


Figura 5.42: Resultados para a rocha P223\_K154: Queda da permeabilidade em função de  $\sigma_r$ .

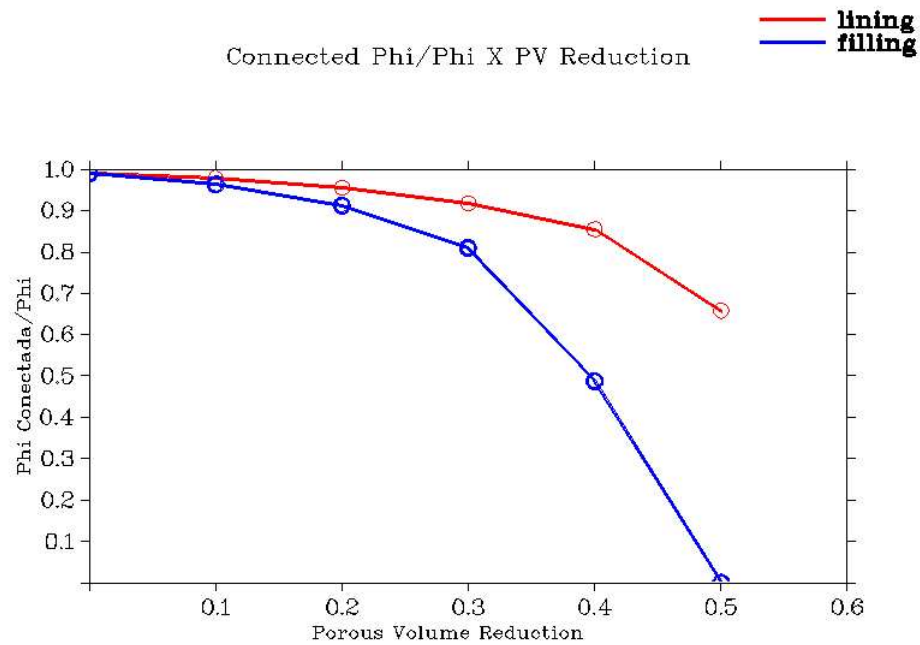


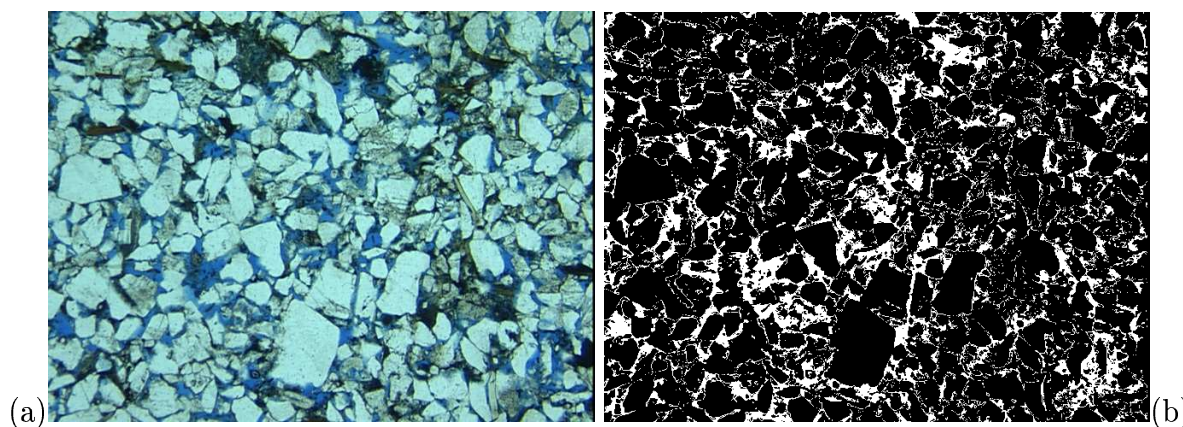
Figura 5.43: Resultados para a rocha P223\_K154: Razão  $\phi_{c6}/\phi$  em função de  $\sigma_r$ .



## 5.8 Resultados para Rocha P240\_K104

Na figura 5.44(a) é apresentada uma microfotografia de uma lâmina delgada da rocha P240\_K104 e em 5.44(b) resultado da operação de binarização da imagem original. A permeabilidade experimental  $k_{exp}$  para amostra e a permeabilidade obtida com o método do grafo de conexão serial  $k_{GCS}$  para a representação tridimensional reconstruída são listadas na tabela 3.1. A reconstrução tridimensional foi realizada com o uso do método da gaussiana truncada e do método das esferas sobrepostas, dentre as várias representações obtidas a que apresentou o melhor ajuste com a rocha original foi gerada com esferas sobrepostas com fator de amplificação  $n_{fa} = 1$ .

Figura 5.44: Imagem P240\_K104 , colorida (a) e binarizada (b).



As simulações para a rocha P240\_K104 apresentam um comportamento semelhante ao observado para a rocha P223\_K154, preservando a porosidade conectada durante vários passos da simulação, o que pode ser explicado pelo uso do mesmo método de reconstrução tridimensional para a geração das duas representações. Apesar de apenas duas rochas reconstruídas com o método das esferas sobrepostas terem sido analisadas, os resultados indicam que as representações reconstruídas pelo método tendem a preservar a porosidade conectada mesmo para os valores de  $\sigma_r$ .

A rocha P240\_K104 apresentou menos sensibilidade à incrustação do tipo *pore-filling* do que a rocha P223\_K154, o que pode ser explicado pela maior conectividade da rocha P240\_K104. A rocha também demonstrou uma baixa sensibilidade à incrustação do tipo dendrítico, causada por diversos fatores, como o pequeno tamanho das gargantas e poros e a alta superfície específica apresentada pelos poros.

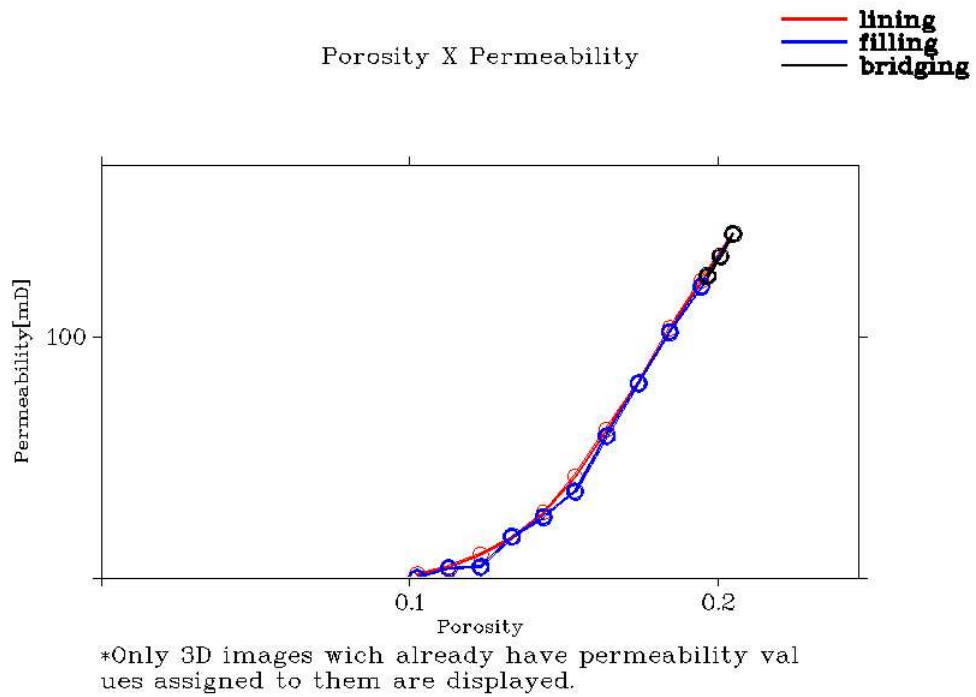


Figura 5.45: Resultados para a rocha P240\_K104: Queda de permeabilidade em função da queda da porosidade.

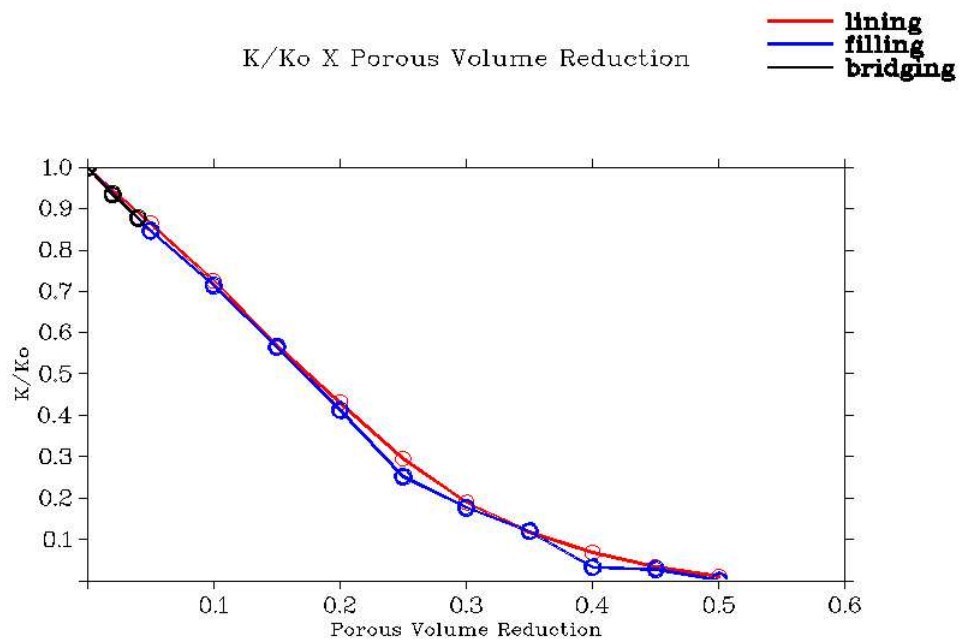


Figura 5.46: Resultados para a rocha P240\_K104: Queda da permeabilidade em função de  $\sigma_r$ .

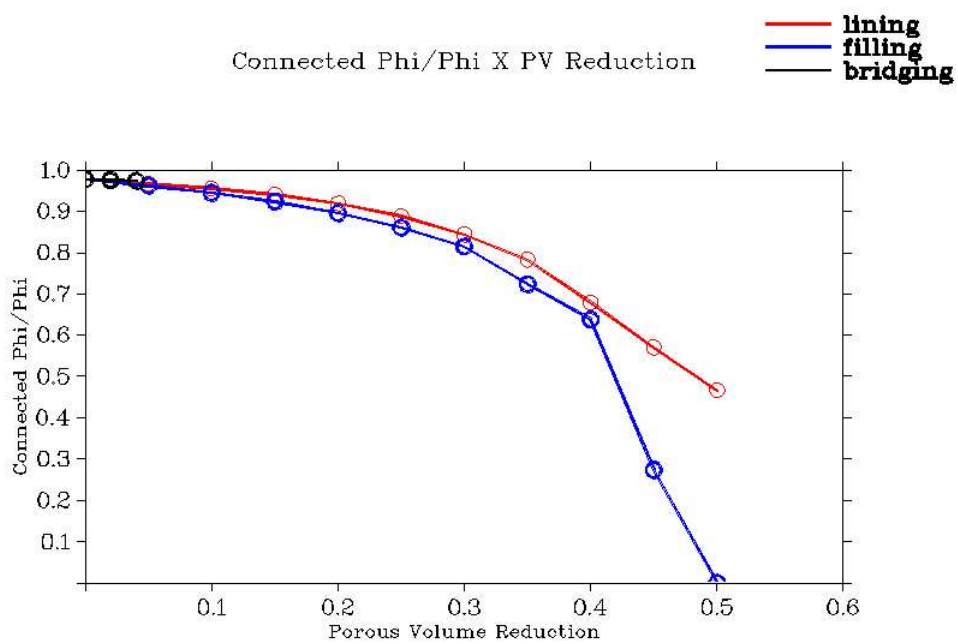


Figura 5.47: Resultados para a rocha P240\_K104: Razão  $\phi_{c6}/\phi$  em função de  $\sigma_r$ .

## 5.9 Resultados para Rocha Berea 200

Na figura 5.48.a é apresentada uma microfotografia de uma lâmina delgada da rocha Berea 200 e em 5.48.b resultado da operação de binarização da imagem original. A permeabilidade experimental  $k_{exp}$  para amostra e a permeabilidade obtida com o método do grafo de conexão serial  $k_{GCS}$  para a representação tridimensional reconstruída são listadas na tabela 3.1. A reconstrução tridimensional foi realizada com o uso do método da gaussiana truncada e do método das esferas sobrepostas, dentre as várias representações obtidas a que apresentou o melhor ajuste com a rocha original foi gerada com a gaussiana truncada com  $n_{fa} = 2$ .

Figura 5.48: Imagem Berea 200, colorida (a) e binarizada (b).

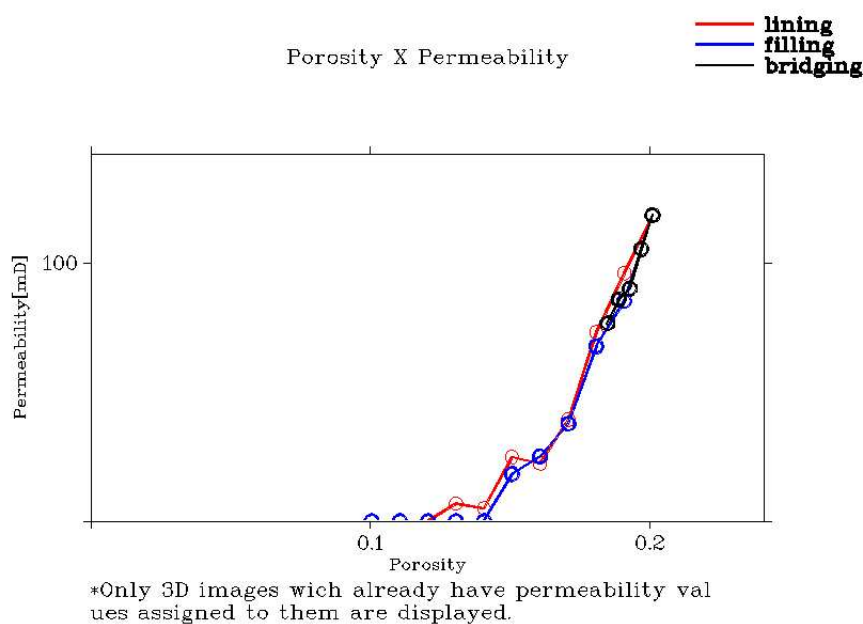
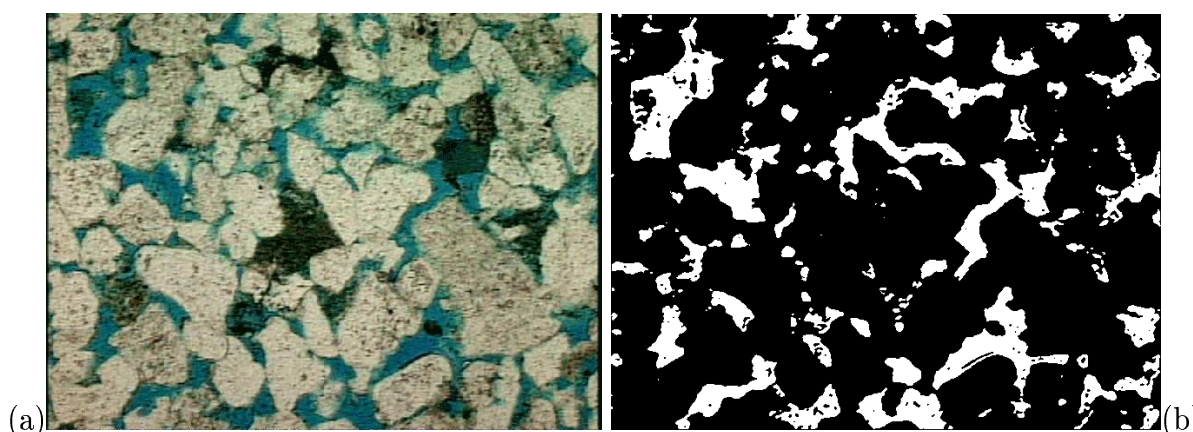


Figura 5.49: Resultados para a rocha Berea 200: Queda de permeabilidade em função da queda da porosidade.

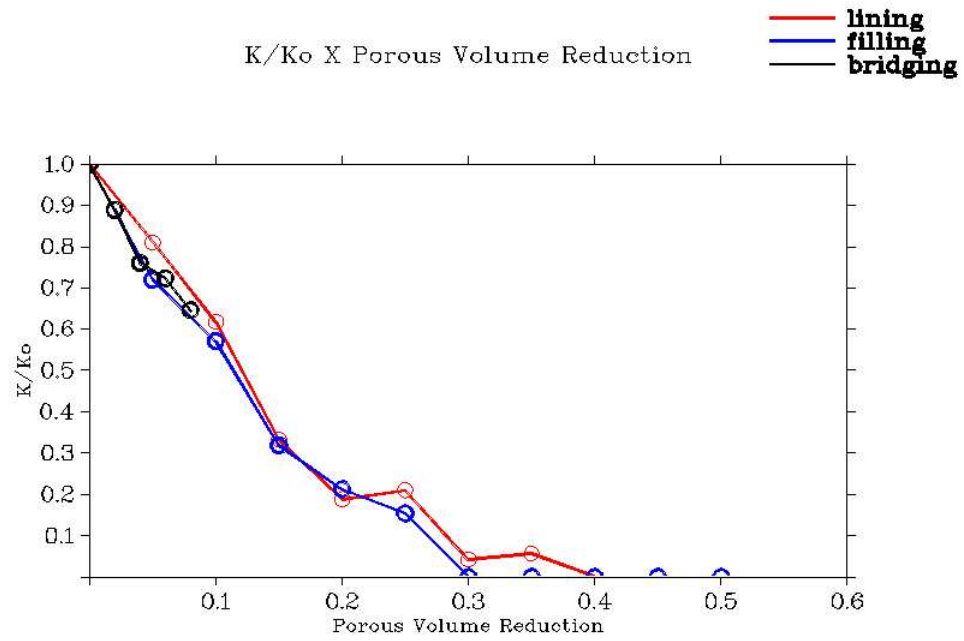


Figura 5.50: Resultados para a rocha Berea 200: Queda da permeabilidade em função de  $\sigma_r$ .

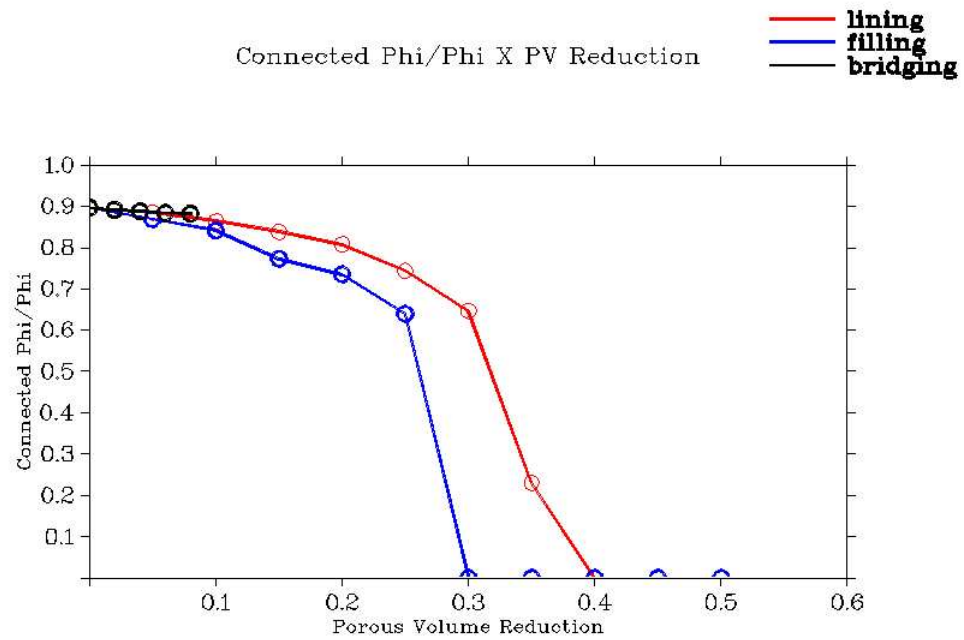


Figura 5.51: Resultados para a rocha Berea 200: Razão  $\phi_{c6}/\phi$  em função de  $\sigma_r$ .

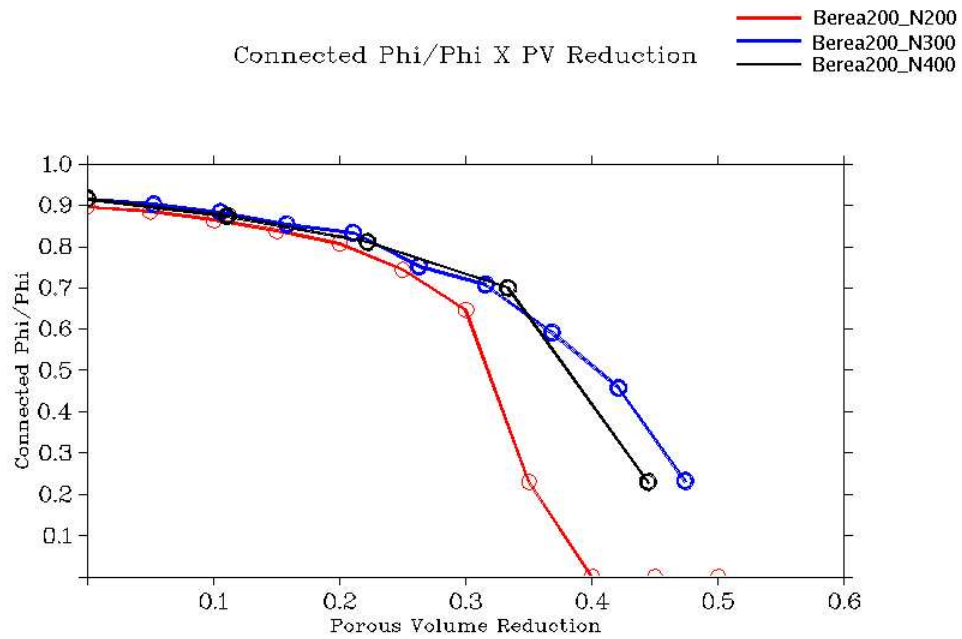


Figura 5.52: Resultados para a rocha Berea 200 para representações de diferentes dimensões incrustadas pelo modelo *pore-filling*. Queda da porosidade conectada em função de  $\sigma_r$ .

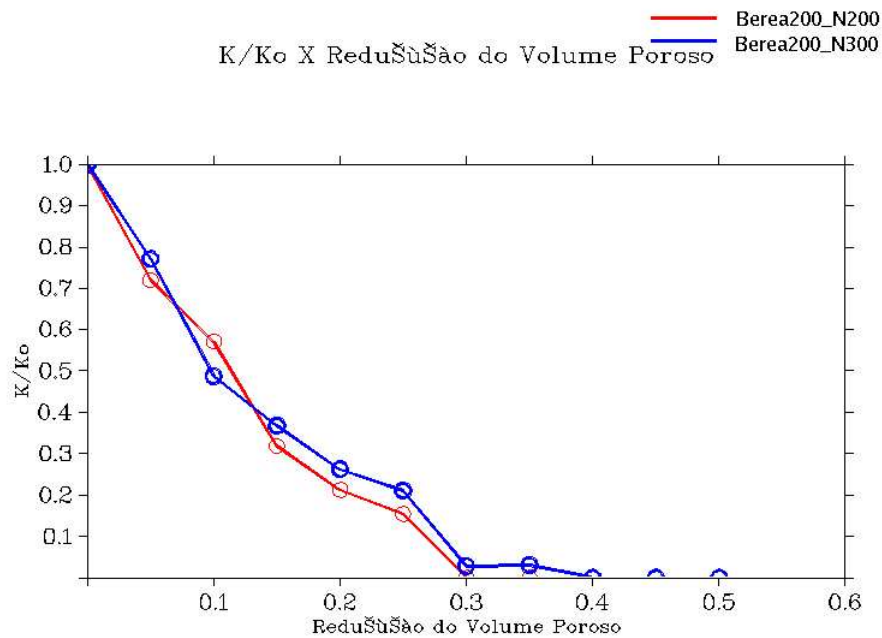


Figura 5.53: Resultados para a rocha Berea 200 para representações de diferentes dimensões incrustadas pelo modelo *pore-filling*: Queda da permeabilidade em função de  $\sigma_r$ .

### 5.10 Resultados para o Modelo *Pore-Lining*

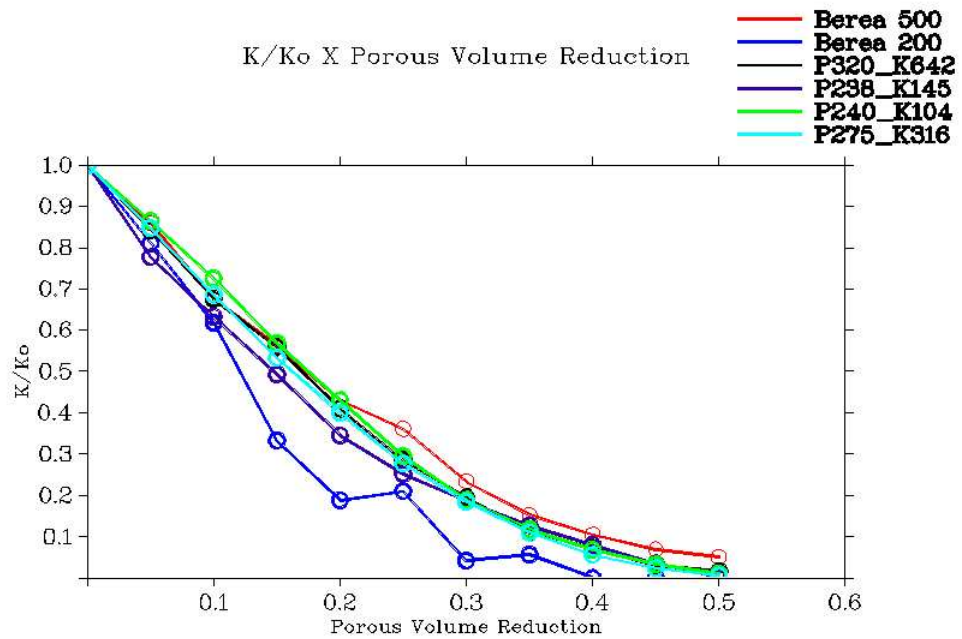


Figura 5.54: Resultados para o modelo *pore-lining*: Queda da permeabilidade em função de  $\sigma_r$ .

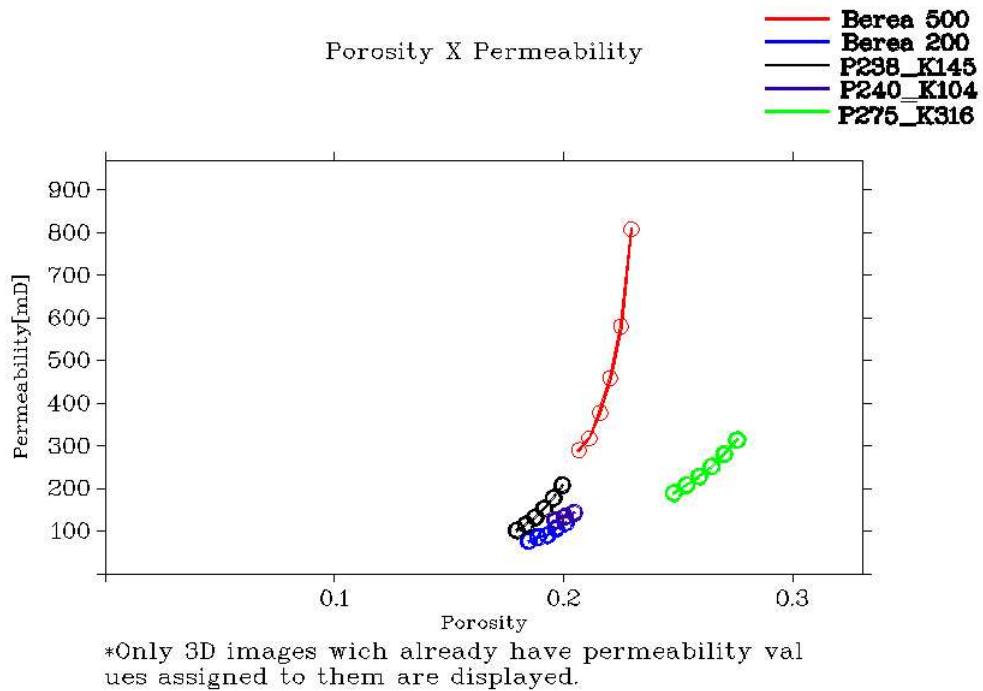


Figura 5.55: Resultados para o modelo *pore-lining*: Queda de permeabilidade em função da queda da porosidade.

### 5.11 Resultados para o Modelo *Pore-Filling*

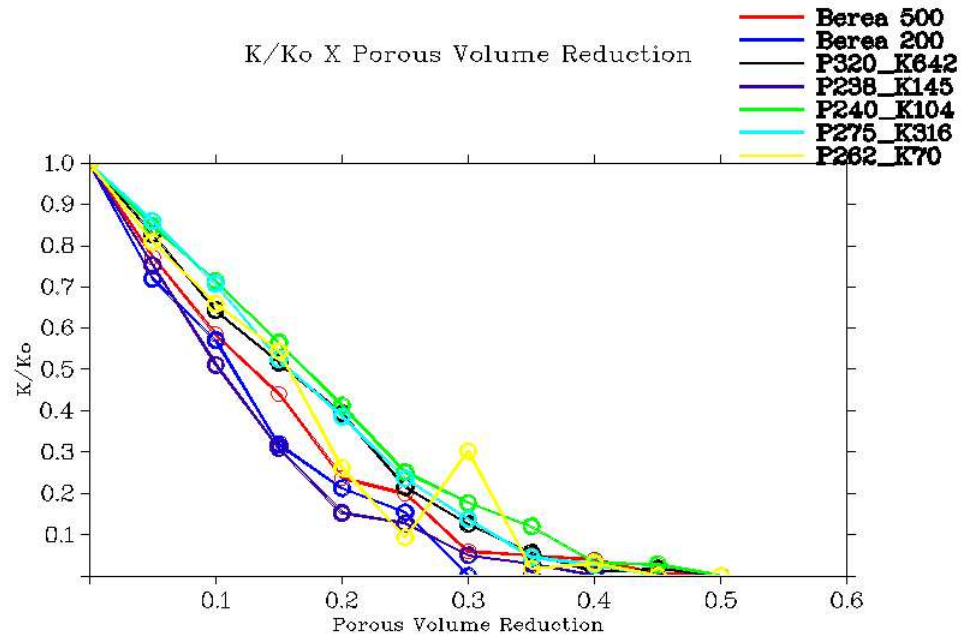


Figura 5.56: Resultados para o modelo *pore-filling*: Queda da permeabilidade em função de  $\sigma_r$ .

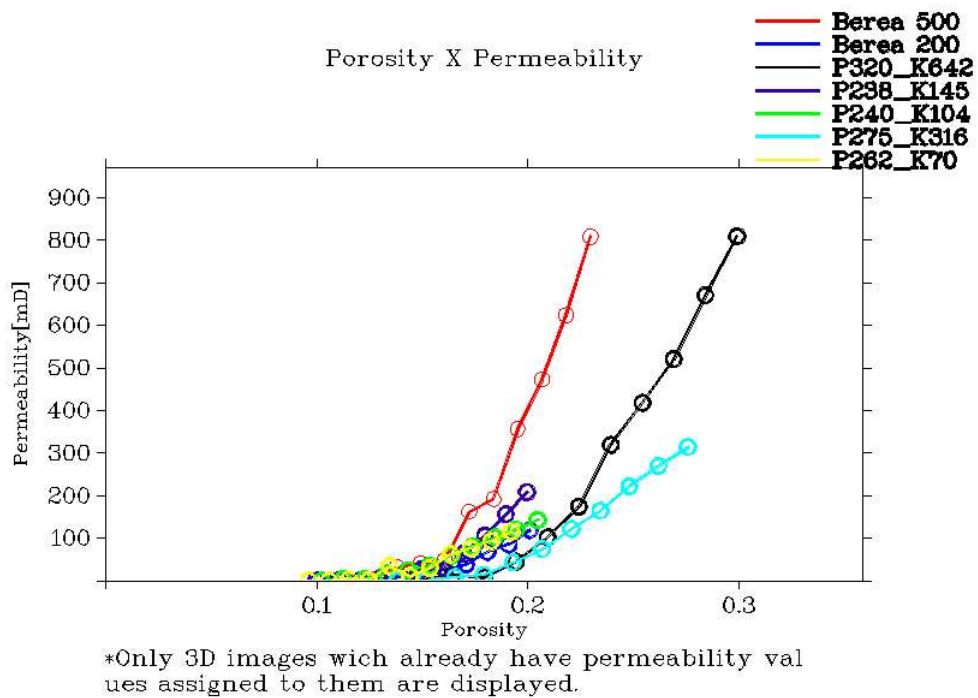


Figura 5.57: Resultados para o modelo *pore-filling*: Queda de permeabilidade em função da queda da porosidade.



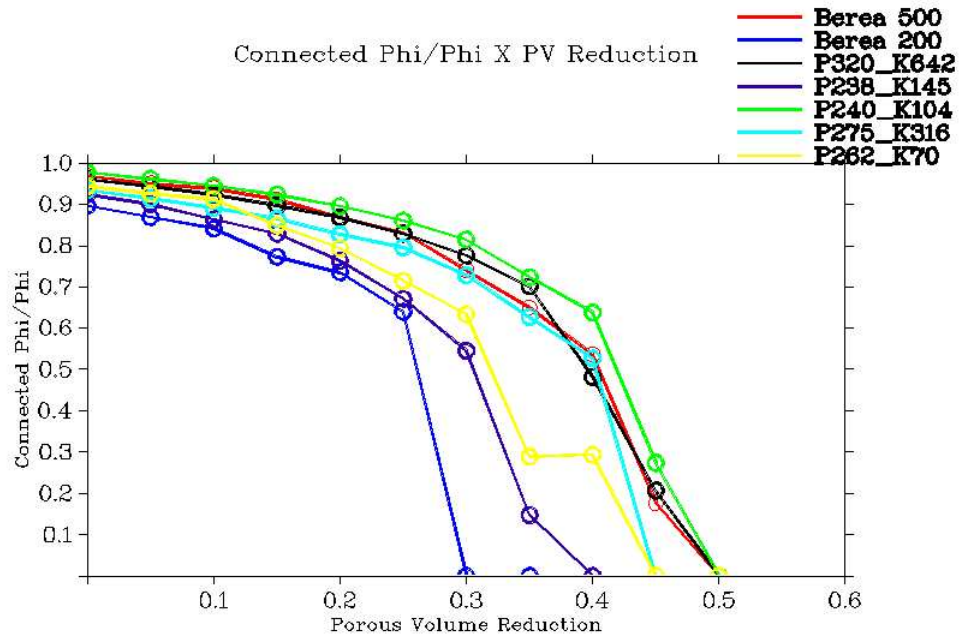


Figura 5.58: Resultados para o modelo *pore-filling*: Razão  $\phi_{c6}/\phi$  em função de  $\sigma_r$ .

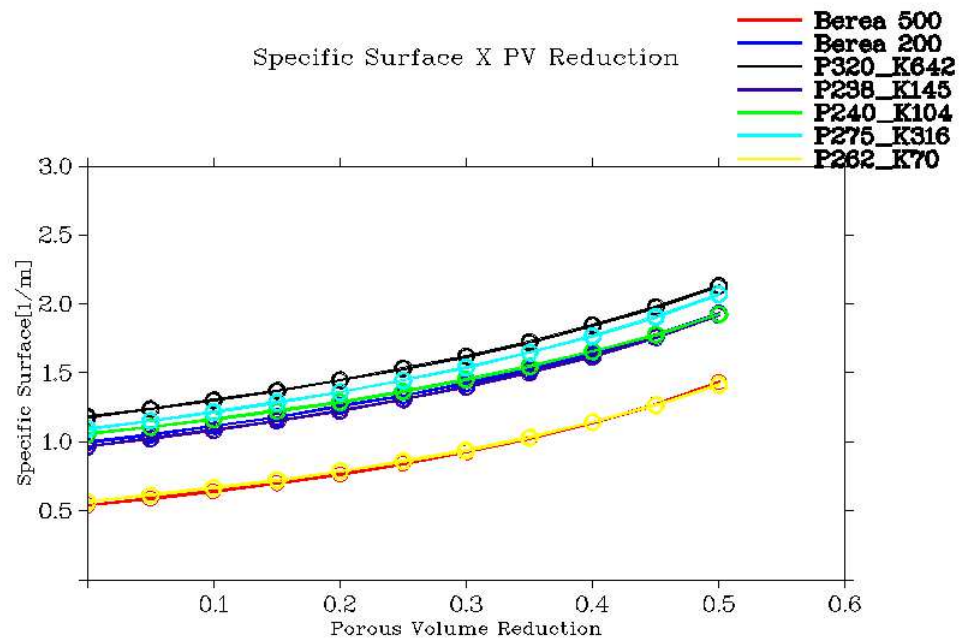


Figura 5.59: Resultados para o modelo *pore-filling*: Superfície específica  $S_v$  em função de  $\sigma_r$ .

## 5.12 Resultados para o Modelo Dendrítico

O impacto da incrustação do tipo dendrítico está diretamente relacionado com a distribuição de tamanho de poros das representações analisadas. Como podemos ver na figura 5.60 a rocha Berea 500 sofre a maior redução da permeabilidade, enquanto a rocha P223\_K104 apresenta a menor redução. A explicação para estes resultados é encontrada na figura 5.62 que mostra a distribuição de tamanho de poros para as rochas analisadas, onde podemos observar que a rocha Berea 500 tem a maior proporção de volume ocupado por poros grandes (maiores do que  $40 \mu m$ ), ao passo que a rocha P223\_K104 tem um volume pequeno ocupado por poros grandes. Portanto, rochas que têm a sua permeabilidade determinada por poros grandes sofrem um maior impacto com a fragmentação do espaço poroso que resulta da incrustação dendrítica.

Para simulações realizadas para as rochas Berea 500 e P275\_K316 com  $d_d = 2 \text{ voxels}$  ( $d_d = 5,12 \mu m$  para Berea 500 e  $d_d = 6,25 \mu m$  para P275\_K316) e  $e_d$  variando entre  $15 \mu m$  e  $25 \mu m$ , a redução da permeabilidade não apresentou uma dependência forte do valor do tamanho dos dendritos  $e_d$  como podemos ver nas figuras 5.63 e 5.64, apesar da grande diferença da morfologia da fase incrustante que pode ser observada na figura 5.65. Observe na figura 5.65 que para um mesmo volume incrustado  $\sigma_r = 0,1$ , o volume atingido pelos dendritos apresenta uma relação direta com o valor de  $e_d$ . Este parâmetro também determina o volume máximo que pode ser incrustado (equação 4.14).

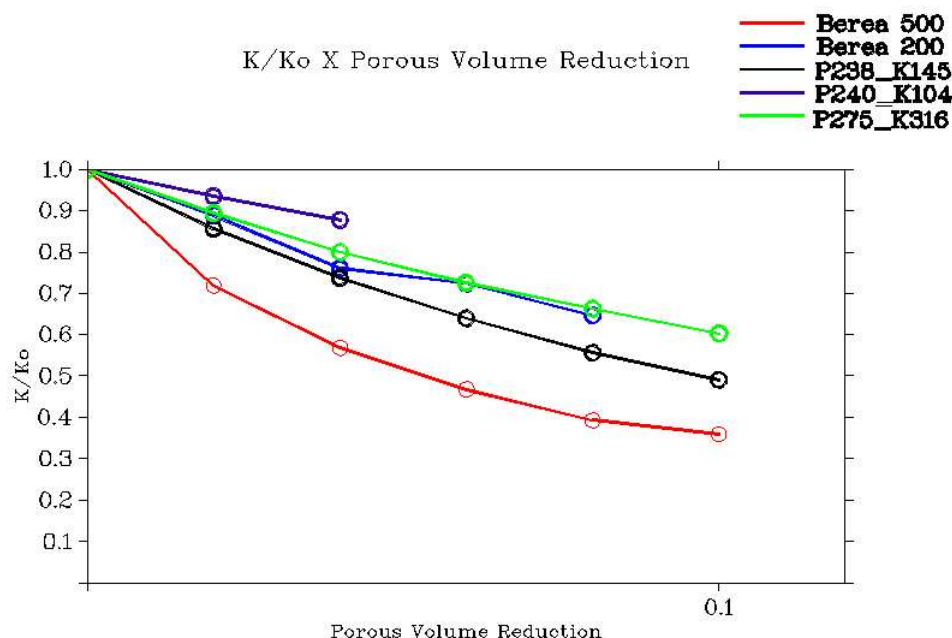


Figura 5.60: Resultados para o modelo dendrítico: Queda da permeabilidade em função de  $\sigma_r$ .

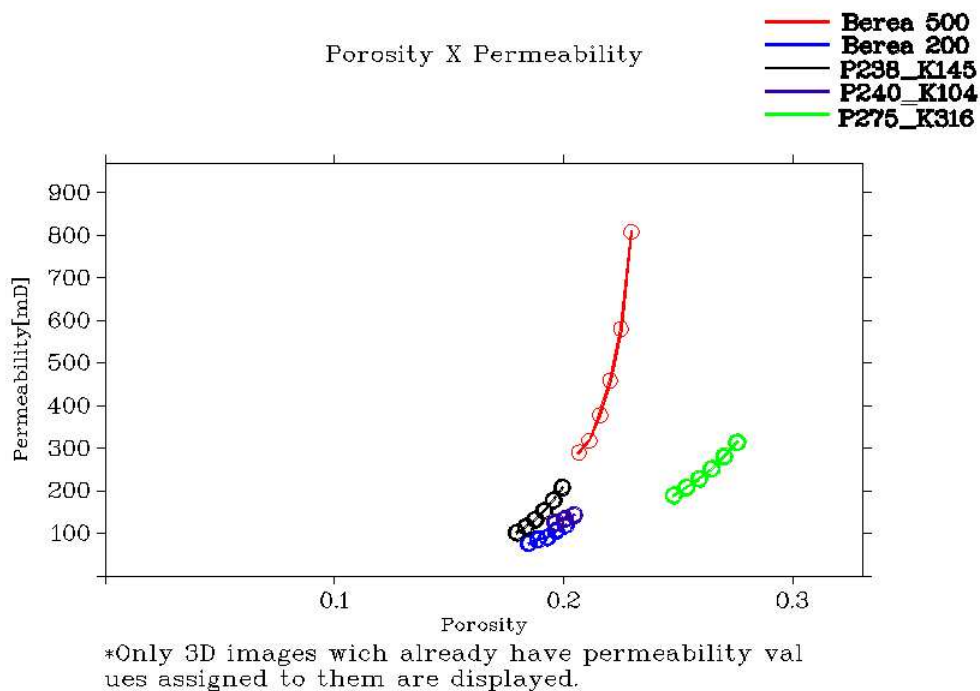


Figura 5.61: Resultados para o modelo dendrítico: Queda de permeabilidade em função da queda da porosidade.

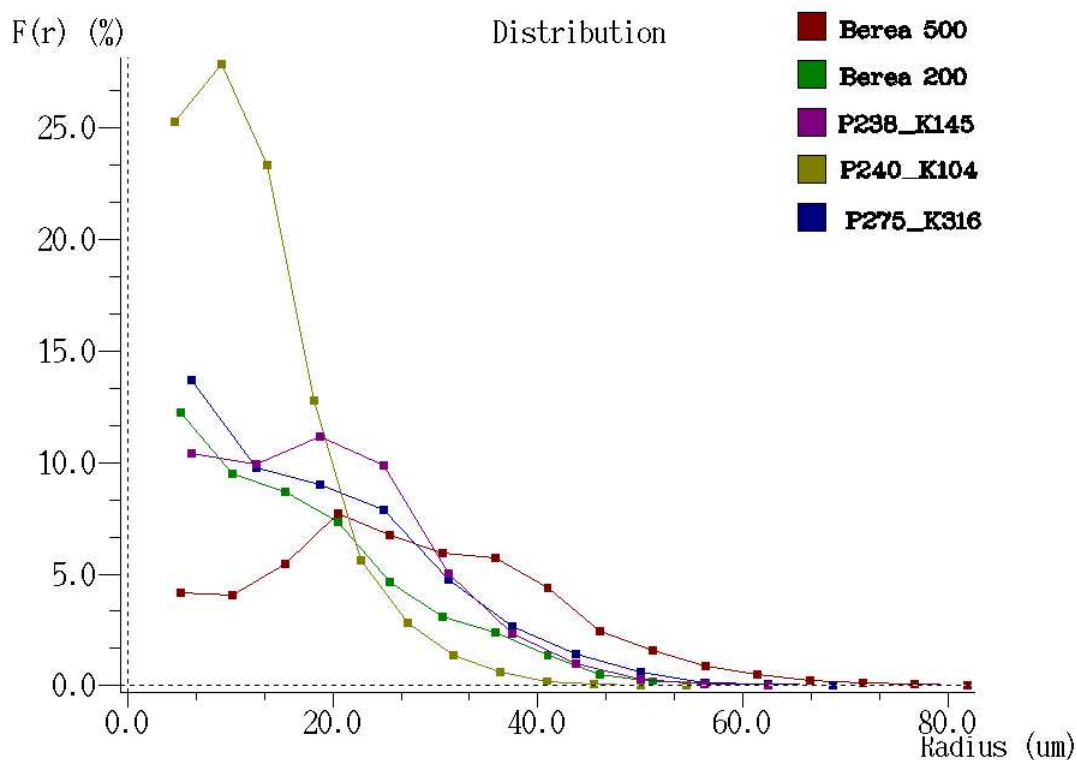


Figura 5.62: Resultados para o modelo dendrítico: Distribuição de tamanho de poros das representações originais.

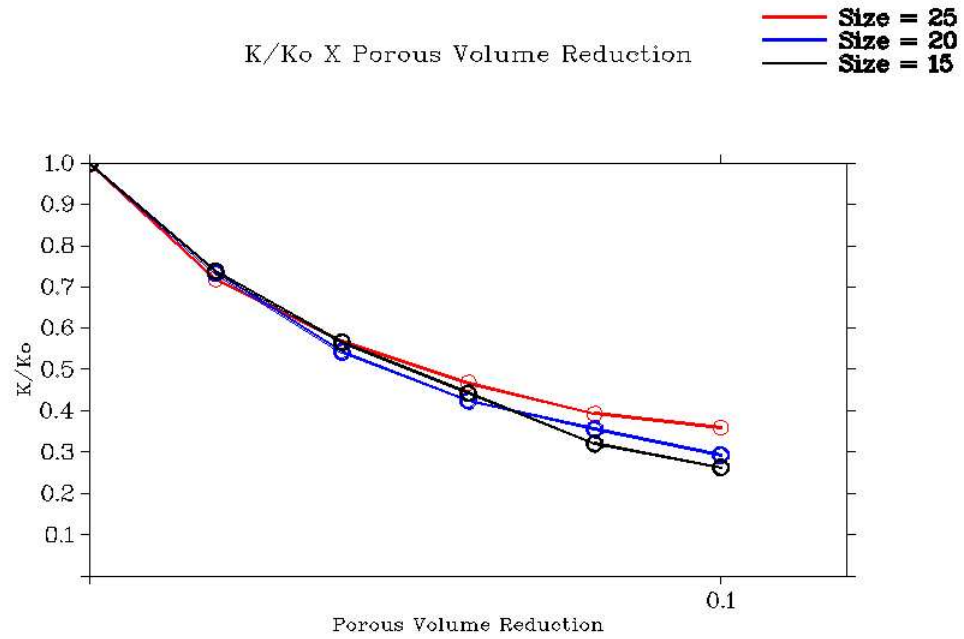


Figura 5.63: Resultados para a rocha Berea 500 incrustada pelo modelo dendrítico: Queda de permeabilidade em função da queda da porosidade para diferentes valores de  $e_d$  (em microns).

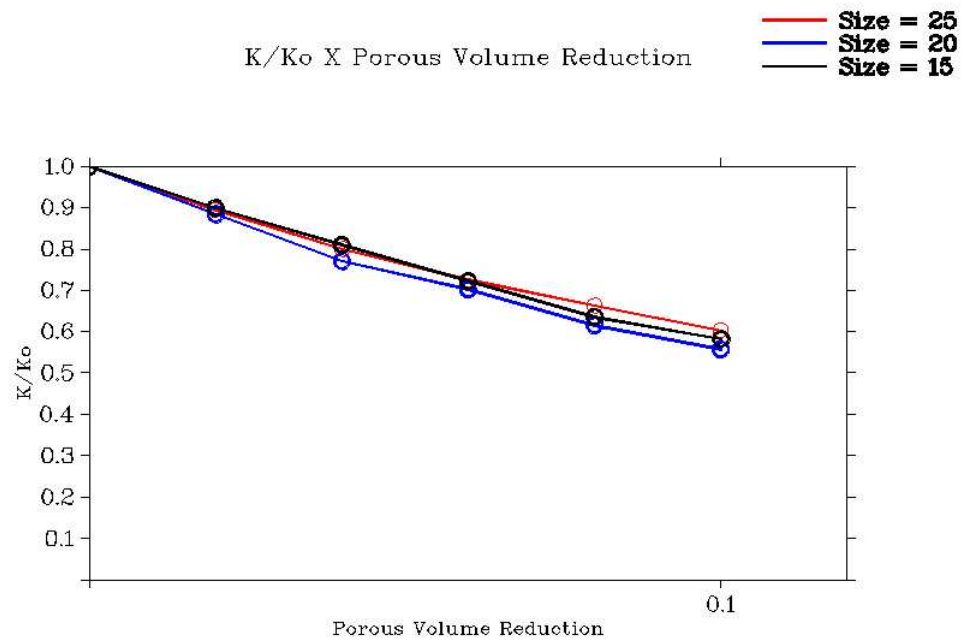


Figura 5.64: Resultados para a rocha P275\_K316 incrustada pelo modelo dendrítico: Queda de permeabilidade em função da queda da porosidade para diferentes valores de  $e_d$  (em microns).

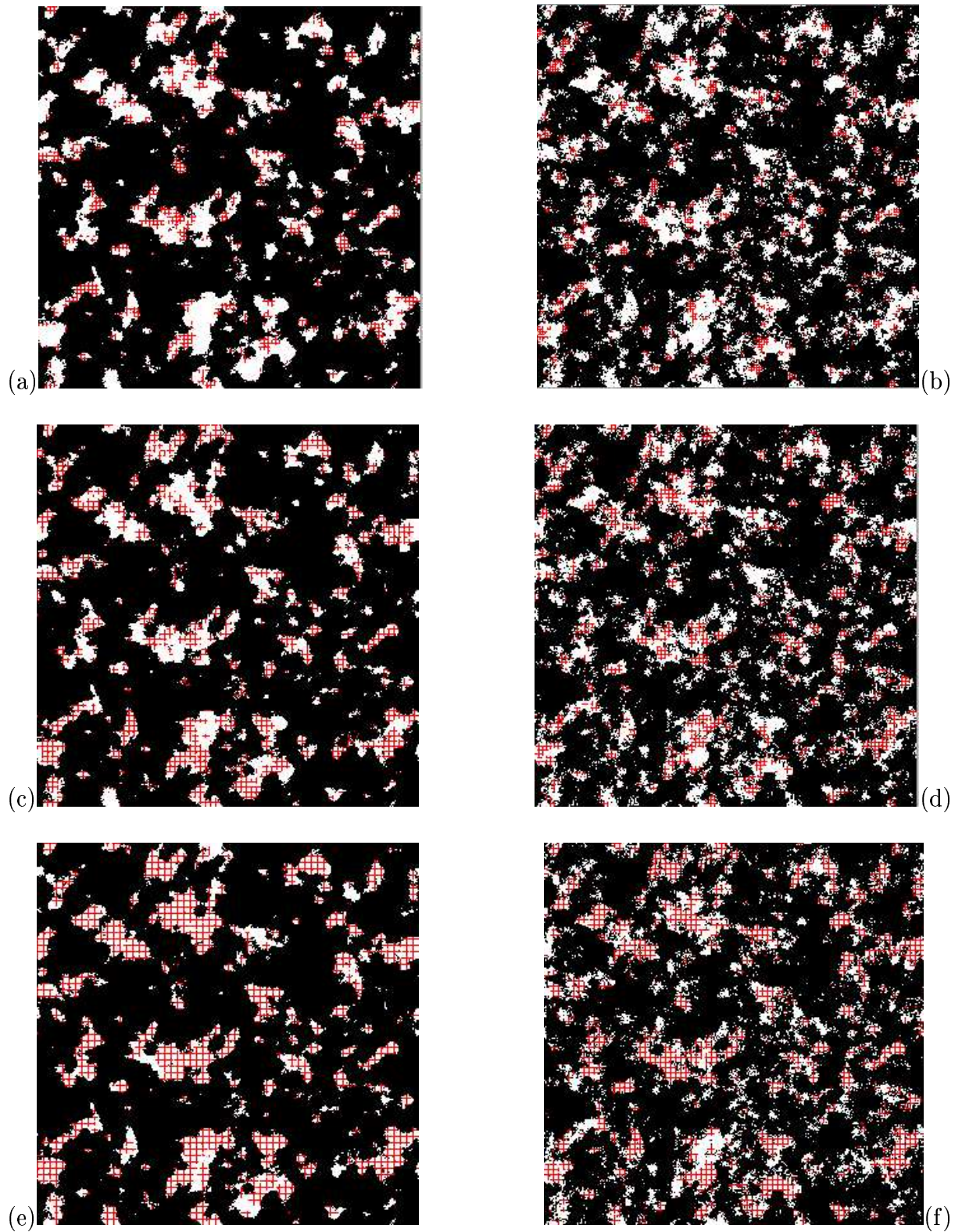


Figura 5.65: Seções transversais da representação reconstruída das rochas Berea 500 e P275\_K316 (gt2) apresentando o resultado do algoritmo de incrustação dendrítica para  $\sigma_r = 0, 1$ . Rocha Berea 500 com (a)  $e_d \simeq 15$ ; (c)  $e_d \simeq 20$ ; (e)  $e_d \simeq 25$ . Rocha P275\_K316 com (b)  $e_d \simeq 15$ ; (d)  $e_d \simeq 20$ ; (f)  $e_d \simeq 25$ .

# Capítulo 6

## Conclusões

Neste trabalho modelos e algoritmos computacionais foram desenvolvidos para possibilitar a realização de simulações de incrustação por sulfato de bário em representações tridimensionais de rochas reservatório.

O problema da deposição de barita ocorre quando a água injetada, rica em sulfato, entra em contato com a água de formação, rica em bário, causando o acúmulo do precipitado sólido ao longo da coluna de produção, em equipamentos do poço e no interior da formação. O problema é agravado pelas propriedades físico-químicas da barita, um sal de difícil remoção e baixa solubilidade, e pelo dano provocado à zona próxima ao poço produtor, onde a mistura entre as águas incompatíveis é mais intensa.

A metodologia utilizada para modelar o problema baseia-se em técnicas de análise de imagens. Primeiramente, lâminas delgadas das amostras de rochas são fotografadas com o auxílio de um microscópio, a seguir, realiza-se a binarização das imagens, seguida da etapa de caracterização, onde informações estatísticas do meio poroso original são extraídas a partir das imagens binarizadas. As informações estatísticas obtidas, que incluem a porosidade, a curva de autocorrelação e a distribuição de tamanho de poros, são então utilizadas como parâmetros de entrada para algoritmos de reconstrução tridimensional que reproduzem a organização topológica e morfológica da rocha original.

Depois da revisão bibliográfica, três tipos diferentes de modelos de incrustação foram desenvolvidos: ao redor do poro (*pore-lining*), preenchendo o poro (*pore-filling*) e dendrítica. Os mesmos levam em consideração a influência da organização morfotopológica do meio poroso, bem como a própria morfologia apresentada pelo material incrustante, sobre a redução da permeabilidade.

As representações tridimensionais utilizadas no estudo foram reconstruídas através do método da gaussiana truncada ou pelo método das esferas sobrepostas, a partir de microfotografias de rochas reservatório provenientes de bacias petrolíferas brasileiras (cedidas pelo CENPES/PETROBRAS).

Cada representação tridimensional foi submetida a sucessivos incrementos do volume incrustante, simulado através do crescimento de microestruturas no espaço poroso tridi-

mensional, e ao final de cada passo da simulação seus efeitos sobre diferentes tipos de rochas foram analisados, incluindo a determinação da permeabilidade intrínseca com o método do grafo de conexão serial. Curvas de queda de injetividade em função do volume depositado foram obtidas a partir das simulações e o impacto da incrustação sobre as rochas foi quantificado através da determinação do coeficiente de dano de formação.

A principal vantagem da abordagem proposta é a possibilidade da utilização de amostras de calha, obtidas por uma fração do custo de um testemunho, amostras laterais e testemunhos danificados, assim como a realização de simulações computacionais reproduzíveis em lugar de ensaios laboratoriais destrutivos.

Adicionalmente:

1. Todas as rochas analisadas apresentaram curvas de permeabilidade em função do volume incrustado semelhantes para incrustação do tipo *pore-lining* mostrando que a morfotopologia do meio poroso exerce pouca influência sobre a queda da permeabilidade para este tipo de incrustação. Por outro lado, as curvas de queda de permeabilidade para as rochas incrustadas de acordo com os modelos de incrustação *pore-filling* e *pore-bridging* mostraram forte dependência da organização da microestrutura dos poros. Rochas contendo poros com pequena superfície específica e apresentando uma pequena densidade de poros (menos do que 30 poros por seção transversal) demonstraram maior sensibilidade à incrustação *pore-filling*, enquanto rochas onde poros de grande diâmetro ( $d > 50 \mu m$ ) dominavam o fluxo sofreram maior dano com a incrustação dendrítica.
2. Verificou-se a necessidade da utilização de representações tridimensionais com maior resolução para casos em que as rochas analisadas apresentavam poros com poucos voxels de diâmetro que eram facilmente bloqueados pela incrustação devido ao efeito da discretização. Recomenda-se, para estes casos, a obtenção de uma nova curva de autocorrelação a partir de microfotografias com maior resolução, de maneira que uma representação tridimensional com maior resolução possa ser gerada.
3. As simulações realizadas não demonstraram que a incrustação do tipo *pore-filling* sem microporosidade associada causasse maior dano do que a incrustação *pore-lining*.
4. Demonstrou-se que o dano de formação causado pela incrustação de sulfato de bário depende fortemente da microporosidade associada à fase incrustante.

# Capítulo 7

## Sugestões para Trabalhos Futuros

- Viabilizar a realização de simulações de incrustação em representações tridimensionais com grandes dimensões (500 ou 600 voxels de comprimento). Isto exigirá uma otimização do algoritmo de determinação de permeabilidade (que utiliza o modelo do grafo de conexão serial), a utilização de um solver mais veloz e a criação de uma versão do algoritmo com o uso de programação paralela (BUENO, 2002a, 2002b; HUGHES; HUGHES, 2002) capaz de executar em clusters de computadores.
- Validar os modelos desenvolvidos através da realização de ensaios experimentais de precipitação em regime permanente, com injeção simultânea de águas incompatíveis em uma amostra sintética ou testemunho, e a mensuração da queda de pressão em função do volume precipitado. Como a precipitação ocorre com maior intensidade próxima à face de entrada da amostra é preciso determinar a queda de permeabilidade para porções pequenas da amostra, já que o método apresentado neste estudo se aplica a volumes menores e não considera a heterogeneidade do meio poroso ou a precipitação desigual em diferentes partes da amostra.
- Amostras incrustadas poderão ser caracterizadas com o uso do método de análise de imagens, a fim de determinar valores apropriados para os parâmetros de entrada dos algoritmos. A porosidade da fase incrustante e a distribuição de tamanhos das populações de aglomerados e dendritos deverá ser obtida, assim como a influência do índice de supersaturação sobre os mesmos.
- É preciso determinar se a migração de cristais de barita realmente ocorre no meio poroso, e em caso positivo incorporar a migração e captura de partículas aos modelos de incrustação.
- Após a validação e revisão dos modelos propostos a metodologia apresentada pode ser estendida para escalas maiores, com o cruzamento de dados de perfis de poço e de simuladores de reservatório com as curvas de dano de formação e de permeabilidade em função da porosidade obtidas através de simulações sobre representações



tridimensionais. As representações tridimensionais seriam geradas a partir de microfotografias de amostras de calha coletadas no próprio poço produtor.

- Desenvolver uma adaptação do método do grafo de conexão serial, de forma que os valores das pressões dos nodos obtidos para um passo da simulação de incrustação incremental sejam reaproveitados para o cálculo da permeabilidade no passo seguinte da simulação, com o objetivo de aumentar o desempenho do algoritmo.
- Desenvolver modelos, para representações tridimensionais, de queda de injetividade em função do dano de formação causado pela captura das partículas contidas na água injetada.
- O software desenvolvido deve ser aprimorado e estendido. Novos métodos e algoritmos devem ser incorporados: i) determinação dos números de coordenação dos poros, ii) realização de simulações de invasões de fluidos, iii) determinação da permeabilidade relativa, iv) cálculo de curvas de autocorrelação no espaço tridimensional, v) obtenção das distribuições de tamanhos de gargantas de poros, vi) obtenção de curvas de histerese, vii) novos modelos de segmentação, viii) novos métodos de caracterização, ix) novos modelos de reconstrução 3D, xi) uso de imagens de microtomógrafos.

# Referências Bibliográficas

- ADLER, P. M.; JACQUIN, C. G.; QUIBLIER, J. A. Flow in simulated porous media. *Int. J. Multiphase Flow*, v. 16, p. 691–712, 1990.
- ALLAGA, D. A. et al. Barium and calcium sulfate precipitation and migration inside sandpacks. *SPE*, v. 1, n. 19765, 1992.
- ALVARADO, P. et al. *LTI Image Processing Library - Developer's Guide*. [S.l.], 2003.
- BEDRIKOVETSKY, P. *Mathematical Theory of Oil and Gas Recovery*. [S.l.]: Kluwer Academic Publishers, 1993.
- BEDRIKOVETSKY, P. *Comunicação Pessoal*. 2005.
- BEDRIKOVETSKY, P. G. et al. Oilfield scaling - part i: Mathematical and laboratorial modelling. *Society of Petroleum Engineers*, SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference, v. 1, n. 81127, 2003.
- BERNARD-MICHEL, B.; PONS, M. N.; VIVIER, H. Quantification, by image analysis, of effect of operational conditions on size and shape of precipitated barium sulphate. *Chemical Engineering Journal*, v. 1, n. 87, p. 135–147, 2002.
- BERRYMAN, J. Measurement of spatial correlation functions using image processing techniques. *Journal of Applied Physics*, v. 57, p. 2374–2384, 1984.
- BJARNE, S. *C++ The Programming Language*. 3. ed. [S.l.]: John Wiley Sons, 1999.
- BLANCHETTE, J.; SUMMERFIELD, M. *C++ GUI Programming with QT 3*. [S.l.]: Prentice Hall, 2004.
- BUENO, A. D. *Estudo Geométrico das Representações Tridimensionais da Estrutura Porosa e Grafo de Conexão Serial Para a Determinação da Permeabilidade Intrínseca de Rochas-Reservatório de Petróleo*. Tese (Doutorado) — UFSC, 8 2001.
- BUENO, A. D. *Introdução ao Processamento Paralelo e ao Uso de Clusters, Parte I: Filosofia*. [S.l.], 11 2002.
- BUENO, A. D. *Introdução ao Processamento Paralelo e ao Uso de Clusters, Parte II: Threads*. [S.l.], 11 2002.

BUENO, A. D. *Programação Orientada a Objeto com C++ - Aprenda a Programar em Ambiente Multiplataforma com Software Livre*. São Paulo: Novatec, 2003.

BUENO, A. D. *Comunicação Pessoal*. 2005.

BUENO, A. D.; MAGNANI, F. S.; PHILIPPI, P. C. Método para determinação da permeabilidade relativa de rochas reservatório de petróleo através da análise de imagens reconstruídas. In: . Caxambú - MG - Brasil: IX Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências Térmicas - ENCIT 2002, 2002. p. 12. CIT02-0672.

BUENO, A. D.; PHILIPPI, P. C. Modelo do grafo de conexão serial para determinação da permeabilidade de rochas reservatório de petróleo. In: . Caxambú - MG - Brasil: IX Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências Térmicas - ENCIT 2002, 2002. p. 12. CIT02-0668.

CEREPI, A.; DURAND, C.; BROSSE, E. Pore microgeometry analysis in low resistivity sandstone reservoirs. *Journal of Petroleum Science & Engineering*, v. 35, p. 205–232, 2002.

CEREPI, A.; HUMBERT, L.; BURLOT, R. Petrophysical properties of porous medium from petrographic image analysis data. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, v. 187-188, p. 233–256, 2001.

COSKUM, S.; WARDLAW, N. Image analysis for estimating ultimate oil recovery efficiency by waterflooding for two sandstone reservoirs. *Journal of Petroleum Science & Engineering*, v. 15, n. 237250, 1996.

COSTER, M.; CHERMANT, J. L. *Precis D Analyse D Images*. Paris: PRESSSES DU CNRS, 1989.

DAMIANI, M. C. et al. Predicting physical properties of reservoir rocks from the microstructural analysis of petrographic thin sections. In: . Produccion 2000 - Aplicaciones de la ciencia en la ingeniería de petróleo: Produccion 2000 / Aplicaciones de la Ciencia en la Ingeniería de Petróleo, 2000.

DIVERSOS. *Technical Report on C++ Performance*. [S.l.], 2003.

DULLIEN, F. A. L. *Porous Media - Fluid Transport and Pore Structure*. 1. ed. San Diego: Academic Press, 1992.

FALOPE, G. O.; JONES, A. G.; ZAUNER, R. On modelling continuous agglomerative crystal precipitation via monte carlo simulation. *Chemical Engineering Science*, n. 56, p. 2567–2574, 2001.

FENS, T. W. *Petrophysical Properties of Rock Samples Using Image Analysis Techniques*. Tese (Doutorado) — Technische Universiteit Delft, 2000.

FERNANDES, C. P. *Caracterização Morfotológica de Espaços Porosos: Reconstituição Multiescala e Simulação de Processos de Invasão de Fluidos não Molhantes*. Tese (Tese de Doutorado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1994.

GIES, R. M. Petrographic image analysis: An effective technology for delineating reservoir quality. *SPE*, v. 26147, 2003.

GLADSTONE, P. M. *Modelo Matemático para Previsão da Queda da Produtividade de Poços Devido à Incrustação*. Tese (Dissertação de Mestrado) — Univesidade Estadual do Norte Fluminense, Laboratório de Engenharia e Exploração de Petróleo, Macaé, RJ, 2004.

GOMES, J.; VELHO, L. *Computação Gráfica :Imagem*. 1. ed. Rio de Janeiro: INPA-SBM, 1994.

GONZALES, R.; WOODS, R. *Digital Image Processing*. 1. ed. [S.l.]: Addison-Wesley, 1993. ISBN.

HENESSY, J.; PATTERSON, D. *Computer Organization and Design: The Hardware/Software Interface*. [S.l.]: Morgan Kaufmann Publishers, 1993.

HENNESSY, A. J. B.; GRAHAM, G. M. The effect of additives on the co-crystallisation of calcium with barium sulphate. In: . Edinburgh, EH14 4AS, UK: [s.n.], 2002.

HUGHES, C.; HUGHES, T. *Parallel and Distributed Programming Using C++*. 1. ed. [S.l.]: Addison-Wesley, 2002.

IEEE. *IEEE Standards Collection: Software Engineering, IEEE Standard 610.12*. [S.l.], 1993.

IERUSALIMSKY, R.; FIGUEIREDO, L. H. de; CELES, W. *The Implementation of Lua 5.0*. [S.l.], 2006.

IOANNIDIS, M.; CHATZIS, I. On the geometry and topology of 3d stochastic porous media. *Journal of Colloid and Interface Science*, v. 229, p. 323–334, 2000.

IOANNIDIS, M.; KWIECIEN, M.; CHATZIS, I. Computer generation and application of a 3-d model porous media: From pore-level geostatistics to the estimation of formation factor. In: . Houston: Petroleum Computer Conference, 1995.

IOANNIDIS, M. A.; KWIECIEN, M.; CHATZIS, I. Statistical analysis of the porous microstructure as a method for estimating reservoir permeability. *J.Pet.Sci.Eng*, v. 16, p. pp.251–261, 1996.

- JAMES, R. Application of petrographic image analysis to the characterization of fluidflow pathways in a highly cemented reservoir: Kane field, Pennsylvania, U.S.A. *Journal of Petroleum Science & Engineering*, v. 13, n. 141154, 1995.
- KAMEDA, A. *Permeability Evolution in Sandstone: Digital Rock Approach*. Tese (Tese de Doutorado) — Stanford University, 2004.
- KEEHM, Y. *Computational Rock Physics: Transport Properties in Porous Media and Applications*. Tese (Tese de Doutorado) — Stanford University, 2003.
- KRUEGER, R. F. An overview of formation damage and well productivity in oilfield operations. *SPE Reprint Series*, n. 29, p. 7–28, 1990.
- LIANG, Z.; IOANNIDIS, M.; CHATZIS, I. Permeability and electrical conductivity of porous media from 3d stochastic replicas of the microstructure. *Chemical Engineering Science*, v. 1, n. 55, 2000.
- LMPT. *Página do Laboratório de Meios Porosos e Propriedades Termofísicas (LMPT)*. [S.l.], 2006.
- LOCK, P. et al. Predicting the permeability of sandstone from image analysis of pore structure. *Journal of Applied Physics*, v. 92, n. 10, 2002.
- LOPES, R. P. *Cinética de Precipitação de Sulfato de Bário em Meio Poroso: Modelagem Matemática e Laboratorial*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade Estadual do Norte Fluminense - Laboratório de Engenharia e Exploração de Petróleo, Macaé-RJ, 2002.
- LORENSEN, W.; CLINE, H. Marching cubes: A high resolution 3d surface construction algorithm. *Proceedings of SIGGRAPH*, p. 163–169, 1987.
- MAGNANI, F. S. *Determinação das Configurações de Equilíbrio em Meios Porosos Indeformáveis*. Tese (Doutorado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1996.
- MARCHISIO, D. L. et al. Study of aggregation in barium sulphate precipitation. In: . [S.l.]: 15th International Symposium on Industrial Crystallization, 2002.
- NANCOLLAS, G. H.; LIU, B. T. Crystal growth and dissolution of barium sulphate. *SPE*, n. 5300, 1975.
- OREN, P. E.; BAKKE, S. Process based reconstruction of sandstones and prediction of transport properties. *Transport in Porous Media*, v. 46, p. 311–343, 2002.
- PARKER, J. *Algorithms for Image Processing and Computer Vision*. 1. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1996.

- PHILIPPI, P. C. et al. *Characterization of Reservoir Rocks from Image Analysis on Imago Software*. [S.l.], 2002.
- PRESSMAN, R. S. *Engenharia de Software*. 5.ed.. ed. Rio de Janeiro: McGraw-Hill, 2002.
- QUIBLIER, J. A. A new three dimensional modelling technique for studying porous media. *Journal of Colloidal and Interface Science*, v. 98, p. 84–102, 1984.
- RUSS, J. *The Image Analysis Handbook*. 3. ed. [S.l.]: CRC Press, 1998.
- RUSS, J. *The Image Processing and Measurement Cookbook*. [S.l.]: <http://www.reindeergraphics.com/tutorial/index.shtml>, 2005.
- RUSS, J. C. *Practical Stereology*. 2. ed. [S.l.]: Plenum Press, 1999.
- SANTOS, L. O. E. et al. Using three-dimensional reconstructed microstructures for predicting intrinsic permeability of reservoir- rocks based on a boolean lattice gas method. In: SCIENCE, J. of P.; ENGINEERING-JPSE (Ed.). [S.l.]: Journal of Petroleum Science and Engineering-JPSE, 2002. v. 35, p. p109–124.
- SANTOS, L. O. E. D. et al. Reconstrução tridimensional de microestruturas porosas com o método das esferas sobrepostas. In: . Caxambú - MG - Brasil: IX Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências Térmicas - ENCIT 2002, 2002. p. 12.
- SANTOS, L. O. E. dos; PHILIPPI, P. C.; DAMIANI, M. C. Lattice gas methods for predicting intrinsic permeability of porous media. In: . Porto Alegre: Encit - 2000, 2000.
- SEUL, M.; O'GORMAN, L.; SAMMON, M. *Practical Algorithms for Image Analysis*. 1. ed. [S.l.]: Addison-Wesley, 1993. ISBN.
- SIQUEIRA, A. G.; BONET, E. J.; SHECAIRA, F. S. A 3d network model of rock permeability impairment due to suspended particles in injection water. *SPE*, n. 82232, 2003.
- SORBIE, K. S.; MACKAY, E. J. Mixing of injected, connate and aquifer brines in waterflooding and its relevance to oilfield scaling. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, n. 27, 2000.
- SOUZA, H. A. *Estudo dos Processos de Fixação e Transferência Isotérmica de Umidade em Meios Porosos Heterogêneos*. Tese (Tese de Doutorado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1993.
- TODD, A. C.; YUAN, M. D. Barium and strontium sulfate solid-solution scale formation at elevated temperatures. *SPE*, n. 19762, 1992.

TORRES, F. A. *Metodologia/Planejamento de montagem de laboratório para determinação do dano de formação em sistemas sob injeção de água*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual do Norte Fluminense, 2006.

TOSCANI, L.; VELOSO, P. *Complexidade de algoritmos : análise, projeto e métodos*. 1. ed. São Paulo: Sagra, 2002.

WAT, R. M. S. et al. Crystal growth and dissolution of barium sulphate. *SPE*, n. 23814, 1992.

YUNES, P. R. *Determinação da Distribuição de Poros de uma Argamassa de Cimento e Cal Usando as Isotermas de Equilíbrio e Dados de Microscopia Eletrônica*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica-UFSC, Florianópolis, 1993.

ZHIRONG, L. *Computer Generation and Application of 3-D Reconstructed Porous Structure: From 2-D Images to the Prediction of Permeability*. Tese (Tese de Doutorado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1997.

ZHIRONG, L. et al. A reconstruction technique of 3-d porous media by using image analysis and using fourier transform. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, v. 21, p. 273–283, 1998.

ZHIRONG, L. et al. Prediction of permeability of porous media based on 3-d pore skeleton network of reconstructed porous structure. *Int. J. Multiphase Flow*, v. 1, 1997.

# Apêndice A

## Manual do Usuário

Nas duas últimas décadas o desenvolvimento da indústria de computadores proporcionou um grande aumento do poder computacional e a redução dos seus custos. Neste mesmo período novos métodos de determinação de propriedades petrofísicas a partir da análise de imagens petrográficas foram desenvolvidas aproveitando as possibilidades oferecidas por computadores mais velozes e baratos. Atualmente um computador com custo de três mil reais (cerca de US\$ 1.300) como o Pentium IV (2.8GHz), possibilita o processamento de 8196 MIPS (milhões de operações sobre números inteiros ou operações lógicas) e 2408 MFLOPS (milhões de operações sobre números flutuantes de dupla precisão, isto é, de 64 bits), enquanto no início dos anos 80 um processador 8086 da intel executava 0.25 MIPS e não possuía uma unidade de processamento de ponto flutuante. É importante observar que estas medidas de *benchmarking* não são diretamente proporcionais ao desempenho do processador, mas fatores relevantes entre outros (como tamanho e velocidade da memória *cache* interna, paralelismo, conjunto de instruções utilizadas, etc) (HENESSY; PATTERSON, 1993).

A grande vantagem dos métodos de determinação de propriedades de rochas a partir da análise de imagens reside na possibilidade de poder determinar estas propriedades petrofísicas a partir de amostras de calha. Métodos laboratoriais necessitam de amostras bem maiores, isto é, testemunhos do reservatório, que são obtidos com procedimentos extremamente caros, enquanto as amostras de calha podem ser obtidas durante o processo de perfuração do poço sem nenhum custo adicional. Além disso, métodos de reconstrução tridimensional permitem gerar representações tridimensionais do meio poroso que reproduzem a microgeometria e a conectividade da rocha original, aumentando a precisão do método ao não depender de fórmulas empíricas que levam em consideração apenas parâmetros (porosidade, distribuição de tamanho de poros) obtidos a partir de análises da imagem da rocha no plano bidimensional.

O Software de Análise de Imagens do LENEP (SAIL) tem como objetivo principal disponibilizar a tecnologia de análise de imagens de rochas reservatórios para a comunidade acadêmica como um todo.



\* O SAIL possui uma interface gráfica avançada, o que facilita a sua utilização e suaviza a curva de aprendizado do software, o que o torna uma opção ideal para atividades educacionais.

\* O SAIL é “software livre”, isto é, alunos, técnicos e professores de outras universidades podem alterar o software para que ele se adapte às suas próprias necessidades. Outra possibilidade é simplesmente adicionar novos métodos aos já existentes, reutilizando a interface gráfica e o arcabouço de funções já implementadas.

\* O SAIL segue os paradigmas da Programação Orientada a Objetos (POO), o que facilita a sua manutenção, modificação e expansão.

\* Ao disponibilizar algoritmos de análise de imagens, reconstrução tridimensional, caracterização e determinação de propriedades físicas de microestruturas o SAIL é um verdadeiro “laboratório virtual de petrofísica” a disposição da comunidade científica.

## A.1 Entendendo a Interface

A fim de facilitar o sua utilização e suavizar a curva de aprendizado, o SAIL possui uma interface gráfica que permite a visualização e manipulação de diversos objetos (imagens, imagens tridimensionais, gráficos). Iremos analisar cada um dos componentes desta interface e como utilizá-los, mas antes devemos esclarecer alguns conceitos básicos.

### A.1.1 Objetos

Um objeto é qualquer item mostrado pelo programa, como uma imagem jpg ou gif, o gráfico de uma função ou uma imagem tridimensional. A maioria dos objetos está associada com um arquivo, ao abrir uma imagem do arquivo “imagem.png”, por exemplo, o objeto do tipo imagem aparecerá na tela e será associado ao arquivo “imagem.png”. É importante notar que dois objetos diferentes podem estar associados a um mesmo arquivo, isto pode acontecer quando um objeto é duplicado pelo usuário ou é aberto duas vezes.

Existem quatro tipos de objetos: imagens (coloridas e em tons de cinza), imagens binárias, imagens tridimensionais e gráficos que serão analisados em detalhe mais adiante. Cada tipo de objeto possui um conjunto de atributos e operações particulares.

Apenas um objeto pode ser selecionado por vez na interface. Este objeto é chamado “objeto selecionado” e é indicado pela coloração da barra de título da janela onde ele está contido, geralmente azul.

### A.1.2 Listas de Objetos

Listas de objetos armazenam diversos objetos de um mesmo tipo e permitem a execução de operações sobre conjuntos de objetos.

### A.1.3 Janelas

Cada objeto é mostrado dentro de uma janela, algumas vezes vários objetos podem ser mostrados dentro da mesma janela. O nome de arquivo associado a um objeto é mostrado no barra de título da sua janela.

### A.1.4 Áreas de Trabalho

Uma área de trabalho pode conter diversas janelas, que podem ser minimizadas, fechadas e arrastadas com o mouse.

## A.2 A Área de Trabalho

A área de trabalho (AT) ocupa a maior parte do espaço da interface gráfica e sua função principal é permitir a visualização de objetos (imagens, gráficos, etc). O funcionamento da área de trabalho é similar ao de outros programas populares (como Paint, Photoshop, etc), onde diversos objetos podem ser mostrados simultaneamente e cada um deles possui a sua própria janela que pode ser minimizada, fechada, redimensionada ou arrastada com o uso do mouse dentro da área de trabalho.

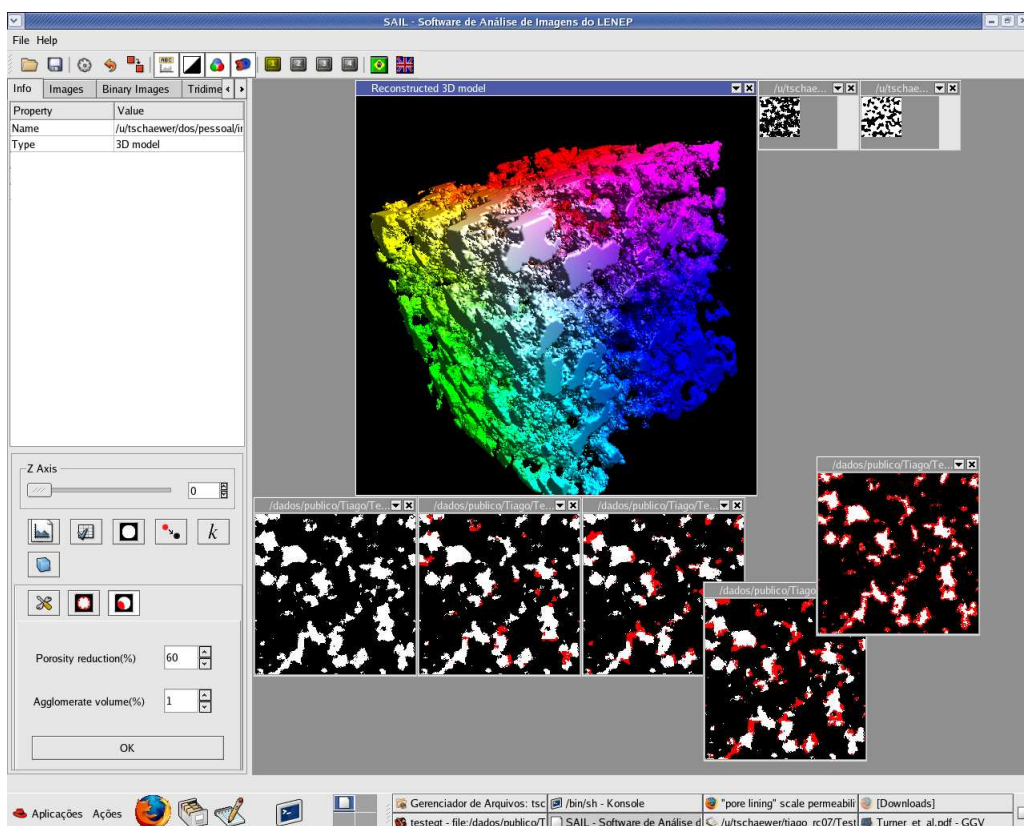


Figura A.1: A área de trabalho é a região com fundo cinza escura que mostra várias janelas diferentes.

O SAIL possui quatro áreas de trabalho diferentes, isto significa que caso uma delas se torne muito populosa, com um número grande de janelas abertas, o usuário pode simplesmente trocar para uma área de trabalho ainda vazia, continuar o seu trabalho e depois retornar para a área de trabalho anterior. A navegação entre áreas de trabalho é feita com botões localizados na área de controles genéricos (no topo da interface), ao clicar um botão o programa mostra a área de trabalho indica pelo número do botão (veja a figura A.2). O conceito de áreas de trabalho múltiplas parecerá familiar aos usuários de GNU/Linux que usam Gnome ou KDE, pois estes sistemas possuem um “alternador de áreas de trabalho” que permitem a navegação entre diversas áreas de trabalho. A área de trabalho que é mostrada na tela é chamada de *área de trabalho selecionada*, as outras áreas de trabalho permanecem ocultas.





Figura A.2: Seletores de ATs localizados no topo da interface. A área de trabalho ativa é a número 1, indicada pelo botão colorido de amarelo.

## A.3 Barra de Tarefas ou Controles Genéricos

Os controles genéricos estão no topo da interface e possuem botões que podem executar operações sobre o objeto selecionado (veja a seção A.1.1), independentemente do seu tipo, ou alterar o comportamento do programa.






### A.3.1 Operações Sobre Arquivos

	<p><b>Abrir Arquivo:</b> Ao pressionar este botão um diálogo de abertura de arquivo é mostrado, e é possível navegar na estrutura de diretórios do sistema para escolher o arquivo a ser aberto. Ao abrir um arquivo, o objeto armazenado pelo arquivo é mostrado na tela e o objeto criado fica associado ao arquivo (veja a seção A.1.1). Também é possível escolher um filtro para os arquivos que serão mostrados, de forma que apenas um tipo de arquivo seja visualizado. A tabela a seguir mostra, os tipos de objetos (e suas extensões) que podem ser abertos:</p>
	<p><b>Salvar Arquivo.</b> Salva um arquivo com o nome de arquivo associado ao objeto (veja a seção A.1.1).</p>

Tipo de Objeto	Extensão de Arquivo
Imagem	PNG, GIF, JPG
Imagem Binária	PNG, GIF
Imagem Tridimensional	3D, TXT
Gráfico	PNG, DAT, P (Gnuplot)





Table A.1: Tipos de arquivos e suas extensões.

### A.3.2 Operações Genéricas Sobre Objetos

	<b>Cria Cópia.</b> Cria uma cópia do objeto selecionado. Esta operação é útil quando se deseja alterar um objeto, mas sem perder o objeto original. Lembre-se de que a cópia criada por esta operação e o arquivo original permanecem associados a um mesmo arquivo, o que significa que os dois serão salvos com o mesmo nome. Para salvar um arquivo com um nome diferente utilize a operação “Salvar Como...”.
	<b>Desfazer.</b> Desfaz a última operação sobre um objeto. Apenas a <b>última</b> operação pode ser desfeita.
	<b>Aumentar zoom.</b> Aumenta o tamanho da imagem para melhor visualização. Lembre-se de que as dimensões reais da imagem não serão alteradas.
	<b>Diminuir zoom.</b> Diminui o tamanho da imagem para melhor visualização. Lembre-se de que as dimensões reais da imagem não serão alteradas.
	<b>Retirar zoom.</b> Restaura a proporção de 1:1 entre as dimensões da imagem e o seu tamanho na tela.


### A.3.3 Seletores de Tipos de Objetos Visíveis

Caso a área de trabalho se torne muito populosa, o usuário pode decidir visualizar apenas alguns tipos de objetos por vez. Os seletores de tipos de objetos visíveis permitem ocultar ou mostrar todos os objetos de um determinado tipo.

	Mostra/Oculta todas as imagens.
	Mostra/Oculta todas as imagens binárias.
	Mostra/Oculta todas as imagens tridimensionais.
	Mostra/Oculta todas os gráficos.



Quando um novo arquivo é aberto e o objeto aberto corresponde a um tipo que está sendo ocultado, automaticamente todos os objetos do mesmo tipo tornam-se visíveis.

### A.3.4 Seletores de Áreas de Trabalho

	Os seletores de áreas de trabalho permitem a navegação entre as áreas de trabalho do programa (veja a seção A.2)
---	--

### A.3.5 Seletores de Linguagem

O SAIL possui uma arquitetura que permite uma grande flexibilidade para adicionar suporte a novas linguagens (detalhes no manual para desenvolvedores). No momento duas linguagens podem ser escolhidas: português (brasileiro) e inglês.

	Traduz todo o programa para o português (brasileiro).
	Traduz todo o programa para o inglês.

### A.3.6 As Abas de Controle

As abas de controle se localizam à esquerda da área de trabalho e permitem a visualização de atributos assim como a manipulação de objetos e listas de objetos. É possível navegar entre as abas clicando no título de cada uma delas no topo da área das abas. Existem quatro abas diferentes que veremos a seguir.

#### A.3.6.1 A Aba Info

A aba info, apresentada na figura A.3 tem duas áreas diferentes. A parte superior mostra atributos do objeto selecionado e a parte inferior contém controles que permitem a execução de operações sobre o objeto. É importante notar que a aba info é dependente do contexto, isto é, o conjunto de atributos e controles se modifica de acordo com o objeto selecionado na área de trabalho. Por exemplo, se uma imagem tridimensional (que representa um meio poroso) for selecionada, atributos como porosidade, porosidade conectada e permeabilidade aparecerão na área de atributos e diversos botões que permitem a execução de operações sobre imagens tridimensionais serão mostrados na área de controles.

Cada botão possui um desenho que procura indicar qual a sua função, que com o passar do tempo acabará sendo memorizada pelos usuários mais experientes, mas os usuários iniciantes (ou esquecidos) podem preferir uma definição mais explícita da funcionalidade do botão, que pode ser obtida se o cursor do mouse permanecer sobre alguns instantes sobre o mesmo.

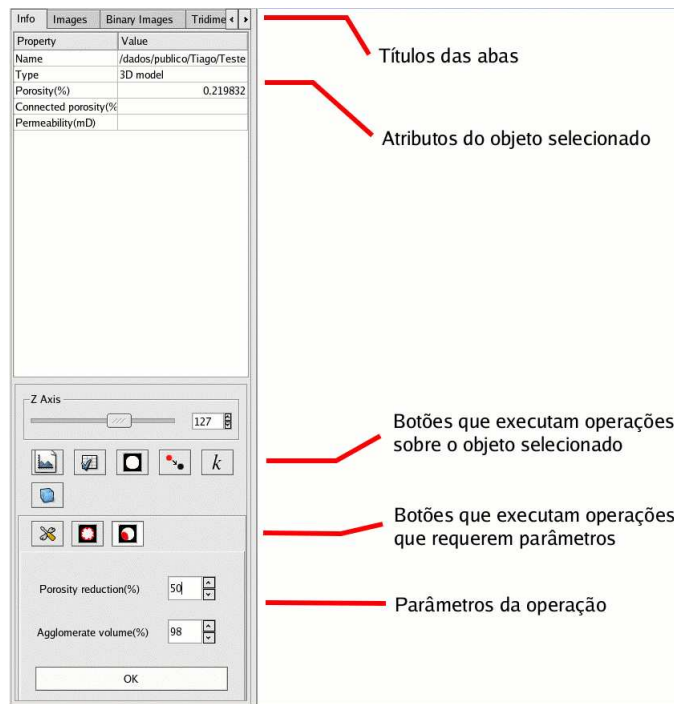


Figura A.3: A aba info e suas áreas de atributos e de controles.

Existem dois tipos de operações sobre objetos, operações sem parâmetros e operações com parâmetros. Os botões que implementam operações sem parâmetros ficam na parte superior da área de controles e ao serem clicados executam uma operação sobre o objeto selecionado imediatamente. Os botões que implementam operações com parâmetros ficam logo abaixo dos botões que não precisam de parâmetros, e ao serem clicados tornam-se mais claros e revelam os parâmetros necessários à sua execução. Após preencher os parâmetros corretamente clique no botão “OK” para executar a operação.



### A.3.6.2 As Abas de Listas

O objetivo principal das listas é permitir que operações sejam executadas sobre um conjunto de objetos, eliminando a necessidade de processos repetitivos serem realizados pelo usuário. Existem três abas de listas: a aba de listas de imagens, a aba de listas de imagens binárias e a aba de listas de imagens tridimensionais. Cada uma delas contém todos os objetos de um determinado tipo que estão abertos dentro do programa. A lista de imagens tridimensionais, por exemplo, contém todas as imagens tridimensionais abertas pelo programa e cada objeto é indicado pelo seu nome de arquivo.

À esquerda do nome de cada arquivo de objeto existe um controle que permite que o objeto seja selecionado e deselecionado, objetos selecionados em uma lista sofrem as operações executadas sobre a lista enquanto os objetos não selecionados permanecem inalterados. Outra vantagem das listas é organizar os objetos, permitindo que um objeto seja encontrado na área de trabalho com um clique de mouse sobre o nome do seu ar-

quivo, ao ser clicado na lista o objeto é mostrado em primeiro plano e se torna o objeto selecionado, caso o objeto esteja em uma área de trabalho diferente da selecionada (veja a seção A.2), a área de trabalho selecionada é alterada para aquela que contém o objeto.

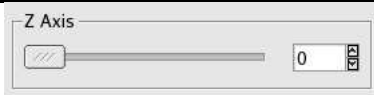





Controles comuns a todas as abas de listas:

	Seleciona todos os objetos da lista.
	Deseleciona todos os objetos da lista.

**A.3.6.2.1 Aba de Imagens Coloridas/Tons de Cinza** A aba de imagens coloridas possibilita a realização de operações diretas, como determinação do histograma de níveis de cor (R,G,B), a colocação da imagem na lista de imagens a serem processadas, a inversão da imagem, ou a binarização da imagem (solicita nível de corte).

**A.3.6.2.2 Aba de Imagens Binárias** A aba de imagens binárias possibilita a obtenção direta do histograma, a colocação da imagem na lista de imagens a serem processadas, a geração de imagens 3D (com gaussiana truncada ou esferas sobrepostas), além da inversão da imagem. As operações da morfologia matemática (erosão, dilatação ,abertura e fechamento), requerem a entrada do raio do elemento estruturante.

**A.3.6.2.3 Aba de Imagens Tridimensionais** Controles da aba de listas tridimensionais:

 <p>The image shows a control panel titled 'Z Axis'. It features a horizontal slider bar with a shaded area on the left and a numerical input field on the right containing the number '0'. There are small arrows on the right side of the input field for navigation.</p>	<p>Este controle permite a navegação simultânea de planos. Uma imagem tridimensional pode ser vista como uma sequência de planos bidimensionais contíguos, este controle permite uma visualização de planos sincronizada de várias imagens tridimensionais. Se o conjunto de imagens selecionadas possuírem um número de planos perpendiculares ao eixo z diferentes este controle só permitirá a visualização até o plano igual à dimensão z da menor imagem tridimensional. É possível navegar rapidamente através dos planos arrastando a botão de rolagem, navegar plano a plano utilizando as setas ao lado do número do plano, ou escolher diretamente o número do plano desejado.</p>
	<p>Mostra gráficos relativos ao conjunto de imagens tridimensionais.</p>
	<p>Limpa a imagem, retirando a incrustação.</p>
	<p>Copia os píxeis incrustados para representação 3D.</p>
	<p>Calcula a permeabilidade para toda a lista. Tenha em mente que o cálculo da permeabilidade pode ser um processo demorado, esta operação é especialmente útil para ser executada quando a máquina estiver desocupada, durante a madrugada, por exemplo. Caso o procedimento seja interrompido por qualquer motivo, o trabalho realizado não é perdido, pois as permeabilidades já calculadas permanecem registradas nos arquivos associados aos objetos.</p>
	<p>Gera visualização 3D (openGL).</p>

## A.4 Manipulando Objetos

Como já vimos na seção A.1.1, existem vários tipos de objetos diferentes. Diferentes tipos objetos possuem diferentes conjuntos de atributos e operações que podem ser acessados através da “aba info” (ver seção A.3.6.1). *Atributos* representam o conjunto de propriedades de um objeto, enquanto as *operações* são o conjunto de métodos que podem ser



executados sobre um objeto. Como os conjuntos de atributos e operações são diferentes para tipos de objetos diferentes, a “aba info” altera a sua aparência de acordo com o objeto selecionado na área de trabalho.

## **A.4.1 Atributos**

### **A.4.1.1 Atributos imediatos**

A maioria dos atributos de um objeto são calculados de maneira praticamente instantânea e sempre possuem valores validos na área de atributos da “aba info”. Sempre que o objeto selecionado é alterado, os atributos instantâneos do objeto recém selecionado são recalculados e exibidos na tela.

### **A.4.1.2 Atributos não-imediatos**

Alguns atributos requerem um tempo relativamente longo para serem determinados e por isso o seu valor pode aparecer em branco na área de atributos. Caso o usuário deseje conhecer o valor do atributo ele deve executar uma operação que calcule o seu valor. Ao completar o cálculo de um atributo não-imediato o seu resultado é imediatamente armazenado na memória e no arquivo associado ao objeto, para que não seja preciso executar mais operações demoradas para recalculá-lo. Note que qualquer alteração no objeto que influencie no atributo implicará na perda do resultado armazenado, que se torna inválido.

## **A.4.2 Operações**

### **A.4.2.1 Operações sem parâmetros**

Os botões que implementam operações sem parâmetros ficam na parte superior da área de controles e ao serem clicados executam uma operação sobre o objeto selecionado imediatamente.

### **A.4.2.2 Operações com parâmetros**

Os botões que implementam operações com parâmetros ficam logo abaixo dos botões que não precisam de parâmetros, e ao serem clicados tornam-se mais claros e revelam os parâmetros necessários à sua execução. Após preencher os parâmetros corretamente clique no botão “OK” para executar a operação.

### A.4.3 Objeto Imagem

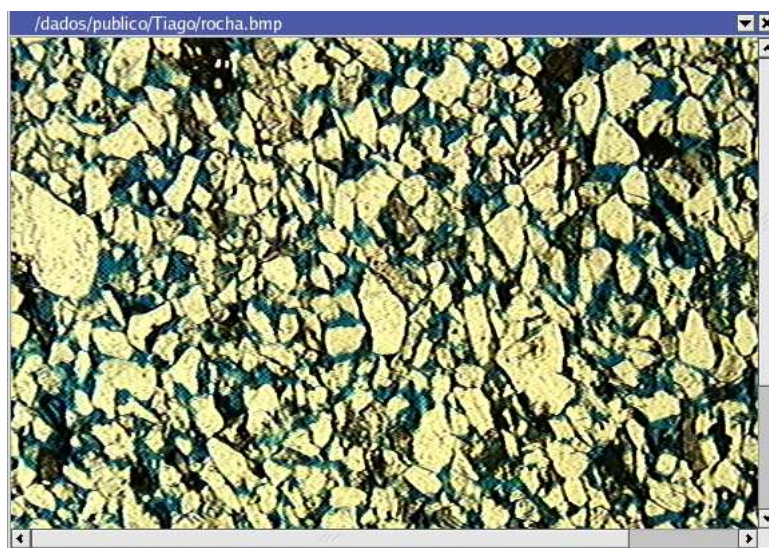


Figura A.4: Janela mostrando um objeto do tipo imagem.

#### A.4.3.1 Atributos

**Altura[pixeis]** - A altura da imagem.

**Largura[pixeis]** - A largura da imagem.

#### A.4.3.2 Operações






	Mostra diversos gráficos relacionados a imagem.
	Adiciona/Deseleciona o objeto na lista de imagens.
	Inverte os valores RGB de todos os pixels da imagem.
	Converte imagem colorida para tons de cinza.
	<p>Binariza a imagem.</p> <p>Parâmetros:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Valor de corte - pixels com valores de intensidade menores do que este valor serão pintados de preto, os pixels restantes serão pintados de branco.</li> </ul>



Figura A.5: Operações com imagens coloridas.

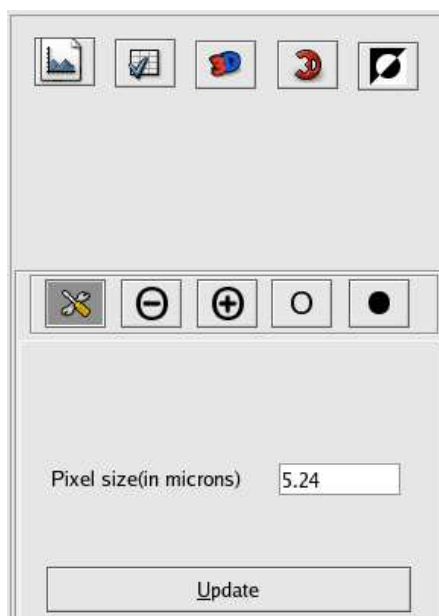


Figura A.6: Operações com imagens binárias.

### A.4.3.3 Gráficos

**Histograma vermelho** - Mostra a distribuição da fração de pixels em relação aos valores de intensidade do canal vermelho. Cada pixel de uma imagem possui valores para os canais vermelho, verde e azul que variam de 0 até 255.

**Histograma verde** - Mostra a distribuição da fração de pixels em relação aos valores de intensidade do canal verde.

**Histograma azul** - Mostra a distribuição da fração de pixels em relação aos valores de intensidade do canal azul.

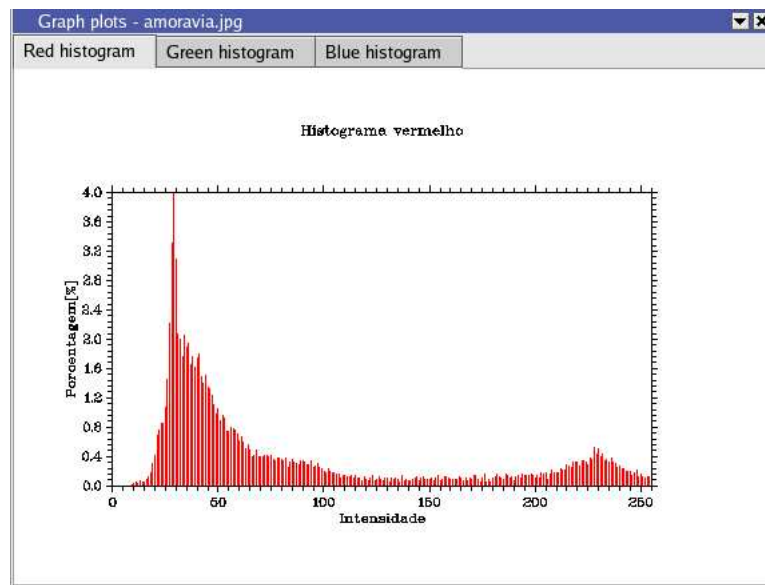


Figura A.7: Gráfico mostrando o histograma para o canal vermelho de uma imagem.

#### A.4.4 Objeto Imagem Binária

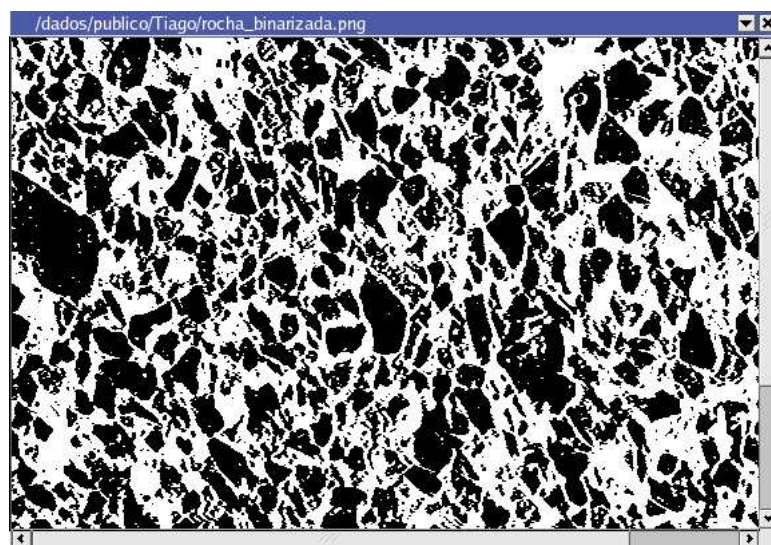


Figura A.8: Janela mostrando um objeto do tipo imagem binária, onde a fase porosa é representada pela cor branca e a fase sólida pela cor preta.










##### A.4.4.1 Atributos

**Altura[pixeis]** - A altura da imagem.

**Largura[pixeis]** - A largura da imagem.

**Porosidade** - A razão entre pixeis brancos e pretos da imagem.

##### A.4.4.2 Operações

	Mostra diversos gráficos relacionados a imagem binária.
	Adiciona/Deseleciona o objeto na lista de imagens binárias.
	Gera uma imagem tridimensional a partir da imagem binária usando o método da gaussiana truncada.
	Converte imagem colorida para tons de cinza.
	Converte todos os pixels pretos em pixels brancos e vice-versa.
	Aplica uma operação de erosão sobre a imagem. Parâmetros: <ul style="list-style-type: none"><li>•Raio do elemento estruturante - define o raio do círculo usado como elemento estruturante.</li></ul>
	Aplica uma operação de dilatação sobre a imagem. Parâmetros: <ul style="list-style-type: none"><li>•Raio do elemento estruturante - define o raio do círculo usado como elemento estruturante.</li></ul>
	Aplica uma operação de abertura sobre a imagem. Parâmetros: <ul style="list-style-type: none"><li>•Raio do elemento estruturante - define o raio do círculo usado como elemento estruturante.</li></ul>
	Aplica uma operação de fechamento sobre a imagem. Parâmetros: <ul style="list-style-type: none"><li>•Raio do elemento estruturante - define o raio do círculo usado como elemento estruturante.</li></ul>

#### A.4.4.3 Gráficos

**Autocorrelação** - O gráfico de autocorrelação (IOANNIDIS; CHATZIS, 2000; SEUL; O'GORMAN; SAMMON, 1993) é obtido através do método frequencial (RUSS, 1998) e é explicado em detalhes na seção 2.1.6.

**Covariograma** - O gráfico de covariograma também é obtido através do método frequencial e é explicado em detalhes na seção 2.1.6.

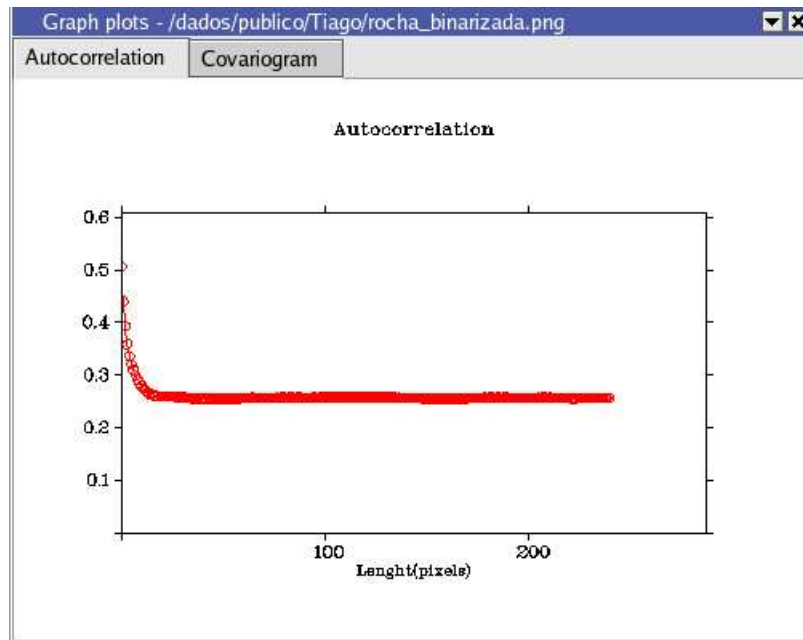


Figura A.9: Gráfico mostrando o gráfico da função autocorrelação de uma imagem binária.

### A.4.5 Objeto Imagem Tridimensional



Figura A.10: Janela mostrando um objeto do tipo imagem tridimensional. Apenas um plano da imagem tridimensional é mostrado, onde a fase porosa é representada pela cor branca e a fase sólida pela cor preta.

#### A.4.5.1 Atributos

**Porosidade**[ $m^3/m^3$ ] - A porosidade é a fração do volume da imagem ocupada pela matriz porosa.

**Porosidade Conectada**[ $m^3/m^3$ ] - A porosidade conectada é a fração do volume da imagem ocupada pela matriz porosa que está conectada ao primeiro plano (perpendicular ao eixo z) e ao último plano (perpendicular ao eixo z) imagem tridimensional, isto é, a fração de voxels porosos que pertence ao cluster que percola a imagem.

**Permeabilidade**[mD] - A permeabilidade é a medida da capacidade de um material para transmitir fluidos. Como o cálculo da permeabilidade pode ser relativamente demorado. A permeabilidade é um *atributo não-imediato*.

**Permeabilidade (Carman-Kozeny)**[mD] - Estimativa de permeabilidade calculada através da fórmula de Carman-Kozeny, onde :

$$k = c \frac{(100\phi_{c6})^3}{(1-\phi_{c6})^2 S_v^2}$$

A constante c utilizada no software é igual a 5.

**Dimensão x**[voxels] - A dimensão da imagem no sentido do eixo x.







**Dimensão y**[voxels]) - A dimensão da imagem no sentido do eixo y.

**Dimensão z**[voxels] - A dimensão da imagem no sentido do eixo z.

**Superfície específica**[ $m^2/m^3$ ] - A razão entre a área da superfície de contato entre a fase porosa e a sólida e o volume poroso da imagem tridimensional.



## A.4.5.2 Operações

	Mostra diversos gráficos relacionados a imagem tridimensional.
	Adiciona/Deseleciona o objeto na lista de imagens tridimensionais.
$k$	Calcula a permeabilidade para a imagem tridimensional. O valor calculado é armazenado no arquivo da imagem, assim como os dados tridimensionais da mesma (para garantir que o valor de $k$ armazenado seja consistente com a imagem).
	Limpa todos os voxels que estão incrustados, transformando-os em voxels porosos.
	<p>Incrusta a imagem tridimensional ao longo da interface poro/sólido de acordo com o modelo de incrustação <i>pore-lining</i>.</p> <p>Parâmetros:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>•Redução da Porosidade - a porcentagem do volume poroso a ser incrustado.</li> </ul>
	<p>Incrusta a imagem tridimensional ao longo da interface poro/sólido de acordo com o modelo de incrustação <i>pore-filling</i>.</p> <p>Parâmetros:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>•Redução da Porosidade - a porcentagem do volume poroso a ser incrustado.</li> <li>•Volume Aglomerado - a porcentagem mínima do volume incrustado a ser depositada na interface poro/incrustação.</li> </ul> <p>Parâmetros: Raio do elemento estruturante - define o raio do círculo usado como elemento estruturante.</p>
	Mostra a imagem tridimensional em um modelo 3D que pode ser rotacionado e transladado.

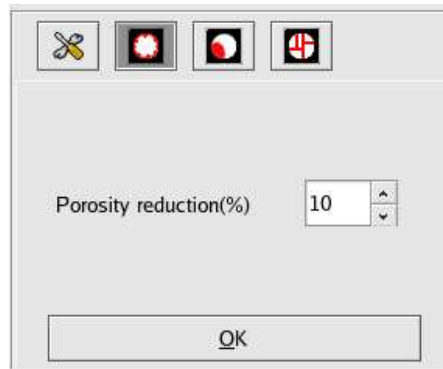


Figura A.11: Parâmetros para incrustação *pore-lining*.

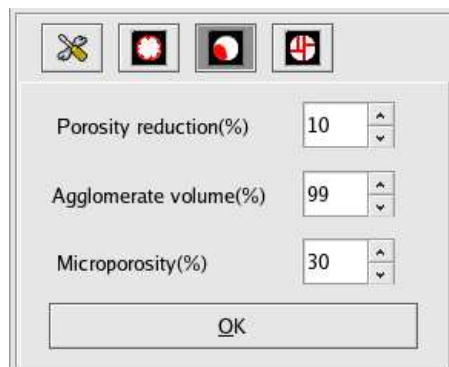


Figura A.12: Parâmetros para incrustação *pore-filling*.

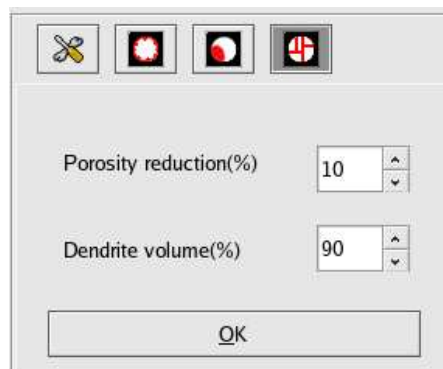


Figura A.13: Parâmetros para incrustação dendrítica.

### **A.4.6 Objetos Gráficos**

As janelas de gráficos geralmente apresentam um conjunto de gráficos, relativos a outro objeto (uma imagem, por exemplo). É possível navegar entre os gráficos com um clique sobre a aba que apresenta o título do gráfico desejado. No título da janela do gráfico é possível determinar a partir de qual objeto os gráficos foram gerados, lembre-se que ao alterar um objeto os gráficos não são alterados automaticamente. As janelas de gráficos podem ser redimensionadas arrastando as bordas das janelas. Os gráficos podem ser salvos no formato gráfico png.

# Apêndice B

## Manual do Desenvolvedor

A fim de desenvolver uma solução de software é preciso utilizar a tecnologia de engenharia de software, que é definida como “a aplicação de uma abordagem sistemática, disciplinada e quantificável, para o desenvolvimento, operação e manutenção do software” (IEEE, 1993). O principal fundamento da engenharia de software é a camada de processo, que define um conjunto de tarefas aplicável a um projeto de software.

O modelo de processo de software escolhido para a realização do projeto foi o modelo incremental (veja a figura B.1), que se caracteriza pela aplicação de sequências lineares das etapas de análise, projeto, codificação e teste, onde cada sequência produz um novo módulo ou “incremento” do software (PRESSMAN, 2002). O modelo incremental se adapta melhor à projetos orientados a objetos, por ser suficientemente flexível para permitir a adição de novos componentes à medida que eles são desenvolvidos ou reutilizados. Como os requisitos do sistema eram muitos e não era possível determinar com exatidão a quantidade de funções que poderiam ser incluídas no software no tempo disponível, a escolha do modelo incremental foi a mais indicada por produzir, a cada ciclo incremental, uma versão funcional do software.

Nos últimos anos, novos métodos orientados a objetos foram desenvolvidos revolucionando as etapas de análise, projeto, codificação e teste de sistemas. A abordagem orientada a objetos introduz uma nova forma de abstrair informações do domínio do problema para o domínio da aplicação, centralizada no conceito de objeto. Os objetos são definidos por classes, que são descrições genéricas de uma coleção de objetos. As classes possuem atributos que descrevem propriedades dos objetos e métodos que definem operações executadas pelos objetos. A decisão de utilizar o paradigma de orientação a objetos se justifica por favorecer o reuso de código através dos mecanismos de herança e polimorfismo, aumentar a coesão das classes, reduzir a visibilidade e diminuir o acoplamento entre módulos através do encapsulamento.

A linguagem C++ (BJARNE, 1999) foi escolhida por ser um padrão para a codificação de softwares científicos e de engenharia, que são caracterizados pelo uso de algoritmos *number crunching* que requerem um grande esforço computacional. Como a eficiência sem-

pre foi um dos principais objetivos de projeto da linguagem desde a sua criação (DIVERSOS, 2003) isto a torna a melhor escolha para o desenvolvimento de sistemas produzidos para ambientes com recursos computacionais limitados em relação ao esforço necessário para a resolução de um problema, caso dos sistemas *cpu-bound* científicos. Outra vantagem da linguagem é o grande número de bibliotecas de software disponíveis em C++, que podem ser utilizadas para acelerar o desenvolvimento de um projeto através do reuso de código, realizando as mais diversas tarefas como compactação de arquivos, exibição de gráficos, processamento de imagens, etc. Como a abordagem de orientação a objetos foi escolhida para a realização do projeto também foi fundamental escolher uma linguagem de programação orientada a objetos como C++, capaz de fornecer os mecanismos para a correta codificação de um projeto orientado a objetos, como herança, polimorfismo e encapsulamento (BUENO, 2003).

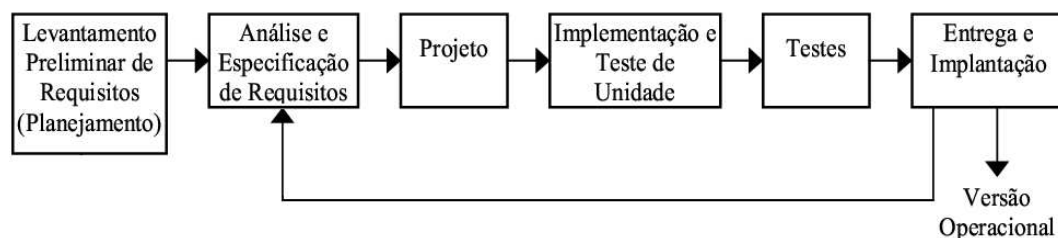


Figura B.1: O modelo incremental.

## B.1 Arquitetura do Sistema

### B.1.1 Núcleo do Produto

Define-se como *núcleo do produto* o resultado da primeira sequência do modelo de processo incremental, onde alguns requisitos básicos são satisfeitos, mas a maior parte das funcionalidades (algumas conhecidas, outras desconhecidas) não são implementadas. O núcleo funciona como um protótipo, ajudando a refinar a definição dos requisitos que serão incorporados na próxima sequência do processo.

O núcleo do produto do sistema será descrito em detalhes nesta seção, com o objetivo de facilitar a compreensão do sistema como um todo, uma vez que a arquitetura do sistema final tem as mesmas propriedades da arquitetura do núcleo, que por ser um subconjunto bem menor do todo pode ser descrito e analisado com mais facilidade.

Optou-se por um estilo arquitetural organizado através de uma hierarquia de controle, onde as classes superiores controlam classes abaixo delas na hierarquia. O sistema é particionado vertical e horizontalmente. O *particionamento horizontal* define ramos separados na hierarquia modular para cada função principal do programa, limitando a visibilidade do módulo que não pode se comunicar com ramos laterais, diminuindo assim o acopla-

mento em relação às outras funções principais do programa o que facilita a manutenção e a realização de testes, aumenta a flexibilidade e reduz a propagação de efeitos colaterais. O *particionamento vertical* indica que o trabalho é distribuído de maneira descendente na hierarquia, classes controladoras se responsabilizam pela tomada de decisões e realizam pouco processamento, enquanto as classes “operárias” realizam a maior parte do processamento. O particionamento vertical propicia a decomposição do problema em partes menores, reduzindo a complexidade do sistema e aumentando o reuso de código.

Durante a fase de análise especificou-se que o primeiro protótipo seria capaz de abrir e manipular imagens (classe image), que seriam mostradas em janelas móveis (classe MDIWindow) dentro de áreas de trabalho (classe AreaTrabalho). O usuário visualizaria as operações e informações relativas às imagens através de controles (classes InfoTabManager, BinaryToolsWidget e ImageToolsWidget) localizados à esquerda da área de trabalho, e também poderia manipular (classes BinImageListTabManager e ImageListTabManager) listas (classe MDIWindowListView) que mostrariam todas as imagens abertas pelo programa além de gerar janelas com gráficos e histogramas (classe MDIWindowPlotSetBinary e MDIWindowPlotSet2D) das imagens.

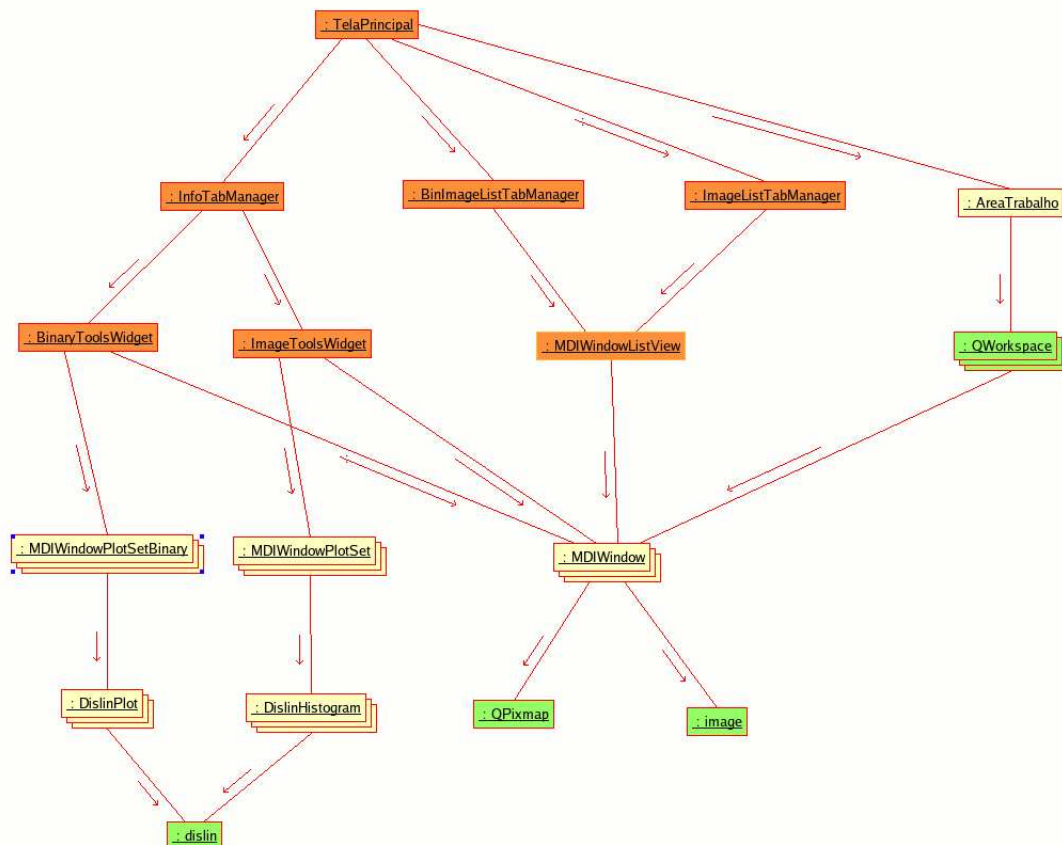


Figura B.2: Diagrama de colaboração do núcleo do produto. As classes controladoras estão em laranja, as classes operárias estão em amarelo e as verdes representam classes operárias pertencentes a bibliotecas externas.

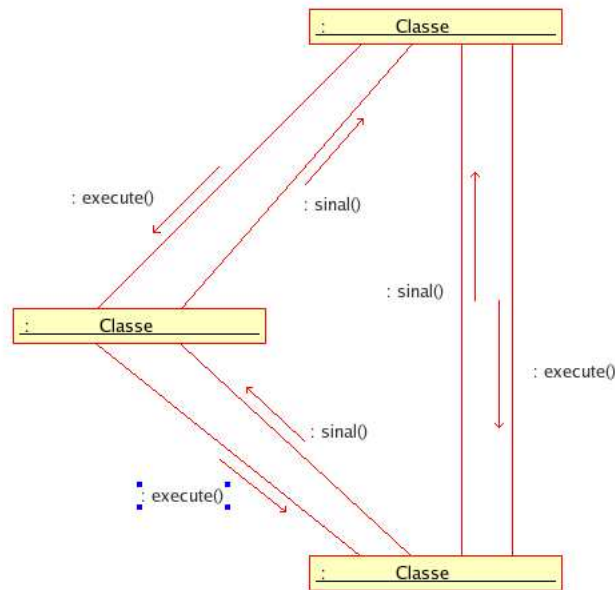


Figura B.3: Diagrama de colaboração mostrando a troca de mensagens entre objetos.

O diagrama de colaboração do núcleo (figura B.2) mostra como as classes controladoras, em laranja, se localizam no topo da hierarquia, enquanto as classes operárias na cor amarela se localizam na parte inferior do diagrama. A forma relativamente oval do diagrama mostra que o software possui algumas camadas de controle e módulos altamente utilitários nos níveis inferiores, o que é um indicador de um bom projeto arquitetural (PRESSMAN, 2002).

A comunicação entre as classes é realizada através de mensagens, que podem ser chamadas de métodos ou emissão de sinais. Classes controladoras se comunicam com suas subordinadas diretas ou indiretas através da chamada dos métodos das classes subordinadas, enquanto as classes subordinadas podem emitir sinais (eventos) que podem ser captados pelas classes controladoras. É importante ressaltar que uma classe subordinada não pode visualizar a classe controladora e ao emitir um sinal ela não espera nenhum tipo de resposta(o sinal pode até mesmo não ser captado por nenhuma classe) e por isso não possui nenhum tipo de acoplamento com os níveis superiores da hierarquia. Um sinal simplesmente avisa que uma mudança no estado interno de um objeto aconteceu, as instâncias das classes controladoras interessadas em captar os sinais de uma classe subordinada devem conectar seus métodos aos sinais da classe subordinada em tempo de execução.

De maneira geral, as classes das camadas de controle do software apresentam forte acoplamento (acoplamento de conteúdo) em relação às suas subordinadas e não foram projetadas com o objetivo de serem reutilizáveis, enquanto as classes operárias possuem um acoplamento mais brando em relação às suas subordinadas e foram projetadas para reutilização.

## B.2 Janelas MDI

Cerca de metade do trabalho de desenvolvimento do software foi investido na criação de classes de janelas MDI que implementam imagens, representações tridimensionais e gráficos. Estes componentes foram projetados para serem reutilizáveis e poderiam ser utilizados sem modificações em outro projeto de software.

### B.2.1 A classe `MDIWindowBase`

Esta classe se localiza no topo da hierarquia de herança das classes de janelas MDI (veja a figura B.4) e declara sinais e métodos virtuais que serão utilizados por todos os seus descendentes. As classes de janelas MDI realizam a integração entre classes localizadas em bibliotecas externas ao programa, implementando toda a lógica da interface relacionada com a manipulação e visualização de objetos como imagens, gráficos e modelos tridimensionais.

#### Sinais

Os sinais são a única forma de comunicação com classes localizadas em nodos superiores da hierarquia de controle, quando um sinal é emitido não existe garantia de que ele será capturado por alguma outra classe, a não ser que exista uma conexão explícita entre um método da classe interessada e o sinal da classe emissora, de forma que quando o sinal é emitido pela classe emissora o método correspondente é acionado na classe receptora. Segue-se uma breve descrição dos sinais emitidos pelas janelas MDI:

**`void destroyed (MDIWindowBase*)`** - emitido quando a janela é destruída. Exemplo de uso: as instâncias de listas captam estes sinais para determinar quando uma janela deve ser excluída da lista.

**`void canUndoChanged()`** - informa que o objeto mostrado na janela pode obtido ou perdido a capacidade de desfazer a última operação. Exemplo de uso: a classe `TelaPrincipal` capta este sinal para habilitar e desabilitar o botão de desfazer.

**`void message (const QString&, int )`** - envia uma mensagem de texto e o tempo que ela deve ser mostrada em milisegundos. Exemplo de uso: a classe `TelaPrincipal` capta este sinal e mostra a mensagem enviada na parte inferior esquerda da tela.

**`void changed (MDIWindowBase*)`** - indica que o estado interno do objeto foi alterado. Exemplo de uso: objetos que mostram atributos do objeto mostrado na janela precisam captar este sinal para poderem atualizar os atributos na tela.

## B.3 Sistema de Tradução

O sistema de tradução foi projetado para satisfazer os seguintes requisitos:

- extensibilidade - novas linguagens podem ser facilmente adicionadas ao software.



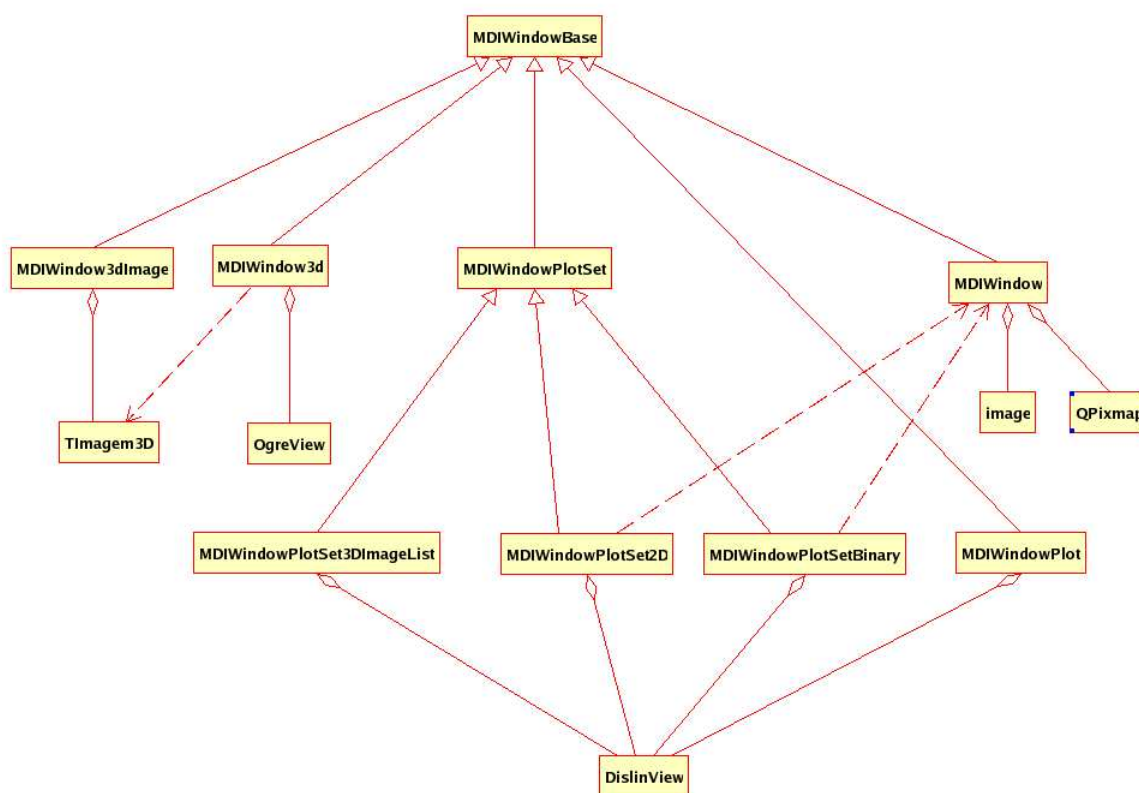


Figura B.4: Diagrama de classes para o pacote de janelas MDI.

- flexibilidade - o programa é capaz de trocar de idioma instantaneamente, sem precisar reiniciar.
- portabilidade - o sistema de tradução foi escrito em linguagem de scripts Lua e pode ser reutilizado em qualquer outro projeto de software e em qualquer plataforma.

O sistema se baseia na utilização de arquivos de tradução que contém todas as palavras e frases mostradas no programa. Os arquivos de texto em formato ASCII são armazenados no subdiretório `./text` que no momento contém os diretórios `./portugues` e `./english`. Cada classe possui o seu próprio arquivo de tradução, que é nomeado com o nome da classe seguido da extensão `.msg`. Quando uma classe é instanciada pela primeira vez, o seu arquivo de texto é carregado para a memória, onde permanece até o término do programa ou até que o usuário decida alterar a linguagem.

É possível adicionar uma nova linguagem através da criação de um novo diretório de arquivos de tradução, `./text/francais` por exemplo, onde serão colocados todos os arquivos `.msg`. Como estes arquivos são simples arquivos texto, um usuário sem nenhum conhecimento de programação pode realizar a tarefa de tradução. O único trabalho de programação associado à adição de uma nova linguagem é a associação de um botão da interface gráfica com a ativação da linguagem.

#### **Gramática BNF para arquivos de tradução:**

```
<lista_de_entradas> ::= <entradas> | <entrada> enter <lista_de_entradas>
<entrada> ::= {<numero_natural>} {<frase>}
```

#### **Exemplo:**

```
{100} {Permeability[mD]}
{100} {Permeabilidade[mD]}
```

## **B.4 Bibliotecas Utilizadas**

Uma biblioteca é uma coleção de objetos (funções, classes, objetos) agrupados em um único arquivo de código executável, que foram planejados, desenvolvidos e aprimorados para solucionar os problemas específicos de uma determinada área (BUENO, 2003). Sempre que uma biblioteca ou componente de software satisfizerem os requisitos do projeto, a sua aquisição é recomendável, pois quase sempre o custo de aquisição, treinamento e integração é menor do que o custo de desenvolvimento e manutenção de código equivalente. Outra vantagem é a maior confiabilidade, uma vez que estas bibliotecas foram exaustivamente testadas pelos seus milhares ou milhões de usuários.

Os critérios para seleção das bibliotecas utilizadas no projeto foram:

Requisitos do projeto - a biblioteca deveria satisfazer plenamente as necessidades do sistema a ser desenvolvido.

Qualidade da documentação - uma boa documentação é essencial para a correta utilização da biblioteca e a redução do tempo de treinamento.

Número de usuários - um grande número de usuários é indicativo da qualidade do software, além disso muitas vezes os grupos de discussão de usuários são fundamentais para resolver dúvidas e solucionar problemas específicos.

Licença de utilização - optou-se pela utilização de software livre, dando-se preferência à bibliotecas com código aberto, com licenças como a *General Public License* (GPL) ou licenças menos restritivas, como a *Lesser General Public License* (LGPL).

Multiplataforma - apenas bibliotecas com suporte a Linux e Windows foram selecionadas, a fim de possibilitar uma futura portabilização do SAIL para sistemas Windows.

### B.4.1 Ogre 3D

A biblioteca Ogre, *Objected Oriented Graphics Rendering Engine*, é uma biblioteca para desenho de gráficos em 3D que abstrai os detalhes de implementação das bibliotecas Direct3D e OpenGL (que acessam diretamente os drivers das placas gráficas), facilitando a geração e manipulação de cenas tridimensionais.

O SAIL utiliza o algoritmo *Marching Cubes* (LORENSEN; CLINE, 1987) para exibir as isosuperfícies dos modelos tridimensionais das rochas reconstruídas. O algoritmo *Marching Cubes* em C++ escrito para a Ogre foi cedido por Christian Larsen.

### B.4.2 LTI-Lib

A LTI-Lib, desenvolvida pelo Cômite de Ciência da Computação Técnica (*Lehrstuhl fuer Technische Informatik* ou LTI) da Universidade de Aachen, consiste de uma coleção de algoritmos e estruturas de dados comumente utilizadas em aplicações de análise de imagens e visão por computador. Escrita em C++ para permitir a programação orientação a objetos e a geração de código eficiente, a biblioteca fornece algoritmos de análise de imagens, estatísticos e matemáticos, permitindo uma troca eficiente de dados entre os seus módulos (ALVARADO et al., 2003).

### B.4.3 DISLIN

A biblioteca DISLIN, escrita por H. Michels, é uma ferramenta poderosa e bastante flexível para geração de gráficos. A biblioteca contém subrotinas e funções para visualização gráfica de dados como curvas, gráficos de barras, gráficos 3D, superfícies, contornos e mapas. Apesar de não ter código aberto, a DISLIN foi escolhida por ser compatível com diversas plataformas, por sua capacidade de gerar arquivos de saída nos mais diversos formatos e pela possibilidade de utilizar janelas da interface gráfica da biblioteca Qt como dispositivo de saída.

## B.4.4 Lua

A linguagem de automação (*scripting*) Lua (IERUSALIMSCHY; FIGUEIREDO; CELES, 2006) foi desenvolvida pelo Tecgraf, o Grupo de Tecnologia em Computação Gráfica da PUC-Rio, a partir de 1993 como resultado de um projeto realizado para a Petrobrás. O objetivo principal da linguagem é estender outras aplicações, permitindo que scripts criados por usuários ou programadores possam interagir com o núcleo (*engine*) da aplicação e proporcionando ao mesmo tempo diversas construções e funções próprias de uma linguagem de programação.

No futuro scripts Lua poderão ser utilizados para permitir customização de funções e a realização de operações em massa através de scripts que acessariam funções internas do software, seguindo o exemplo de outros programas que também utilizam scripts (GnuPlot, Matlab, Fallout, Baldur's Gate).

O sistema de tradução e configuração do SAIL utiliza scripts Lua, devido às facilidades oferecidas pela linguagem para a manipulação de *strings*, como a detecção de expressões regulares, utilizadas para verificar a correção sintática e identificar construções em arquivos de configuração que utilizam gramáticas simples.

## B.5 Compilando e Instalando as Bibliotecas

### B.5.1 Biblioteca LTI-LIB

1. Baixar a biblioteca no site <http://ltilib.sourceforge.net/doc/homepage/index.shtml>

2. Descompactar a biblioteca

```
tar -xvzf 051124_ltilib-1.9.15.tar.bz2
```

3. Instalar a versão do Linux

```
cd ltilib/linux
```

4. Executar os comandos descritos em README, resumidamente:

```
make -f Makefile.cvs
./configure
make
make install
```

Nota: O pacote é instalado dentro de: `/usr/local/include/ltilib-1.9.15`, `/usr/local/lib/ltilib-1.9.15`. Script de configuração dentro de `/usr/local/bin`.

## B.5.2 Biblioteca DISLIN

1. Baixar a biblioteca no site <http://www.mps.mpg.de/dislin/> ou <http://www.mps.mpg.de/dislin/amd64.html>

2. Descompactar a biblioteca

3. Mude para o diretório criado

```
cd dislin-9.0
```

4. Executar os comandos descritos em README, resumidamente:

```
su - ## muda para root
DISLIN=/usr/local/dislin
export DISLIN
./INSTALL
```

5. Precisa incluir a dislin na path, e na path das bibliotecas

Abre arquivo `~/.bash_profile`.

```
export DISLIN=/usr/local/dislin
export PATH=${PATH}:${DISLIN}/bin
export LD_LIBRARY_PATH=$DISLIN:$LD_LIBRARY_PATH
```

**Dica:** Se você baixou a versão rpm, use: `rpm -i dislin-9.0.linux.rpm`

## B.5.3 Biblioteca Ogre 3D

A biblioteca de visualização Ogre 3D, requer a instalação de alguns pacotes adicionais, veja

<ogrenew/Docs/README.linux> (detalhes a seguir).

1. Baixar a biblioteca no site

```
http://www.ogre3d.org/index.php?option=com\_content&task=blogsection&id=1&Itemid=85
```

2. Descompactar a biblioteca

3. Ler a documentação <ogrenew/Docs/README.linux>

4. Executar os comandos descritos em README, resumidamente:

```
./configure
make
make install
```

**Nota:** Ao rodar a versão compilada reclamou da falta da libOgreMain.so.11.5, ao verificar o diretório /usr/local/lib/ verifiquei que a versão que instalei é /usr/local/lib/libOgreMain.so.11.0.0, para resolver, simplesmente criei um link

```
cd /usr/local/lib
ln -s /usr/local/lib/libOgreMain.so.11.0.0 libOgreMain.so.5
```

**Nota:** A biblioteca foi instalada em: /usr/local/lib/libOgreMain.la, /usr/local/include/OGRE/

## B.5.4 Biblioteca zziplib

1. Baixar a biblioteca em

[http://sourceforge.net/project/showfiles.php?group\\_id=6389](http://sourceforge.net/project/showfiles.php?group_id=6389),

2. Compilar e instalar.

3. Precisa configurar a variável de ambiente abaixo (também colocar em .bash\_profile)

```
export PKG_CONFIG_PATH=${PKG_CONFIG_PATH}:/usr/local/lib/pkgconfig/
```

## B.5.5 Biblioteca DevIL

1. Baixar a biblioteca em

[http://prdownloads.sourceforge.net/openil/DevIL-1.6.7.tar.gz?use\\_mirror=ufpr](http://prdownloads.sourceforge.net/openil/DevIL-1.6.7.tar.gz?use_mirror=ufpr)

2. Configurar e instalar

```
./configure
make
make install
```

**Dica:** instalou em /usr/local/include/IL/il.h

## B.5.6 Biblioteca da nvidia

1. Vá ao site [http://developer.nvidia.com/object/cg\\_toolkit.html](http://developer.nvidia.com/object/cg_toolkit.html), e baixe o arquivo para sua plataforma:

```
Cg_Linux.tar.gz
Cg-1.4.0-4.i386.rpm
Cg-1.4.0-4.x86_64.rpm <--OK
CG_UserManual_1-4.pdf
```

## B.5.7 Biblioteca LUA

1. Vá ao site <http://www.lua.org>, baixe o arquivo `lua5_1_sources.tar.gz`

```
tar -xvzf lua5_1_sources.tar.gz
cd lua
make linux
make install
```

# Livros Grátis

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

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

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

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)



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