

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
DEPARTAMENTO DE INFORMÁTICA E ESTATÍSTICA**

André Ferreira Bem Silva

**CARACTERIZAÇÃO DO ESPAÇO POROSO EM ROCHAS POR
ESFERAS MÁXIMAS EXATAS**

Florianópolis

2012

André Ferreira Bem Silva

**CARACTERIZAÇÃO DO ESPAÇO POROSO EM ROCHAS POR
ESFERAS MÁXIMAS EXATAS**

Caracterização do Espaço Poroso em Rochas por Esferas Máximas Exatas submetido ao Programa de Pós-graduação em Ciência da Computação para a obtenção do Grau de Mestre em Ciências da Computação.

Orientador: Eros Comunello, Prof. Dr. rer. nat.

Florianópolis

2012

Catálogo na fonte pela Biblioteca Universitária
da
Universidade Federal de Santa Catarina

S586c Silva, André Ferreira Bem

Caracterização do espaço poroso em rochas por esferas máximas exatas [dissertação] / André Ferreira Bem Silva ; orientador, Eros Comunello. - Florianópolis, SC, 2012. 153 p.: il., grafs.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação.

Inclui referências

1. Informática. 2. Ciência da computação. 3. Escoamento. 4. Rochas. 5. Porosidade. I. Comunello, Eros. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação. III. Título.

CDU 681


André Ferreira Bem Silva

**CARACTERIZAÇÃO DO ESPAÇO POROSO EM ROCHAS POR
ESFERAS MÁXIMAS EXATAS**

Esta Caracterização do Espaço Poroso em Rochas por Esferas Máximas Exatas foi julgado aprovado para a obtenção do Título de “Mestre em Ciências da Computação”, e aprovado em sua forma final pelo Programa de Pós-graduação em Ciência da Computação.

Florianópolis, 05 de março 2012.

Ronaldo dos Santos Mello, Prof. Dr.
Coordenador



Eros Comunello, Prof. Dr. rer. nat.
Orientador

Banca Examinadora:

Aldo von Wangenheim, Prof. Dr. rer. nat.
Presidente



Celso Peres Fernandes, Prof. Dr.

Rodrigo Surmas

Rodrigo Surmas, Dr. Eng.

Aos meus pais, Laura e Pedro. Aos meus avós,
Osvaldo e Ana e à Samanta, com todo meu
amor.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Eros Comunello pela orientação,
Ao Prof. Aldo von Wangenheim pelo espaço físico e equipamentos,
Aos meus colegas de laboratório. Sem exceção,
Aos meus familiares,
Aos meus amigos,
A todos que contribuíram direta ou indiretamente para esse trabalho.

"Education is a system of imposed ignorance"
"A educação é um sistema de ignorância im-
posta"(tradução livre)

Noam Chomsky

RESUMO

Neste trabalho, uma modificação ao algoritmo de *esferas máximas* (MB) é proposto. Essa abordagem recebe o nome de *esferas máximas exatas* (EMB), por utilizar os raios exatos ao invés de duas aproximações. Tal mudança, traz consequências para o resultado final, definindo de forma mais detalhada a estrutura interna do espaço poroso, gerando cinquenta por cento mais poros e gargantas. Dessa forma, a rede gerada de modo exato é comparada a rede original, em características básicas e nas simulações de escoamento monofásico, obtendo-se resultados bem correlacionados e em mesma escala de grandeza para ambas, apesar de diferentes. Muitas otimizações para paralelização e dados comprimidos são propostas e o algoritmo exato, mesmo processando mais esferas, é de duas a seis mais rápido para todos os casos de estudo.

Palavras-chave: volume, microtomografia, espaço poroso, escoamento, rede de poros, rocha

ABSTRACT

In this work a maximum balls (MB) modification is presented. This novel approach receives the name of exact maximum balls (EMB) because it uses one exact radius instead of two approximations. Therefore, there are consequences to the generated pore network which is found out to define the pore space with at least fifty percent more detail, that is, pores and throats. That way, the exact pore network is compared with the original and it is discovered that there is a strict correlation between their results and that these are always of the same magnitude, although different. Also, a lot of optimizations to process compressed data and to allow data parallelization are shown and the EMB pore network extraction is, in every test case, consistently faster than MB. The obtained speedup was from two up to six times.

Keywords: volumn, microtomography, pore space, transport prediction, pore network, rock

SUMÁRIO

Lista de Tabelas	
Lista de Figuras	
Lista de Algoritmos	25
1 INTRODUÇÃO	27
1.1 CONTEXTO	27
1.2 OBJETIVOS	30
1.2.1 Objetivo geral	30
1.2.2 Objetivos específicos	30
1.3 A RESPEITO DA LEITURA DESTES TRABALHOS	31
2 REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA	33
2.1 IDENTIFICAÇÃO DA PESQUISA E SELEÇÃO DOS ESTUDOS	33
2.1.1 Critérios de inclusão	33
2.1.2 Critérios de exclusão	34
2.2 ESTADO DA ARTE	34
2.2.1 Métodos do eixo médio	34
2.2.2 Método baseado em processos	35
2.2.3 Esferas máximas	37
2.3 MÉTODO	38
3 PROCESSAMENTO E ANÁLISE DE DADOS MICROTOMO-GRÁFICOS DE ROCHA	41
3.1 AQUISIÇÃO DE DADOS	41
3.1.1 Porosimetria por injeção de mercúrio	41
3.1.2 Microtomografia computadorizada	42
3.2 BINARIZAÇÃO DO VOLUME DE DADOS	43
3.3 FILTRAGEM E TRATAMENTO	45
3.4 COMPRESSÃO RLE	47
3.5 VOLUMES	48
3.6 CONCLUSÃO	51
4 EXTRAÇÃO DE REDE DE POROS POR ESFERAS MÁXIMAS EXATAS	53
4.1 BUSCA DE ESFERAS	53
4.1.1 Algoritmo de inflar esferas	53
4.1.2 Mapa de distâncias exatas	55
4.2 REMOÇÃO DE ESFERAS	60
4.3 AGLOMERAÇÃO	64
4.4 GERAÇÃO DA RP	67
4.5 ESTRUTURAS COMPRIMIDAS	70

4.6	CONCLUSÃO	71
5	PROPRIEDADES DA REDE E CÁLCULOS DE TRANSPORTE	75
5.1	ESTUDO DE CASO S1	75
5.1.1	Número de coordenação	78
5.1.2	Poros	79
5.1.3	Gargantas	81
5.2	ESTUDO DE CASO C1	84
5.2.1	Número de coordenação	86
5.2.2	Poros	87
5.2.3	Gargantas	88
5.3	DEMAIS ARENITOS	92
5.4	ROCHA C2	97
5.5	ESCOAMENTO MONOFÁSICO E PROPRIEDADES PETRO-FÍSICAS	99
5.5.1	Fator de forma	99
5.5.2	Permeabilidade absoluta	102
5.5.3	Fator de formação	104
5.5.4	Resultados	105
5.6	CONCLUSÃO	110
6	CONCLUSÃO	115
6.1	REFLEXÕES CONCLUSIVAS	115
6.2	TRABALHOS FUTUROS	118
6.2.1	Otimizações em cpu e gpu	118
	Aglomeración	118
	Busca de esferas vizinhas	119
	Estruturas comprimidas em gpu	120
	Busca de esferas em gpu	120
	Utilização de ponto fixo ao invés de ponto flutuante	121
6.2.2	Validação com outras técnicas e estudo de variáveis de entrada e saída	121
6.2.3	Tratamento de dados multiescalares e volumes grandes	122
6.3	RECONHECIMENTOS E AGRADECIMENTOS	122
	Referências Bibliográficas	125
7	APÊNDICE A: FORMATO RBV E RESULTADOS	131
7.1	FORMATO RBV	131
7.2	VALORES PARA DEMAIS VOLUMES	131
7.2.1	Números de coordenação	139
7.3	ESCOAMENTO MONOFÁSICO NAS REDES EMB E MB NOS EIXOS Y E Z	145
7.4	PARÂMETROS PARA O SIMULADOR	145

LISTA DE TABELAS

Tabela 2	Imagens de seções transversais dos volumes de entrada, com suas dimensões, porosidades e resoluções. A fase poro está em branco . .	49
Tabela 3	Características da RP, no EMB e MB, para o volume S1	76
Tabela 4	Características da RP, no EMB e MB, para o volume C1	85
Tabela 5	Características da RP, no EMB e MB, para o volume S2	93
Tabela 6	Características da RP, no EMB e MB, para o volume S3	94
Tabela 7	Características da RP, no EMB e MB, para o volume S5	95
Tabela 8	Características da RP, no EMB e MB, para o volume A1	96
Tabela 9	Características da RP, no EMB e MB, para o volume C2	98
Tabela 10	Tabela de valores dos fatores de formação e permeabilidades para o EMB. Fator de expansão 0.5	107
Tabela 11	Tabela de valores dos fatores de formação e permeabilidades para o EMB. Fator de expansão 0.6	107
Tabela 12	Tabela de valores dos fatores de formação e permeabilidades para o EMB. Fator de expansão 0.7	108
Tabela 13	Tabela de valores dos fatores de formação e permeabilidades para o EMB. Fator de expansão 0.8	108
Tabela 14	Tabela de valores dos fatores de formação e permeabilidades para o MB	109
Tabela 15	Tabela de valores dos fatores de formação e permeabilidades para o MB. Valores obtidos diretamente da tese de Dong e Blunt (2007) .	109
Tabela 16	Tabela que apresenta a razão do resultado obtido pela simulação na rede EMB pela rede MB para diferentes fatores de expansão, no eixo x	110
Tabela 17	Tabela que apresenta a razão do resultado obtido pela simulação na rede EMB em relação aos resultados do trabalho de Dong e Blunt (2007) para diferentes fatores de expansão, no eixo x	112
Tabela 18	Características da RP, no EMB e MB, para o volume S4	132
Tabela 19	Características da RP, no EMB e MB, para o volume S6	133
Tabela 20	Características da RP, no EMB e MB, para o volume S7	134
Tabela 21	Características da RP, no EMB e MB, para o volume S8	135
Tabela 22	Características da RP, no EMB e MB, para o volume S9	136
Tabela 23	Características da RP, no EMB e MB, para o volume S10	137
Tabela 24	Características da RP, no EMB e MB, para o volume S11	138

Tabela 25 Tabela que apresenta a razão do resultado obtido pela simulação na rede EMB em relação aos resultados do trabalho de Dong e Blunt (2007) para diferentes fatores de expansão, no eixo y..... 146

Tabela 26 Tabela que apresenta a razão do resultado obtido pela simulação na rede EMB em relação aos resultados do trabalho de Dong e Blunt (2007) para diferentes fatores de expansão, no eixo z..... 147

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Exemplo de parte do espaço poroso (em branco) em uma amostra microtomográfica de rocha carbonática de dimensões 400x400x100..	28
Figura 2	Rede de poros para uma amostra de rocha carbonática. Observe-se a irregularidade nos tamanhos e conexões dos poros e gargantas resultantes.	29
Figura 3	Função de transferência utilizada para visualização da rede	30
Figura 4	Figura que demonstra os resultados para extração do eixo médio em uma amostra de rocha. Schena e Favretto (2006)	35
Figura 5	Corte transversal de uma amostra de arenito do Mar do Norte, do trabalho de Oren e Bakke (2002)	36
Figura 6	Exemplo de configuração para descoberta de poros e gargantas, por Hu Dong (DONG; BLUNT, 2007)	37
Figura 7	Visão geral do algoritmo de esferas máximas	38
Figura 8	Todas as esferas, não contidas em nenhuma outra, que representam a distância até o voxel não poro mais próximo.	39
Figura 9	Configuração de porosimetria por injeção de mercúrio e uma amostra real.	42
Figura 10	Obtenção das imagens e pipeline de processamento típico para amostras de rocha, por Fernandes, Appoloni e Fernandes (2009)	43
Figura 11	Amostra de arenito e os histogramas referentes	46
Figura 12	Imagem binarizada, onde i representa as linha e j as colunas	47
Figura 13	Espaço absoluto, em MB, dos RBVs e RAWs.	50
Figura 14	Espaço, em porcentagem, dos RBVs e RAWs	51
Figura 15	Configurações de intersecção com pixel rocha em cinza e raios em várias cores. O esquema de Dong e Blunt (2007) (direita) e o esquema com esferas de tamanho exato (esquerda)	54
Figura 16	Tempo total de execução, em segundos, discriminando as etapas do algoritmo de Dong e Blunt (2007), para várias entradas	55
Figura 17	Esferas quadráticas após a aplicação da transformação 1D, da esquerda para direita (figura esq.) e da direita para esquerda (figura dir.)	57
Figura 18	Exemplo de transformação do algoritmo de Saito, para uma iteração do algoritmo sobre o elemento destacado na coluna G, cujo resultado modifica H.	58
Figura 19	Tempos de execução para busca de esferas por mapa de dis-	

tâncias, single thread (ST) e multithread (MT), em segundos, na máquina M1, para os dados de entrada em versões comprimidas ou não	59
Figura 20 Ganho de performance do mapa de distâncias exatas em relação ao algoritmo de inflar esferas de Dong. Escala logarítmica	60
Figura 21 Tempos de execução para a remoção de esferas contidas em outras maiores	62
Figura 22 Exemplo de caso de remoção de esferas	62
Figura 23 Esferas encontradas na etapa de busca e o número de esferas removidas, por EMB e por MB	63
Figura 24 Volume de exemplo e as árvores hierárquicas geradas para os dois poros com uma garganta G_1 ligando-os	64
Figura 25 Expansão de gargantas, conforme proposto por Dong. Nesse caso, o fator E_f de expansão é de 70%	66
Figura 26 Número de poros e gargantas gerados pelo MB e pelo EMB	67
Figura 27 Porcentagem de voxels inválidos, em relação ao total de voxels, no final do processo para ambos os algoritmos de esferas máximas.	68
Figura 28 Número de <i>inlets</i> e <i>outlets</i> gerados pelo MB e pelo EMB	68
Figura 29 Definição de <i>inlets</i> (esq.) e <i>outlets</i> (dir.), conforme proposto por Al-Kharusi e Blunt (2007)	70
Figura 30 Tempo levado, em cada etapa do EMB, para volumes diversos. O Fator E_f de expansão é 50%	72
Figura 31 Tempo levado, em cada etapa do EMB, para volumes diversos. O Fator E_f de expansão é 80%	73
Figura 32 Rede gerada pelo EMB para o volume S1	76
Figura 33 Frequência do número de coordenação nos algoritmos EMB e MB para o volume S1	78
Figura 34 Distribuição de raios de poros para ambos algoritmos. Fatores de expansão 50%, 60%, 70% e 80% para o EMB	79
Figura 35 Frequência dos volumes dos poros para as redes EMB e MB do volume S1. A última faixa engloba todos os valores maiores que quatro vezes a média	80
Figura 36 Distribuição de comprimentos das gargantas para ambos algoritmos no S1. Fatores de expansão 50%, 60%, 70% e 80% para o EMB	81
Figura 37 Distribuição de raio das gargantas para ambos algoritmos no S1. Fatores de expansão 50%, 60%, 70% e 80% para o EMB	82
Figura 38 Razão do comprimento da garganta pelo raio da mesma no volume S1. A última faixa são os valores maiores que quatro vezes a média	83

Figura 39	Frequência dos volumes das gargantas para o volume S1. A última faixa são os valores maiores que quatro vezes a média	84
Figura 40	Rede gerada para o volume C1	85
Figura 41	Frequência do número de coordenação nos algoritmos EMB e MB para o volume C1	87
Figura 42	Distribuição de raios de poros para ambos algoritmos no volume C1. Fatores de expansão 50%, 60%, 70% e 80% para o EMB	88
Figura 43	Frequência dos volumes dos poros para as redes EMB e MB do volume C1. A última faixa engloba todos os valores maiores que quatro vezes a média	89
Figura 44	Distribuição de comprimentos das gargantas no volume C1. Fatores de expansão 50%, 60%, 70% e 80% para o EMB	89
Figura 45	Distribuição de comprimentos das gargantas para ambos algoritmos. Fatores de expansão 50%, 60%, 70% e 80% para o EMB	90
Figura 46	Razão do comprimento da garganta pelo raio da mesma no volume C1. A última faixa são os valores maiores que quatro vezes a média	91
Figura 47	Frequência dos volumes das gargantas para o volume C1. A última faixa são os valores maiores que quatro vezes a média	91
Figura 48	Rede gerada para o volume S2	93
Figura 49	Rede gerada para o volume S3	94
Figura 50	Rede gerada para o volume S5	95
Figura 51	Rede gerada para o volume A1	96
Figura 52	Rede gerada para o volume C2	98
Figura 53	Determinação da geometria mais próxima a um determinado objeto a partir do fator de forma	100
Figura 54	Frequência do fator de forma para o volume S1	101
Figura 55	Frequência do fator de forma para o volume C1	101
Figura 56	Configuração poro-garganta-poro onde a região cinza é a região de cálculo do fluxo $Q_{p,ij}$	103
Figura 57	Fatores de forma F_x para as redes EMB e MB	111
Figura 58	Permeabilidades K_x , em mD , para as redes EMB e MB	112
Figura 59	Permeabilidades K_x , em mD , para as redes EMB e o resultado original de Dong e Blunt (2007)	113
Figura 60	Fatores de forma F_x para as redes EMB e o resultado original de Dong e Blunt (2007)	114

Figura 61	Valores em milhares de esferas processadas por segundo, durante a execução do EMB e MB no eixo x . A linha pontilhada é a média global	116
Figura 62	Rede gerada para o volume S4	132
Figura 63	Rede gerada para o volume S6	133
Figura 64	Rede gerada para o volume S7	134
Figura 65	Rede gerada para o volume S8	135
Figura 66	Rede gerada para o volume S9	136
Figura 67	Rede gerada para o volume S10	137
Figura 68	Rede gerada para o volume S11	138
Figura 69	Distribuição do número de coordenação para o EMB e MB no volume C2	139
Figura 70	Distribuição do número de coordenação para o EMB e MB no volume S2	140
Figura 71	Distribuição do número de coordenação para o EMB e MB no volume S3	140
Figura 72	Distribuição do número de coordenação para o EMB e MB no volume S4	141
Figura 73	Distribuição do número de coordenação para o EMB e MB no volume S5	141
Figura 74	Distribuição do número de coordenação para o EMB e MB no volume S6	142
Figura 75	Distribuição do número de coordenação para o EMB e MB no volume S7	142
Figura 76	Distribuição do número de coordenação para o EMB e MB no volume S8	143
Figura 77	Distribuição do número de coordenação para o EMB e MB no volume S9	143
Figura 78	Distribuição do número de coordenação para o EMB e MB no volume S10	144
Figura 79	Distribuição do número de coordenação para o EMB e MB no volume S11	144
Figura 80	Distribuição do número de coordenação para o EMB e MB no volume A1	145
Figura 81	Permeabilidades K_y , em mD , para as redes EMB e o resultado original de Dong e Blunt (2007)	146
Figura 82	Fatores de forma F_y para as redes EMB e o resultado original	

de Dong e Blunt (2007)	147
Figura 83 Permeabilidades K_z , em mD , para as redes EMB e o resultado original de Dong e Blunt (2007).....	148
Figura 84 Fatores de forma F_z para as redes EMB e o resultado original de Dong e Blunt (2007)	148

LISTA DE ALGORITMOS

1	Obtenção do valor de thresholding automático	44
2	Transformação 1D no sentido <i>frente</i> , conforme proposta por Lotufo, Falcao e Zampiroli (2000)	56
3	Execução no sentido <i>frente</i> do algoritmo de Saito para a coluna G	59
4	Descobre se S_0 está contido em S_1	61
5	Obtém todos os valores de uma linha do volume, iterando por segmento	71

1 INTRODUÇÃO

Nesse capítulo ficam esclarecidos os conceitos e trabalhos importantes, sobre os quais esse trabalho é construído. Também, especificam-se as metas almejadas e os resultados obtidos por outros trabalhos da literatura que partilham de objetivos mútuos com esse trabalho.

1.1 CONTEXTO

Existe uma grande quantidade de *hidrocarbonetos* os quais estão contidos *rochas carbonáticas* (JONES, 1984). O *espaço poroso* de rochas carbonáticas é altamente irregular devido a sua formação complexa (ROBERT; CORDELL, 1992). A morfologia, a geometria e a topologia dos do espaço poroso tem grande influência sobre as características gerais da rocha em questão e o comportamento de fluidos e gases dentro dessa (LUCIA, 1999). Um exemplo de amostra carbonática, binarizada, com espaço poroso representado pela cor branca e a rocha em preto, pode ser visto na figura 1.

A indústria petrolífera tem evoluído bastante no sentido de recuperar hidrocarbonetos contidos nas reservas carbonáticas e existe uma demanda para técnicas e representações computacionais as quais representem de forma preditiva a complexa dinâmica de fluidos computacionais e gases no espaço poroso. Valores como *permeabilidade absoluta*, *permeabilidade relativa* e *pressão capilar* são importantes de serem avaliados quanto à extração de hidrocarbonetos, principalmente com relação a *recuperação aprimorada de petróleo*.

É possível extrair, dos dados microscópicos brutos, o comportamento de um determinado fluido invadindo e escoando pelo espaço poroso. Uma maneira, é utilizar-se de um método computacional que represente as interações de conectividade macroscópicas e o *escoamento do fluido* diretamente no volume bruto. O *método de Lattice-Boltzmann* (LBM) (CHEN; DOOLEN, 1998), é capaz de descobrir tal dinâmica para um dado volume. Contudo, esse método é computacionalmente custoso, mesmo para simulações com somente uma fase. Se levado em consideração simulações multi-fases, o método torna-se proibitivamente lento, podendo levar semanas para obter-se um resultado, mesmo para volumes pequenos. Assim, faz-se necessário técnicas diferentes para obter-se resultados em tempo hábil (FAN et al., 2004; BERNASCHI et al., 2010).

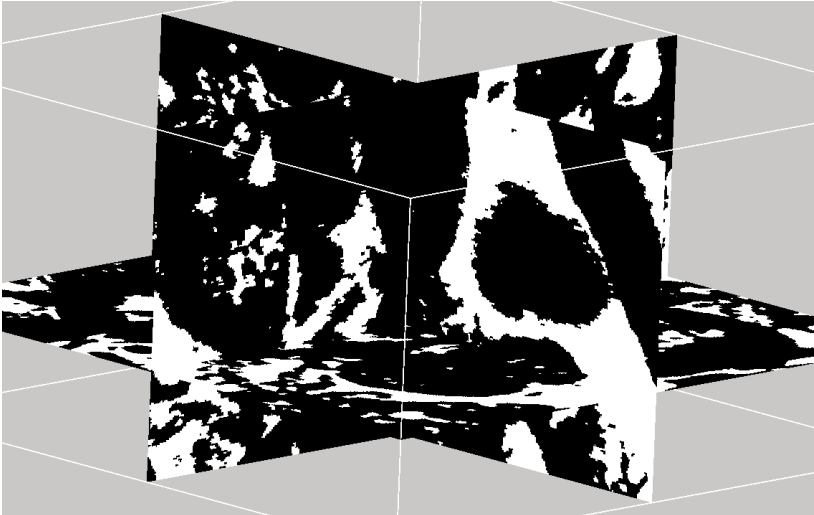


Figura 1: Exemplo de parte do espaço poroso (em branco) em uma amostra microtomográfica de rocha carbonática de dimensões 400x400x100

No trabalho de Fan et al. (2004), descreve-se para o LBM um tempo por passo de 310 milissegundos. Como o passo utilizado é tipicamente um milésimo, isso significa que para simular um segundo tem-se um tempo de 310 segundos. Considera-se que uma simulação interessante necessite de ao menos algumas dezenas de segundos, tem-se que o tempo para fazê-la cresce bastante. Assim, tem-se a necessidade de técnicas alternativas para previsão e simulação de escoamento em tempo hábil.

Fatt (1956) criou um modelo de representação dos reticulados formados pelas relações poro-garganta-poro em duas dimensões. Pelo fato do modelo representar somente cortes transversais, a conectividade final era inferior ao encontrada em amostras reais. Ainda assim, o autor era capaz de fazer cálculos de escoamento e de distribuição de poros e gargantas sobre a rede.

Chatzis e Dullien (1977) ampliaram o modelo para três dimensões. Eles tentavam aproximar a estrutura interna do arenito com reticulados regulares. Tal abordagem foi também utilizada mais tarde para a criação de arenito por métodos estocásticos para representação de arenitos (BAKKE; OREN, 1997; LERDAHL; OREN; BAKKE, 2000).

Rochas homogêneas possuem estruturas conhecidamente regulares e portanto representá-los por métodos estocásticos tem bons resultados. O mesmo não acontece para as rochas heterogêneas, pois sua irregularidade e variabilidade são bem maiores quando comparadas as primeiras. As rochas

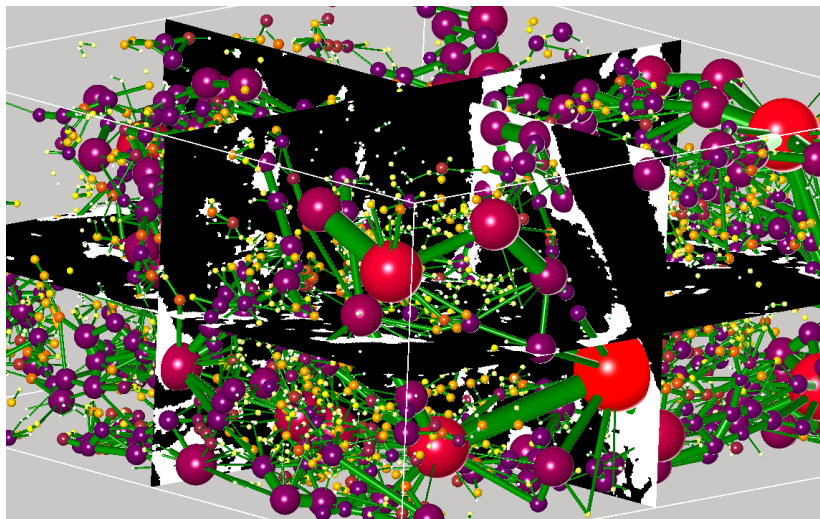


Figura 2: Rede de poros para uma amostra de rocha carbonática. Observa-se a irregularidade nos tamanhos e conexões dos poros e gargantas resultantes

carbonáticas heterogêneas, por exemplo, são fruto de complexos processos diagenéticos químicos e biológicos, os quais as transformam. A modelagem dessas é mais complexa e métodos recentes atuam direto sobre o volume binarizado, na tentativa de extrair uma rede de poros e gargantas, onde regiões de acúmulo de fluido são identificadas como sendo poro e regiões estreitas entre dois poros são definidos como sendo gargantas (AL-KHARUSI; BLUNT, 2007; DONG; BLUNT, 2007; SCHENA; FAVRETTO, 2006).

Existem algoritmos os quais geram uma rede de poros a partir de um dado volume tomográfico de rocha. Entre eles estão o *método baseado em processos* (PB) (OREN; BAKKE, 2002), *extração rápida de rede* (SCHENA; FAVRETTO, 2006) e *esferas máximas* (MB) (DONG; BLUNT, 2007; AL-KHARUSI; BLUNT, 2007). A partir desses, pode-se obter uma representação a partir do volume inicial que represente o volume de rocha, sendo que o algoritmo *esferas máximas* foi criado especificamente para representar rochas carbonáticas, de difícil representação por métodos estocásticos anteriores. A figura 2, demonstra a rede final gerada pelo algoritmo para uma amostra de rocha carbonática. A complexidade e irregularidade é evidenciada pela grande população de poros e gargantas pequenos e mal conectados em contraste com poucos desses elementos grandes e bem conectados. Na figura 3, apresenta-se a função de transferência utilizada na visualização da rede. Apesar de não tradicional, essa função foi usada por apresentar de equivalente poros peque-

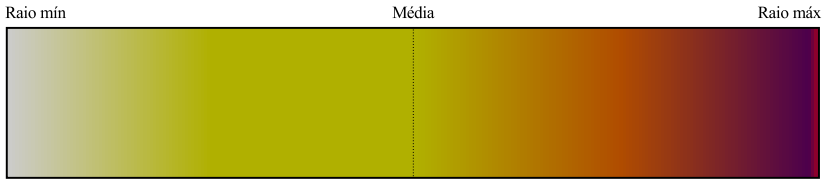


Figura 3: Função de transferência utilizada para visualização da rede

nos e grandes. Portanto, é possível ver de maneira nítida poros pequenos e grandes, pelo fato de apresentarem cores bastante diferentes e contrastantes. A função de transferência é editável e tal visualização pode ser facilmente adaptada.

Recentes avanços em microtomografia tornam as técnicas de extração rápida melhores e mais próximas dos valores amostrados por técnicas laboratoriais. A resolução da imagem influencia diretamente na qualidade da rede extraída, e portanto na precisão da simulação (DONG; BLUNT, 2007; AL-KHARUSI; BLUNT, 2007; SCHENA; FAVRETTO; PILLER, 2008). Também, a utilização de múltiplas resoluções e escalas diferentes tem constituído um desafio na caracterização do espaço poroso.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral desse trabalho é propor uma metodologia automatizada para extrair-se a rede de poros e gargantas de uma amostra microtomográfica binarizada de rocha, seja ela carbonática ou arenítica, homogênea ou heterogênea. Esse método deve ser paralelizável e utilizar de técnicas para diminuir o consumo de memória. A rede gerada deve representar o espaço poroso e portanto deve possuir uma precisão *aceitável* com relação a dados já conhecidos das amostras utilizadas.

1.2.2 Objetivos específicos

1. Implementar um algoritmo de extração de redes de poros e gargantas que seja capaz de extrair uma rede de poros e gargantas a partir de uma amostra de rocha, inclusive amostras heterogêneas.

2. Detectar pontos passíveis de otimização computacional e de memória no algoritmo original, incluindo os gargalos para ambos. Também, detectar possíveis falhas do algoritmo original e modificá-lo conforme necessário.
3. Implementar as otimizações de memória e de tempo computacional cujos impactos sejam maiores no resultado final. Os pontos principais serão os gargalos identificados anteriormente.
4. Detectar pontos paralelizáveis nas etapas do algoritmo. Implementar as paralelizações e verificar o ganho de performance em relação a versão original. A etapa só é considerada *rápida* se tão eficiente quanto ao menos uma outra técnica capaz de executar o mesmo volume.
5. Comparar o tempo de execução e os resultados obtidos da versão modificada dos algoritmos com os resultados da implementação original, comentando as diferenças entre eles.
6. Utilizar a rede extraída para calcular distribuições de raio e comprimento para poros e gargantas. Também, devem ser extraídos resultados de fator de formação e permeabilidade absoluta para caracterizar-se o escoamento monofásico pela rede. Por fim, devem ser verificados possíveis diferenças dos resultados obtidos com relação aos originais, traçando paralelos. Só considera-se como *aceitáveis* os valores que estiverem na mesma escala de grandeza.

1.3 A RESPEITO DA LEITURA DESTE TRABALHO

Nesta seção são definidas as convenções de nomes e de notações utilizadas nesse trabalho. Por exemplo, os termos *cpu* e *gpu* são utilizados na forma minúscula e sem itálico porque visa-se facilitar a leitura do texto e diminuir a atenção para termos tão utilizados. Os termos *cluster*, *grid*, *threshold* e *engine* são mais utilizados que suas traduções para a língua portuguesa, agregado, grade, limiar e motor, respectivamente e, portanto, são usados em seu lugar. Também, os termos *thread*, *hardware* e *multithread* que não possuem equivalentes são utilizados, sem ênfase alguma.

Algumas abreviações serão feitas, pois alguns termos são bastante recorrentes no texto:

Termo	Abreviação
Rede de poros e gargantas	RP
Esferas máximas	MB
Esferas máximas exatas	EMB
Método de Lattice-Boltzmann	LBM
Método baseado em processos	PB
Extração rápida de rede	FNE
Single thread, Single threaded	ST
Multithread, Multithreaded	MT

Vale observar que o para o MB, existem partes no texto em que se fala em *Megabytes*, cuja abreviação é a mesma. Essas partes são todas bem contextualizadas e não há confusão de forma alguma. Também, o EMB é o nome dado a adaptação do MB definida neste trabalho. As abreviações de single threaded e multithreaded são utilizadas nos gráficos de modo a diminuir o tamanho das legendas referentes, mantendo a atenção aos gráficos em si.

As duas workstation utilizadas em todos os testes deste trabalho, possuem a seguintes configurações:

Identificador	M1	M2
CPU	Intel Core i5 x4 2.80Ghz	AMD Phenom x4 2.60Ghz
GPU	Geforce GT 210 512MB	Geforce GTX 560 1024MB
MEM	8GB	4GB
SO	Linux x86_64, Kernel 3.0.0-15	Linux x86_64, Kernel 3.0.0.0-15
GCC	GCC 4.6.1	GCC 4.6.1
LLVM/CLANG	LLVM/Clang 2.9	LLVM/Clang 2.9

Em todos os valores descritos em tabelas o discriminador decimal será o ponto ao invés da tradicional vírgula da língua portuguesa. Essa mudança foi feita de modo a facilitar a integração com o latex e a linguagem de processamento estatístico, chamada R. Acredita-se que tal mudança não fere a língua referente e menos ainda o entendimento deste trabalho.

O capítulo 2 trata do estado da arte e faz uma revisão sistemática da literatura, terminando com a metodologia adotada para a explanação e demonstração dos resultados obtidos. A aquisição e o processamento de dados microtomográficos são o alvo de estudo do capítulo 3. Já a parte de processamento dos meta-dados é motivo de estudo no capítulo 4. A caracterização e obtenção de dados encontra-se no capítulo 5. Por fim tem-se o apêndice com figuras, gráficos e tabelas que demonstram os resultados obtidos e não descritos no decorrer do trabalho.

2 REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

Esse capítulo segue as convenções de revisão definidas no relatório técnico de Kitchenham (2004) e é padrão em todas as dissertações Instituto Nacional de Convergência Digital (INCOD).

Nas seção 2.1, as palavras-chaves e métodos de definição dos trabalhos correlacionados a esse trabalho são descritos exaustivamente. A seção 2.2 define uma revisão do estado da arte na área. Em seguida, na seção 2.3, tem-se uma definição da metodologia que será utilizado nos demais capítulos do trabalho para explorar-se e desenvolver o problema de caracterização e extração de redes de poros e gargantas.

2.1 IDENTIFICAÇÃO DA PESQUISA E SELEÇÃO DOS ESTUDOS

Analisou-se os artigos publicados em anais de congresso, artigos completos e teses publicados entre 1960 a 2011. Os mecanismos de busca, Google Scholar, ACM Digital Library, Society of Petroleum Engineers, Springerlink e ScienceDirect. Para identificar-se os possíveis trabalhos relacionados, foram utilizados alguns critérios de inclusão e exclusão, os quais levaram à escolha dos dados a serem extraídos e por fim aos dados brutos.

2.1.1 Critérios de inclusão

A partir dos artigos filtrados de acordo com pelo menos uma das seguintes palavras, presentes nas palavras-chaves ou resumo: *pore, space, pore space, pore media, pore network, fluid simulation, simulation, fluid, permeability, relative permeability, absolute permeability, lattice-boltzmann method, numeric, fluid, solver, extracion, network*.

Os artigos e teses iniciais foram filtrados de acordo com a relevância, critério esse, definido pelo mecanismo de busca e pelos fatores já citados. Somente os quinze primeiro trabalhos de cada busca foram levados em consideração, tendo em vista que os resultados acima desse valor raramente terão algum conteúdo referente ao de interesse.

Os trabalhos não analisados os quais foram encontrados como relevantes no estado da arte dos trabalhos analisados ou que foram considerados uma referência mais *original* quanto aos conteúdos pesquisados foram incluídos também.

2.1.2 Critérios de exclusão

Foram excluídos os trabalhos os quais eram estritamente de cunho geológico ou não possuíam nenhum tipo de comparação a uma técnica computacional. Também, os trabalhos cujas técnicas aplicadas não foram utilizadas em cálculos para volumes tridimensionais e os trabalhos que eram unicamente experimentais, i. e., não definem novas técnicas ou modificações a técnicas computacionais existentes.

Foram removidos também aqueles que não eram mais *originais* que os artigos os quais referenciavam, para uma dada pesquisa, sendo portanto, substituídos pelo mais original. Também, aqueles cuja pesquisa não eram relacionadas ou relacionáveis à caracterização do espaço poros em rochas.

2.2 ESTADO DA ARTE

Quanto à construção de redes a partir do espaço poroso, existem três principais métodos: *esferas máximas*, *métodos do eixo médio* e *o método baseado em processos*.

2.2.1 Métodos do eixo médio

Os métodos do *eixo médio*, também conhecido como *esqueleto*, do espaço poroso classificam determinadas regiões como pertencentes à garganta ou ao poro por diferentes heurísticas.

O método de extração rápida, proposto por Schena e Favretto (2006) é um dos métodos dessa classe. Tal método depende de como são classificados poros e gargantas, ou seja, do critério usado e é possível obter valores de permeabilidade e de transporte utilizando-se as seções transversais ao eixo médio como referência e calcular a condutância na garganta (SCHENA; FAVRETTO; PILLER, 2008). Esse cálculo é feito, utilizando-se *método dos elementos finitos* (MEF).

O algoritmo centra-se na extração do eixo médio aproximado de um volume. O eixo médio é obtido a partir de uma mapa de distâncias exatas, também chamado de transformada de distâncias exatas e a aplicação de algoritmos e procedimentos que refinam e extraem o esqueleto ou eixo médio aproximado, conforme visto na figura 4.

Após o cálculo do mapa de distâncias exatas, faz-se a extração das linhas de fluxo, a partir transformada geodésica e seu gradiente normalizado. Essa etapa de extração é completamente paralelizável e obtém os caminhos

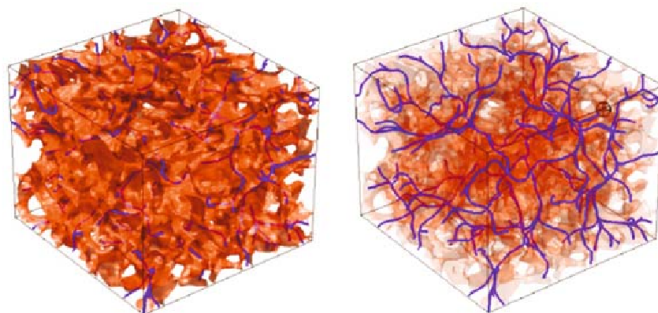


Figura 4: Figura que demonstra os resultados para extração do eixo médio em uma amostra de rocha. Schena e Favretto (2006)

de escoamento dentro do espaço poroso.

Bifurcações do caminho são definidas como nodos da rede. Os segmentos que percorrem dois nodos são definidos como borda da rede. Os nodos são os poros e o que é entre eles é definido como região de garganta.

A extração de valores de escoamento monofásico e valores petrofísicos pode ser feita pela obtenção das secções transversais ao eixo médio aproximado. No trabalho de Schena, Favretto e Piller (2008), tais informações são encontrados pela aplicação do *método dos elementos finitos* (MEF) sobre o resultado da extração rápida e são ditos como superiores aos resultados encontrados no *método baseado em processos* (PB).

2.2.2 Método baseado em processos

O *método baseado em processos* (PB) foi proposto por Oren e Bakke (2002) e tem como ponto forte a precisão para volumes homogêneos diversos, principalmente arenitos. Esse método baseia-se em reticulados regulares para a construção do volume de maneira estocástica (BAKKE; OREN, 1997).

Inicialmente, a técnica assume que todos os grãos são esferas. A partir dos grãos iniciais, aplicam-se três processos distintos de modelagem e modificação dos grãos: a sedimentação, compactação e diagênese.

A sedimentação é feita por grão e pode ser de baixa energia ou alta energia. Na de baixa energia, os grãos são escolhidos de maneira aleatória e cria-se um campo gravitacional que faz com que ele caia sob a ação de seu próprio peso até atingir um mínimo local. Assim, ele para ao atingir o fundo da amostra ou outro grão. Em contrapartida, na sedimentação de alta

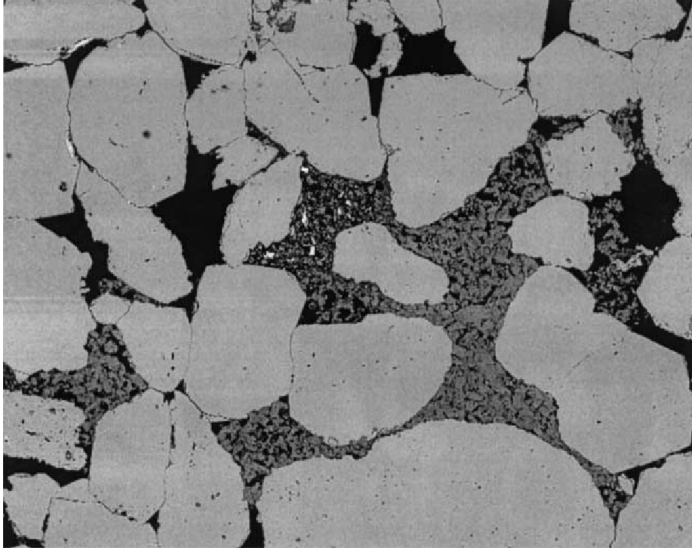


Figura 5: Corte transversal de uma amostra de arenito do Mar do Norte, do trabalho de Oren e Bakke (2002)

energia, forças laterais como ondas e fluxos empurram lateralmente o grão, diminuindo a influência da força gravitacional atuando sobre o grão. Isso é feito no PB depositando-o no ponto de mínimo global, implicando em uma maior aglomeração de grãos e menor porosidade.

A compactação é a reação ao estresse vertical imposto sobre o volume rochoso. É modelado no PB a partir da fórmula:

$$Z = Z_0(1 - \beta_z)$$

Onde Z é a nova posição vertical, Z_0 é a posição original e β_z é o fator percentual de compactação, definido entre zero e um. O resultado da compactação é que alguns grãos podem se interpenetrar. Isso é considerado adequado pelo modelo e o volume excedente é considerado perdido ou transferido para fora do sistema.

Diagênese é o nome dado a processos químicos, biológicos ou físicos que ocasionam desidratação, cimentação, dissolução, entre outros. Somente os processos de supercimentação do quartzo e da formação autigênica de argila na superfície do grão são modeladas por aproximações conhecidas de tais fenômenos.

O resultado final do PB é bem de acordo com o encontrado em areni-

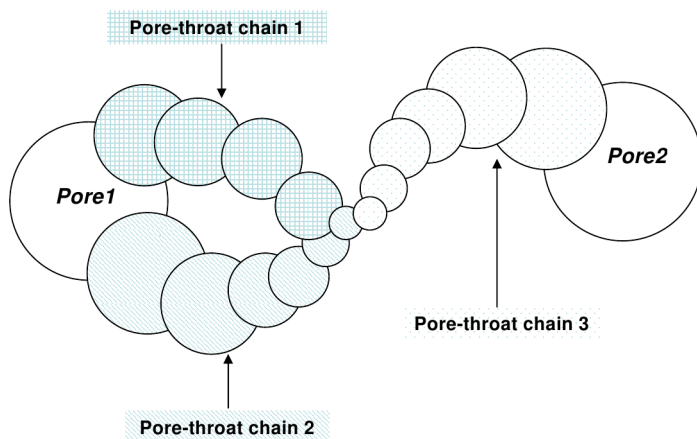


Figura 6: Exemplo de configuração para descoberta de poros e gargantas, por Hu Dong (DONG; BLUNT, 2007)

tos do tipo Fontainebleau. Contudo, a modelagem por processos para rochas heterogêneas é dificultosa, sobretudo pela origem complexa da rocha cujos fenômenos são difíceis de serem modelados. A figura 5 demonstra uma imagem obtida por *back-scattered electrons* (BSE), ou microscópio eletrônico de varredura (MEV). Observa-se na figura, em preto os poros, em cinza claro os grãos e em cinza escuro a argila. O PB é capaz de modelar redes de poros e gargantas a partir de imagens como essa.

Os cálculos de condutância, e conseqüentemente de permeabilidade, são obtidos por meio de seções transversais extraídas do volume em amostras em diversos ângulos (OREN; BAKKE, 2002). Por fim, a rede pode ser criada a partir de um modelo prévio da rede e os mesmos cálculos serem feitos na rede calculada (VALVATNE et al., 2005), incluindo cálculos multifásicos.

2.2.3 Esferas máximas

As *esferas máximas*, método proposto por Al-Kharusi e Blunt (2007), é baseado no trabalho de Silin, Jin e Patzek (2003), utilizado para calcular a morfologia em amostras de rochas heterogêneas. No método proposto por Al-Kharusi, as esferas são classificadas em uma hierarquia. Elas são classificadas em *mestras*, *escravas* ou *cluster*, sendo que o último pode ser limitado ou não. Cada cluster pode possuir *filhos*, assim como as mestras e escravas.

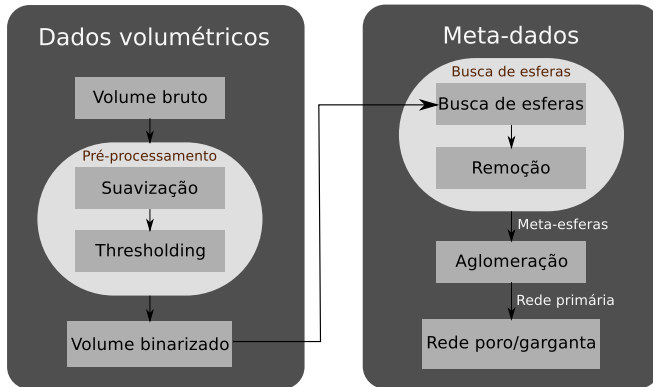


Figura 7: Visão geral do algoritmo de esferas máximas

Assim, tem-se uma hierarquia que define, segundo um conjunto de regras, poros e gargantas.

O trabalho de Dong e Blunt (2007) seguiu a mesma ideia, porém eles partem das esferas de raio maior, para as esferas de raio menor, aglomerando as esferas que se intersectem e gerando gargantas no encontro de duas esferas com poros pais diferentes. O processo é descrito visualmente na figura 6, onde há dois poros ligados por uma garganta. O intuito das modificações foi definir modificações sobre o algoritmo de Al-Kharusi de modo a ele consumir menos memória e processamento. Gargalos esses, identificados pelo próprio autor (AL-KHARUSI; BLUNT, 2007).

Os algoritmos de extração automatizada de uma rede de poros e gargantas usando o algoritmo de esferas máximas seguem o *pipeline* demonstrado pela figura 7. O MB é o único dos algoritmos citados que possui eficácia conhecida na literatura para extração de rede de poros de amostras heterogêneas. O método foi proposto para a caracterização dessas. Por esse motivo, ele foi o escolhido para implementar-se a modificação descrita nesse trabalho. Em seguida, descreve-se o método que será utilizado nesse trabalho para fazer-se as modificações ao MB.

2.3 MÉTODO

Inicialmente, será feita um levantamento dos volumes de interesse para esse trabalho, com relação aos trabalhos anteriores do MB. Alguns dos volumes utilizados nos trabalhos base do algoritmo encontram-se disponíveis para uso. Tais volumes devem ser descritos e o processo para chegar-se até

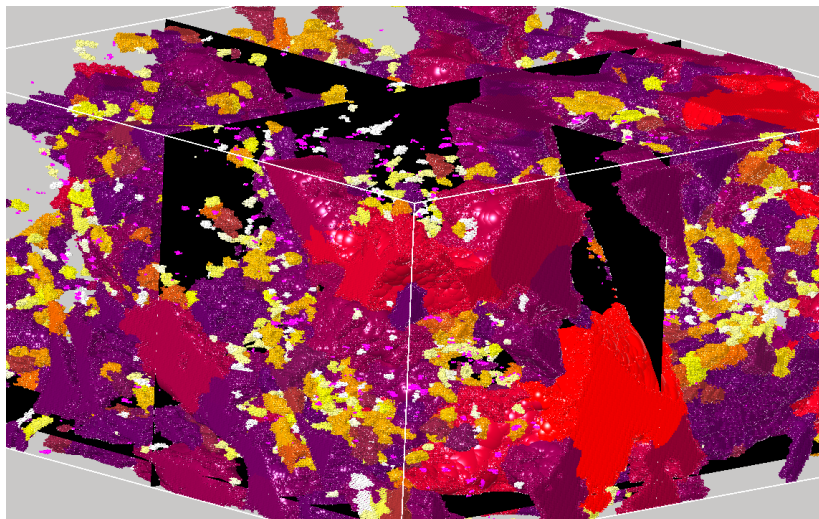


Figura 8: Todas as esferas, não contidas em nenhuma outra, que representam a distância até o voxel não poro mais próximo.

eles, em sua forma binarizada. Ao mesmo tempo, deve-se propor uma técnica para compressão desses volumes binarizados para que eles utilizem o menos de memória e espaço em disco. Assim, tem-se mais espaço em memória para a execução do algoritmo em si.

Para cumprir com o objetivo de acelerar e modificar o algoritmo MB, deve-se primeiro levar em consideração as principais etapas do algoritmo e os dados de entrada e saída deles. Deve ser selecionado um conjunto de algoritmos os quais sejam capazes de suprir, de forma ótima, ou seja, com maior eficiência, os requisitos de aceleração e paralelização do algoritmo em uma dada plataforma e testá-los. Dos algoritmos relevantes obtidos, tem-se aqueles os quais existem etapas seriais. Elas devem ser identificadas, caso existam, pois elas que definirão o máximo de desempenho obtido ao paralelizar-se o problema.

Para obter resultados mais eficientes em relação ao algoritmo MB, pretende-se utilizar implementações paralelizadas, em cpu, para todos os algoritmos e estudar implementações em gpu, para partes específicas das etapas gerais, comparando-as com a chamada *versão ouro*, em cpu. A exploração de paralelismo no algoritmo de esferas máximas é pioneira na literatura. Para outras técnicas menos recentes, como o LBM existem muitas implementações paralelizadas, mesmo em gpu (FAN et al., 2004; BERNASCHI et al., 2010).

Trazer o algoritmo de *esferas máximas* inteiramente para a gpu seria uma tarefa hercúlea, já que existem etapas completamente sequenciais na aglomeração original. Também, não se trata de um algoritmo único, mas um conjunto de passos os quais individualmente são mais simples de compreender e implementar. As esferas, após a aglomeração, são todas as esferas expostas na figura 8. A cor representa o tamanho do poro o qual a esfera foi aglomerada e as esferas pertencentes a gargantas não estão representadas.

Será implementada uma versão sequencial, em cpu, do *esferas máximas*, exportando o resultado para o *solver* proposto por Valvatne et al. (2005), o qual simula a fase água e fase óleo da extração de fluido a partir de uma rede de poros de entrada. A partir da comparação dos resultados de permeabilidade, principalmente a absoluta, faz-se um comparativo quanto a exatidão do resultado obtido em relação aos resultados de outros métodos para as mesmas amostras.

Essa implementação inicial será feita sobre as bibliotecas C3DE (*Cyclops 3D Environment*) (SILVA et al., 2009), inicialmente utilizadas para visualização e processamento de volumes médicos, porém adaptada para o processamento de dados de microtomografia de rocha.

3 PROCESSAMENTO E ANÁLISE DE DADOS MICROTOMOGRÁFICOS DE ROCHA

Nesse capítulo, define-se como ocorre a aquisição de dados microtomográficos de rocha e qual processamento é necessário sobre esse volume de dados brutos para obter-se uma amostra binária, representando o espaço poroso e a rocha. Também, serão apresentadas técnicas as quais permitem o processamento e visualização de grandes volumes de dados e os volumes de dados utilizados em várias partes desse trabalho.

3.1 AQUISIÇÃO DE DADOS

Existem vários métodos utilizados pela indústria para extrair-se dados *petrofísicos* de uma amostra de rochas qualquer, como a dolomita da figura 9b. Dentre essas técnicas destacam-se duas: *porosimetria por injeção de mercúrio* e *processamento de amostras microtomográficas*.

A *porosimetria por injeção de mercúrio*, proposta por Washburn (1921) e aplicada em laboratório por Henderson et al. (1940). Tal técnica, baseia-se no fato do mercúrio ser um fluido não-molhante em relação a várias substâncias, incluindo os materiais rochosos, e portanto, não penetra em vulgos e fissuras de maneira espontânea, ou seja, é necessário aplicar pressão sobre ele para que isso aconteça.

A microtomografia computadorizada de rochas obtém fatias bidimensionais, ou seja, imagens de seções transversais alinhadas. O empilhamento dessas imagens gera um volume microtomográfico. Analisando-se o volume por um modelo de análise de espaço poroso é possível obter características do espaço poroso. Uma vantagem desse método é a possibilidade de reutilizar-se a amostra para obter novos dados microtomográficos. Também, os avanços na resolução e qualidade desse tipo de reconstrução que refinam o resultado dos modelos aplicados sobre ele.

3.1.1 Porosimetria por injeção de mercúrio

O teste é feito introduzindo a amostra em um recipiente dotado de um capilar, no qual a amostra encontra-se em condições de vácuo. Assim, ao injetar-se o mercúrio no recipiente, preenchendo também o capilar, e aplicar-se uma pressão para que o mercúrio adentre as fissuras e vulgos, tem-se a quantidade de líquido reduzido no capilar. É possível calcular uma curva de

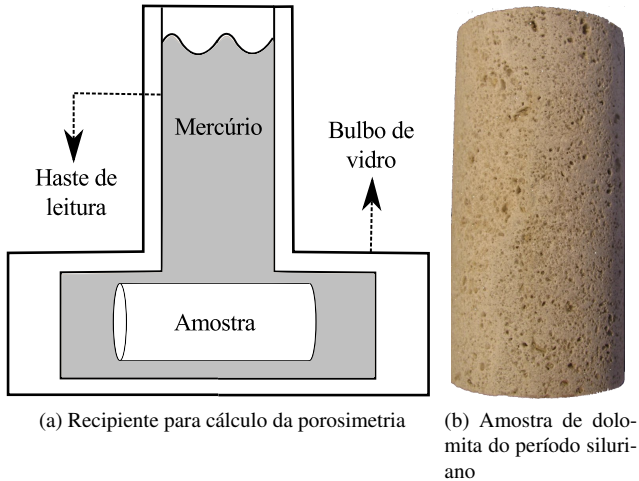


Figura 9: Configuração de porosimetria por injeção de mercúrio e uma amostra real

penetração no volume de amostra, para cada pressão aplicada e extrair valores de *distribuição de poros* de maneira direta. Por um pós-processamento aproximado também obtém-se a *permeabilidade absoluta*. Contudo, essa técnica é destrutiva, arruinando a amostra para qualquer uso futuro. Uma visão geral desse processo pode ser observada na figura 9a.

3.1.2 Microtomografia computadorizada

A microtomografia provê uma maneira de analisar-se o volume da amostra computacionalmente, possibilitando assim o reuso dessa em outras microtomografias. Assim, pode-se obter imagens distintas em resoluções distintas para o mesmo volume. Isso possibilita a utilização de dados multi-escalares. A microtomografia também dá uma ideia visual da forma do espaço poroso interno.

A amostragem dá-se da seguinte forma: o volume é centrado no microtomógrafo. Ele é rotacionado, pelo sistema de movimentação controlada do tomógrafo e o perfil de projeção atenuado é obtido pelas amostras em vários ângulos. Finalmente, os dados tridimensionais dos *cortes transversais* do volume são reconstruídos no formato de imagem pelo próprio microtomógrafo. O resultado final são imagens transversais em tons de cinza. O

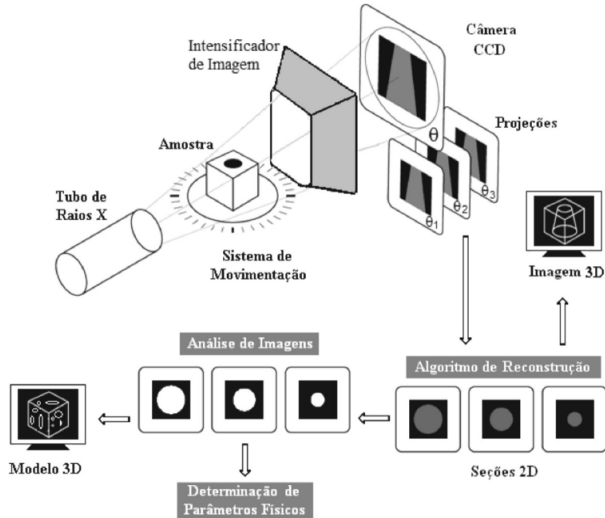


Figura 10: Obtenção das imagens e pipeline de processamento típico para amostras de rocha, por Fernandes, Appoloni e Fernandes (2009)

processo geral é observado na figura 10.

A partir das imagens obtidas pode ser feito o processamento de inúmeras propriedades petrofísicas. Entretanto, não é possível calcular essas propriedades sem um pré-processamento que defina para os algoritmos subsequentes quais partes do volume são espaço poroso e quais são rocha. Essa etapa exige um processamento para definir-se um valor de limiar que defina o espaço poroso como sendo 0 ou 1 e o rochoso o complementar. Tal processo denomina-se binarização.

3.2 BINARIZAÇÃO DO VOLUME DE DADOS

A binarização dá-se por uma função T de thresholding a qual defina, para cada pixel $p_{x,y} \in I$, sendo I a imagem original:

$$p_{x,y} = T(p_{x,y})$$

$$T(x) = \begin{cases} 1, & x > \theta \\ 0, & x \leq \theta \end{cases}$$

θ é o valor do threshold em si. É possível calcular esse valor de forma automática, ou selecionar-se manualmente. Uma forma de selecionar-se automaticamente o valor de threshold é pela mediana ou média (SEZGIN; SANKUR, 2004). Outra maneira, é a avaliar-se o histograma da imagem e descobrir o ponto de mínimo entre duas populações. O algoritmo 1, demonstra uma maneira robusta e iterativa de obter-se o valor de threshold, na tentativa de achar o ponto de mínimo entre duas populações.

Algoritmo 1: Obtenção do valor de thresholding automático

entrada: I_i a imagem de entrada; t_0 o "chute" de threshold inicial

saída : o valor de threshold

$t \leftarrow t_0$;

while $t \neq t_0$ **do**

$m_0 \leftarrow c_0 \leftarrow 0$;

$m_1 \leftarrow c_1 \leftarrow 0$;

for $p_{x,y} \in I_i$ **do**

if $p_{x,y} \leq t$ **then**

$c_0 \leftarrow c_0 + 1$;

$m_0 \leftarrow m_0 + p_{x,y}$;

else

$c_1 \leftarrow c_1 + 1$;

$m_1 \leftarrow m_1 + p_{x,y}$;

$t_0 \leftarrow t$;

$m_0 \leftarrow \frac{m_0}{\max(c_0, 1)}$;

$m_1 \leftarrow \frac{m_1}{\max(c_1, 1)}$;

$t \leftarrow \frac{m_0}{2} + \frac{m_1}{2}$;

return t ;

O resultado final da função de thresholding é uma imagem binarizada, define-se como *foreground* os pixels em branco e *background* os pixels em preto, ou vice-versa. Assim, tem-se na amostra volumétrica de rocha, a definição da fase porosa e rochosa.

A técnica mais simples de binarização é delegar a escolha do valor de limiar ao especialista. Essa técnica manual pode ser aprimorada pela escolha automatizada de um valor inicial. Assim, o especialista pode avaliar se o resultado foi bom o suficiente ou modificá-lo como desejar.

Existem muitos outros algoritmos que possam ser utilizados no contexto de amostras de rocha (SEZGIN; SANKUR, 2004), porém, mais importante do que a própria binarização é a pré-filtragem do volume amostrado, a qual influencia diretamente o resultado final da binarização.

3.3 FILTRAGEM E TRATAMENTO

Para que o volume binarizado possua características mais homogêneas e para reduzir-se o número de artefatos provenientes da etapa de aquisição das imagens, tipicamente faz-se uma pré-filtragem do volume.

Um método bastante robusto para a filtragem do volume é o filtro da mediana. Para cada subconjunto de n por m pixels, procura-se o elemento mediano e define-se todos os pixels pertencentes a essa região com o valor encontrado.

A vantagem desse filtro é a remoção de elementos ruidosos no espaço poroso ou na rocha e também pelo fechamento de pequenos buracos em ambos. Assim menos elementos pequenos, normalmente provenientes de problemas na aquisição farão parte das etapas de processamento futura. Também, modifica-se o histograma da imagem, aglomerando os valores de pixels em torno de valores mais comuns.

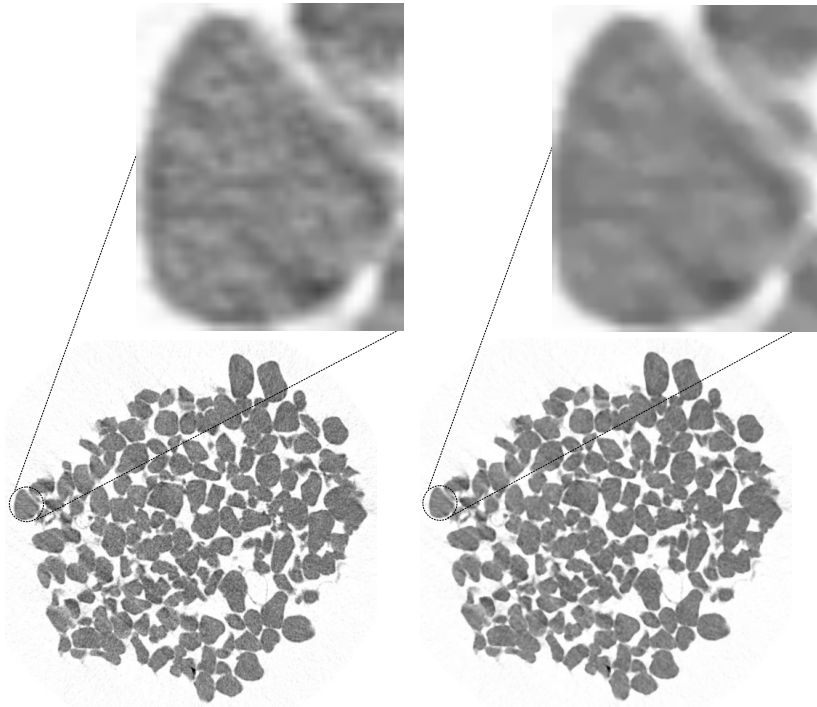
Na figura 11, encontra-se ilustrado a imagem original e a imagem filtrada e os histogramas de cada uma. Observa-se que os valores finais são mais concentrados em torno de pontos de máximo e menos em relação aos pontos de mínimo. Isso facilita a aplicação de algoritmos que extraiam um valor de threshold de maneira automática como o descrito na seção 3.2.

Apesar da eficiência na remoção de elementos ruidosos do filtro da mediana ser inquestionável, outros como o gaussiano e filtros específicos para remoção de artefatos da etapa de aquisição podem ser utilizados. Como na binarização, a decisão da necessidade desses pode ser delegada ao especialista o qual aplicará os filtros conforme desejar.

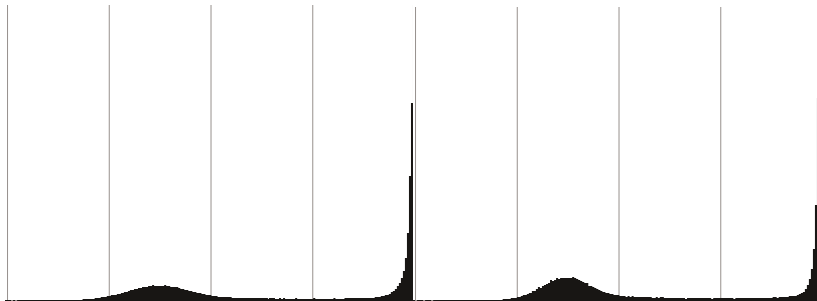
Após a filtragem e binarização, tem-se o volume binarizado em valores branco e preto, ditos *foreground* e *background*, ou vice-versa. Segundo Lucia (1999), a quantidade de elementos pertencentes ao espaço poroso é a porosidade ϕ , definida em função do número de voxels pertencentes ao espaço poroso. Considerando-se V_p , o número total de voxels pertencentes ao espaço poroso e V , o número total de voxels no volume, a porosidade é dada por:

$$\phi = \frac{V_p}{V} \quad (1)$$

Como somente os voxels pertencentes ao espaço poroso são de interesse para a extração da rede de poros e gargantas, a aplicação de técnicas de compressão tem bons resultados quanto à utilização de memória total dos sistemas que o fazem. Pela própria simplicidade do volume binário, técnicas de compressão diversas são eficientes. A compressão *run-length encoding* (RLE) é um exemplo.



(a) Amostra antes (esq.) e após (dir.) a aplicação do filtro da mediana



(b) Histograma antes (esq.) e após (dir.) a aplicação do filtro da mediana

Figura 11: Amostra de arenito e os histogramas referentes

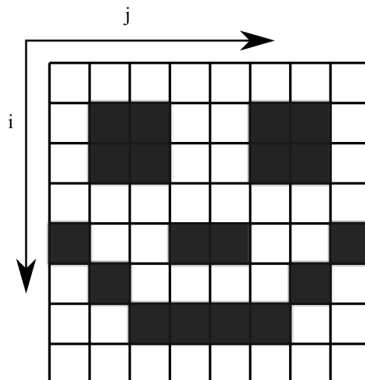


Figura 12: Imagem binarizada, onde i representa as linha e j as colunas

3.4 COMPRESSÃO RLE

Considera-se o seguinte quadro de ocupação de memória em função do tamanho do volume binarizado, representando com um byte por voxel:

Lado em pixels	64	128	256	512	1024	2048	4096
Memória (MB)	0.25	2	16	128	1024	8192	65536

Percebe-se o grande crescimento na ocupação de memória, ainda mais se considerado que essa ocupação dá-se pelo fato da representação utilizada ser a mais simples, isso é, ela não leva em consideração a possibilidade de redundância na representação do volume e a representação binária. Gasta-se um espaço, em disco e em memória, demasiadamente grande para representar o volume dessa forma, sobretudo ao considerar-se a possibilidade de representar esse volume inteiramente na gpu.

A fim de representar-se a imagem 12 da maneira tradicional, assumindo-se que a coluna é mais variante, como uma sequência de pixels onde o valor do pixel é dado por W, se branco e B se preto, a representação extensiva da imagem seria W, W, W ..., B, B, W, W, B, B, W, ..., W. Ou seja, um valor branco ou preto definido para cada pixel da imagem. Tal solução é dita como uma imagem *raw*, ou bruta, e não possui nenhum tipo de compressão. Para volumes muito grandes, conforme já visto, a utilização de compressão é primordial.

O *run-length encoding* (RLE) é uma técnica para representação compacta de dados. Ao invés de representar-se os dados extensivamente, pode-se representar somente os segmentos de elementos repetidos, isso é, para a

mesma imagem, a representação ficaria 9W (nove brancos seguidos), 2B (2 pretos seguidos), 2W, 2B, 2W, 2B, ..., e assim por diante. Um problema dessa representação é que para acessar-se aleatoriamente qualquer elemento do volume, algo amplamente utilizado em algoritmos de processamento diversos, tem-se uma complexidade $O(\log_n)$, onde n é o número de pixels existentes na imagem. Tal técnica pode ser vista na seção 4.5.

Para aumentar-se a eficiência da busca aleatória na imagem, faz-se uma compressão RLE por linha, diminuindo o fator n do número de pixels da imagem para o número de pixels por linha. Assim, tem-se um melhor desempenho numa busca aleatória qualquer e é possível recuperar, em tempo linear, qualquer linha do volume. Algoritmos inteligentes, que assumam essa representação ótima por linha, podem ser mais eficientes que algoritmos des-preparados para acessar a imagem dessa forma.

A mesma representação, exemplificada na imagem, pode ser utilizada em um volume. Ainda é possível comprimir-se por linha e acessar-se aleatoriamente os dados no volume. Portanto, para aplicar esse algoritmo de compressão basta aplicar a ideia a um formato padrão, que no caso desse trabalho é o RBV. A descrição encontra-se na seção 7.1.

3.5 VOLUMES

Nessa seção, define-se os volumes utilizados, classificando-os em três tipos diferentes: Arenitos, definidos pela consoante S seguida de um número, e.g., S1, S2, S3. Carbonatos, definidos por um C seguido por um número, por exemplo, C1, C2, C3, e amostras sintéticas, definidas por um A seguido por um número, isto é, A1, A2, A3... A tabela 2, demonstra imagens de cortes transversais dos volumes utilizados, com as nomenclaturas devidas, seguidas de suas dimensões, porosidades e resoluções.

Os arenitos S1 a S9 e os carbonatos C1 e C2 são volumes de dados disponibilizados pelo Imperial College London e são amostras as quais foram usadas no trabalho de Dong e Blunt (2007).

Na figura 13, observa-se a memória ocupada, em MB, dos volumes de entrada, para o formato RBV e para o formato RAW. Os arenitos S1 a S9 e a A1 são todos volumes de dimensões 300^3 , e ocupam, sem compressão, aproximadamente 25 MB em memória cada. Na A1 a taxa de compressão é menor pois é uma amostra com poros bastante irregulares e com porosidade alta. As amostras carbonáticas são maiores, ocupando até 70 MB. Para volumes grandes, com dimensões maiores que 1024^3 o espaço ocupado salta para casa dos GB. Assim, tem-se a necessidade de compressão, sobretudo para ser possível processar esses volumes maiores em máquinas não dedicadas a

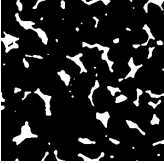
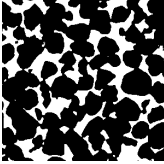
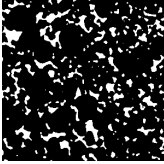
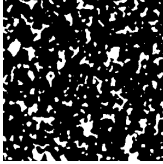






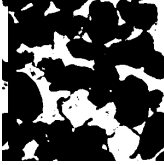


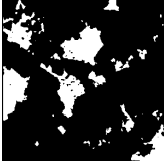
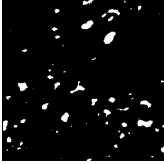
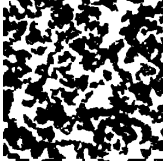
 <p>S1 300x300x300 Porosidade: 14.13% Resolução: 8.68μm</p>	 <p>S2 300x300x300 Porosidade: 24.26% Resolução: 4.95μm</p>	 <p>S3 300x300x300 Porosidade: 16.85% Resolução: 9.1μm</p>	 <p>S4 300x300x300 Porosidade: 17.12% Resolução: 8.96μm</p>
 <p>S5 300x300x300 Porosidade: 21.13% Resolução: 3.99μm</p>	 <p>S6 300x300x300 Porosidade: 23.95% Resolução: 5.1μm</p>	 <p>S7 300x300x300 Porosidade: 25.04% Resolução: 3.80μm</p>	 <p>S8 300x300x300 Porosidade: 33.98% Resolução: 4.89μm</p>
 <p>S9 300x300x300 Porosidade: 22.17% Resolução: 3.38μm</p>	 <p>S10 400x400x400 Porosidade: 19.80% Resolução: 2.4μm</p>	 <p>S11 300x300x300 Porosidade: 23.21% Resolução: 3.4μm</p>	 <p>C1 400x400x400 Porosidade: 23.26% Resolução: 2.85μm</p>
 <p>C2 400x400x400 Porosidade: 16.83% Resolução: 5.34μm</p>	 <p>C3 416x416x400 Porosidade: 10.95% Resolução: 3.6μm</p>	 <p>C4 322x322x418 Porosidade: 03.19% Resolução: 0.36μm</p>	 <p>A1 300x300x300 Porosidade: 42.86% Resolução: 3.85μm</p>

Tabela 2: Imagens de seções transversais dos volumes de entrada, com suas dimensões, porosidades e resoluções. A fase poro está em branco

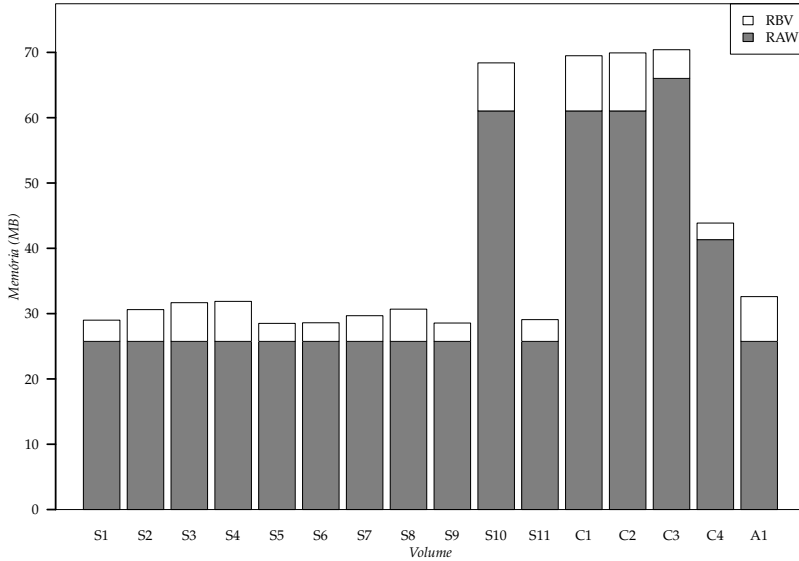


Figura 13: Espaço absoluto, em MB, dos RBVs e RAWs

processamento ou clusters.

Os valores percentuais de compressão variam de aproximadamente 6.5% a 20% para os volumes de entrada, conforme observado no gráfico 14. O fator que mais afeta a performance de compressão não é a porosidade do volume em si, pois o formato RBV representa segmentos de pixels e não seus valores diretamente. Assim, o que mais afeta a taxa de compressão são informações ruidosas e amostras cujo espaço poroso e rochoso são irregulares.

Alguns volumes se destacam na taxa de compressão acentuada. No caso do C3 e C4, o volume RBV foi bem menor porque os dados porosos eram esparsos e sua porosidade é baixa. No S11, o volume de poros é demasiadamente concentrado se comparado com outras amostras carbonáticas. Nos arenitos S1, S5, S6, S9 a dupla baixa porosidade e amostra com poros regulares fazem com que a compressão por faixas de valores seja bastante eficaz.

A filtragem na etapa de aquisição e a pré-filtragem dos volumes binarizados fazem com que o volume fique mais homogêneo e perca informações ruidosas. Portanto, contribuem significativamente para a compressão do volume binarizado e mesmo para a etapa de extração de RP, onde esses voxels não serão processados e não irão gerar meta-informações.

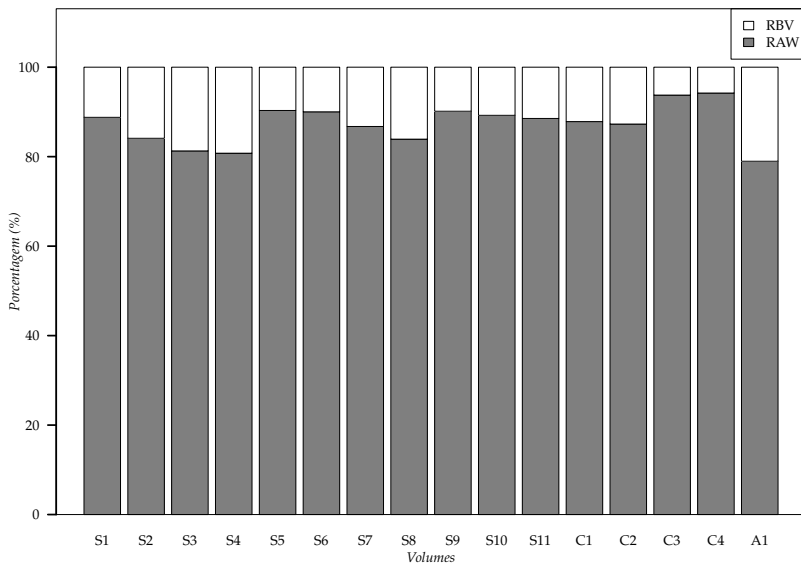


Figura 14: Espaço , em porcentagem, dos RBVs e RAWs

3.6 CONCLUSÃO

O processo de aquisição e filtragem de dados tomográficas tem impacto nas etapas futuras e na compressão do volume binarizado. Nessa etapa, o *expertise* do especialista é de fundamental importância, sobretudo na etapa de aquisição e checagem da qualidade dos dados obtidos. Também, a intensidade da filtragem pode ser parametrizada. Assim, pode-se aplicar filtragens mais intensas sobre volumes ruidosos e menos intensas sobre outros. Isso tudo, pode ser delegado ao especialista porque ele possui a fonte de conhecimento do que é um dado amostral bom ou não. Ainda assim, algoritmos automatizados podem auxiliar e acelerar a decisão.

Nota-se que a taxa de compressão varia conforme a morfologia do espaço poroso, porém ela não foi maior que pouco mais de 20% para todos os volumes de entrada, das figuras 13 e 14. Portanto, confirma-se a validade de tal técnica, principalmente para economia de memória em volumes grandes, já que tomógrafos recentes são capazes de reconstruir volumes com GB de dados.

A tabela 2 contém todos os volumes utilizados nesse capítulo e nos capítulos 4 e 5. O Laboratório de Meios Porosos e Propriedades Termofísicas

(LMPT) da Universidade Federal de Santa Catarina disponibilizou as amostras C3, C4, S10 e S11. As outras são idênticas aos volumes utilizados no trabalho de Dong e Blunt (2007). Pela utilização de vários volumes idênticos, é possível traçar vários paralelos entre a técnica MB e as *esferas máximas exatas* (EMB), descrita no capítulo 4.

4 EXTRAÇÃO DE REDE DE POROS POR ESFERAS MÁXIMAS EXATAS

Nesse capítulo são vistos os resultados referentes cada etapa do *esferas máximas* (MB) com relação as modificações propostas. Às modificações feitas sobre o algoritmo MB, dá-se o nome de *esferas máximas exatas* (EMB).

O algoritmo de esferas máximas possui quatro macro-etapas: a busca de esferas, a remoção de esferas, a aglomeração e por fim a geração da RP. A figura 7, apresenta todas as etapas que compreendem o processo automatizado de geração de RP a partir de um volume de uma amostra de rocha, incluindo as quatro macro-etapas apontadas.

4.1 BUSCA DE ESFERAS

A etapa de busca de esferas é vital para o processo que sucede, uma vez que nessa etapa são encontradas todas as esferas que representam a distância do voxel poro até o rocha mais próximo. Essas esferas, são processadas, sendo removidas as esferas que estejam contidas em outras. Somente as esferas restantes desse último processo são aglomeradas e por fim geram a RP.

Existem duas vertentes para extrair-se as esferas do volume poroso: o algoritmo de inflar esferas (DONG; BLUNT, 2007; AL-KHARUSI; BLUNT, 2007) e a extração das esferas por meio de uma transformada de distâncias, do inglês *distance transform* (SCHENA; FAVRETTO, 2006).

4.1.1 Algoritmo de inflar esferas

Al-Kharusi e Blunt (2007) e Dong e Blunt (2007) utilizaram a abordagem de inflar as esferas, a partir de cada voxel pertencente ao espaço poroso. Nessa técnica, o produto final são dois raios diferentes para a esfera: um raio máximo, denotado por R_{max} , definido pela esfera discreta que contém todos os voxels, incluindo o voxel rocha mais próximo e um raio mínimo, denotado por R_{min} cujo valor é o raio da esfera que inclui todos os voxels menos o voxel rocha mais próximo.

Tem-se um voxel V_1 que é o valor sólido mais próximo do voxel de interesse V_0 , pertencente ao espaço poroso. O raio real do voxel, denotado por R_{real} , é algo entre R_{min} e R_{max} e é definido, em espaço euclidiano, por:

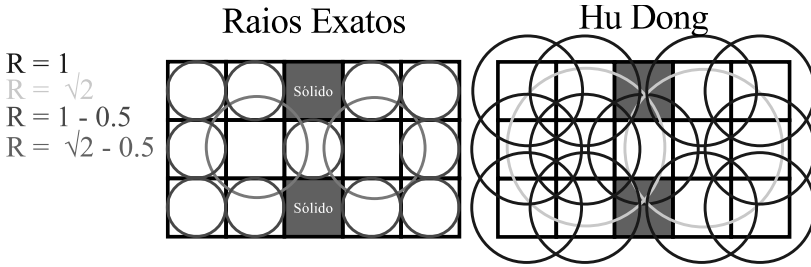


Figura 15: Configurações de intersecção com pixel rocha em cinza e raios em várias cores. O esquema de Dong e Blunt (2007) (direita) e o esquema com esferas de tamanho exato (esquerda)

$$R_{real} = dist(V_1, V_0) \quad (1)$$

$$R_{real} = \sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 + (z_1 - z_0)^2} \quad (2)$$

Pelo fato de levar-se em consideração a distância no espaço tridimensional para construir-se a esfera de raio R_{min} e R_{max} , é impossível, sem analisar-se novamente o volume, obter-se o raio R_{real} a partir de ambas.

Conforme definido por Dong e Blunt (2009) tem-se que se uma esfera S_0 , com $R_{min} = R_0$, está contida em outra, S_1 , com $R_{min} = R_1$, então na figura 15, as esferas cujo $R_{min} = \sqrt{2}$, não deveriam ultrapassar a barreira imposta pelos pixels que denotam o sólido e se intersectar. Segundo a equação de intersecção definida na seção 4.2, isso acontece. Portanto, em etapas futuras, ao invés de achar dois poros conectados por uma garganta, o algoritmo achará somente um poro com uma das duas esferas que na versão exata definem poros sendo a filha direta da outra. Esse fato tornar-se-á mais claro nas seções 4.2 e 4.3.

A figura 16, demonstra os tempos de execução do algoritmo de Dong para vários volumes de entrada. Observa-se uma grande variação, sobretudo na etapa de inflar as esferas, e.g., S1 e C1. Achada a evidência do possível problema com a intersecção que pode ocorrer durante a etapa de busca sua complexidade não linear, assume-se a tarefa de achar um algoritmo cujo resultado final seja as esferas achadas no esquema no qual as duas esferas maiores não se intersectam e cuja complexidade seja mais linear em função do tamanho do volume de entrada. O mapa de distâncias exatas, também usada na *extração rápida de rede* (FNE) de Schena e Favretto (2006), é uma possível solução.

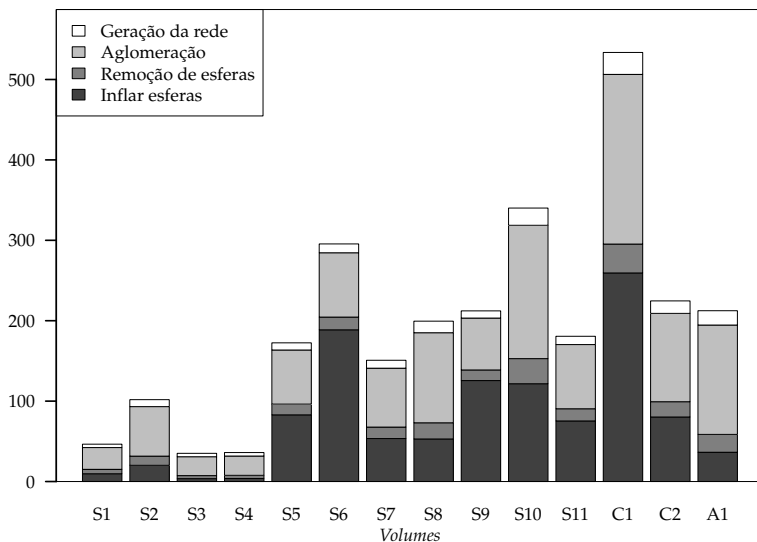


Figura 16: Tempo total de execução, em segundos, discriminando as etapas do algoritmo de Dong e Blunt (2007), para várias entradas

4.1.2 Mapa de distâncias exatas

A transformada de distâncias, sobretudo a de distâncias exatas, é um pré-processamento típico para o processo de esqueletonização ou extração do eixo médio (FABBRI et al., 2008; SCHENA; FAVRETTO, 2006; SCHENA; FAVRETTO; PILLER, 2008). Como entrada para o mapa utiliza-se uma imagem ou volume inicial, binarizado, onde em preto encontra-se a região de *background*, e em branco a região de *foreground* ou vice-versa. É possível extrair-se um mapa cuja métrica de distância, dependendo do algoritmo, pode ser qualquer uma escolhida, como a métrica euclidiana, proveniente da distância euclidiana, definida na equação 2. Outras métricas possíveis são *manhattan*, *city block* que é um caso especial da distância de Minkowski, *Mahalanobis*, entre outras.

Aritmética em ponto flutuante, em cpu, costuma ser mais lenta que a aritmética inteira. Portanto, a métrica de distância euclidiana quadrática, cujos valores são números inteiros, é mais atraente por possuir complexidade computacional menor. Muitos dos algoritmos são aplicáveis para ambas as métricas (FABBRI et al., 2008).

Saito e Toriwaki (1994) propuseram um algoritmo simples, a nível

Algoritmo 2: Transformação 1D no sentido *frente*, conforme proposta por Lotufo, Falcao e Zampirolli (2000)

entrada: F_{jk} a linha de entrada; Z o conjunto de pixels do *foreground*; j a coluna selecionada; k o plano selecionado

saída : G_{jk} A linha da coluna j e plano k transformada

```

 $G_{jk} \leftarrow F_{jk};$ 
 $mod \leftarrow 1;$ 
 $ult \leftarrow 0;$ 
for  $x = 0$  até  $length(F_i)$  do
  if  $f_{xjk} \in Z$  then
    if  $f_{xjk} > ult + mod$  then
       $g_{xjk} \leftarrow ult + mod;$ 
       $mod \leftarrow mod + 2;$ 
    else
       $mod \leftarrow 1;$ 
       $ult \leftarrow f_{xjk};$ 
    else
       $mod \leftarrow 1;$ 
       $ult \leftarrow 0;$ 

```

de entendimento e implementação, quando comparado a muitos dos outros existentes. Ele aceita qualquer métrica escolhida e possui bom desempenho geral, apesar de sua complexidade teórica de $O(n^3)$, onde n é o tamanho total da imagem de entrada (FABBRI et al., 2008). O algoritmo pode ser dividido três etapas subsequentes: as varreduras 1D, 2D e a 3D.

A primeira parte do algoritmo é o cálculo para distâncias 1D. Dado uma imagem binária $F = \{f_{ijk}\}$, a qual tem R linhas, C colunas e P planos, calcula-se a máscara 1D a partir de F , gerando a máscara G , da seguinte forma:

$$G = \{f_{ijk}\} \quad (3)$$

$$g_{ijk} = \min\{g_{ijk} + (j - y)^2; f_{iyk} = 0, 1 \leq y \leq C\} \quad (4)$$

O algoritmo de varredura 1D, utilizando somente somas para calcular as distâncias pode ser visto no trabalho de Lotufo, Falcao e Zampirolli (2000). O processo é visto na figura 17, resultado da aplicação do algoritmo 2. Varre-se da esquerda para a direita e da direita para a esquerda em duas etapas subsequentes, para todas as linhas do volume calculando-se o próximo

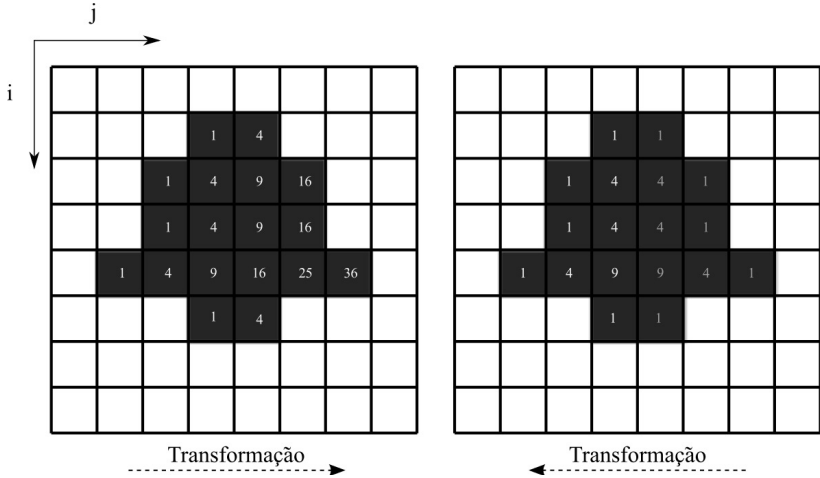


Figura 17: Esferas quadráticas após a aplicação da transformação 1D, da esquerda para direita (figura esq.) e da direita para esquerda (figura dir.)

elemento como um somatório do valor acumulado do elemento anterior. O valor acumulado vira o valor do elemento toda vez que ele é menor que o valor acumulado. Lembra-se que os valores do *background* são sempre 0 para o algoritmo. Esses valores correspondem ao espaço da rocha, nos volumes microtomográficos processados, já que a região de interesse são exatamente os poros ou não rocha.

A transformação 2D, por Saito, é visualizada na figura 18. Nela, o elemento destacado na coluna G está sofrendo uma iteração do algoritmo de Saito e Toriwaki (1994). No algoritmo 3, demonstra-se a aplicação, no sentido *frente*, do algoritmo de Saito para uma coluna G qualquer. Aplicando-se para cada elemento da coluna G , calcula-se uma imagem H , com distâncias mínimas em 2D por um algoritmo de dupla varredura, uma para frente e outra para trás. A aplicação subsequente no sentido oposto transforma G em H . Matematicamente:

$$H = \{g_{ijk}\} \quad (5)$$

$$h_{ijk} = \min\{g_{ijk} + (i - x)^2; f_{xjk} = 0, 1 \leq x \leq R\} \quad (6)$$

Por fim, a transformação 3D é feita sobre H , de maneira idêntica a transformação 2D, trocando-se apenas a direção da busca:

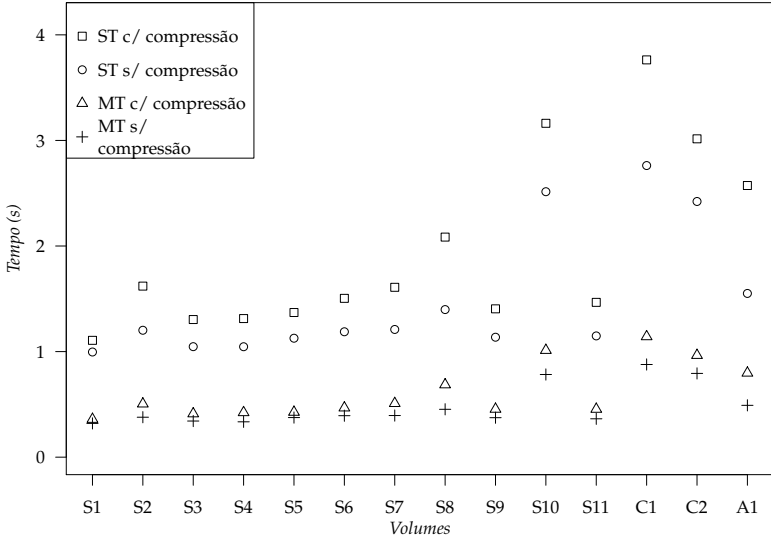


Figura 19: Tempos de execução para busca de esferas por mapa de distâncias, single thread (ST) e multithread (MT), em segundos, na máquina M1, para os dados de entrada em versões comprimidas ou não

Algoritmo 3: Execução no sentido *frente* do algoritmo de Saito para a coluna G

entrada: G a coluna de entrada; R o número de linhas no volume

saída : G transformada no sentido *frente*

for $i = 0$ até R **do**

if $g_{ijk} > g_{(i-1)jk}$ **then**

for $n = 0$ até $R - i$ **do**

if $g_{(i-1)jk} + (n+1)^2 < g_{(i+n)jk}$ **then**

$h_{(i+n)jk} = g_{(i-1)jk} + (n+1)^2;$

else

\perp break;

else

$\perp h_{ijk} = g_{ijk};$

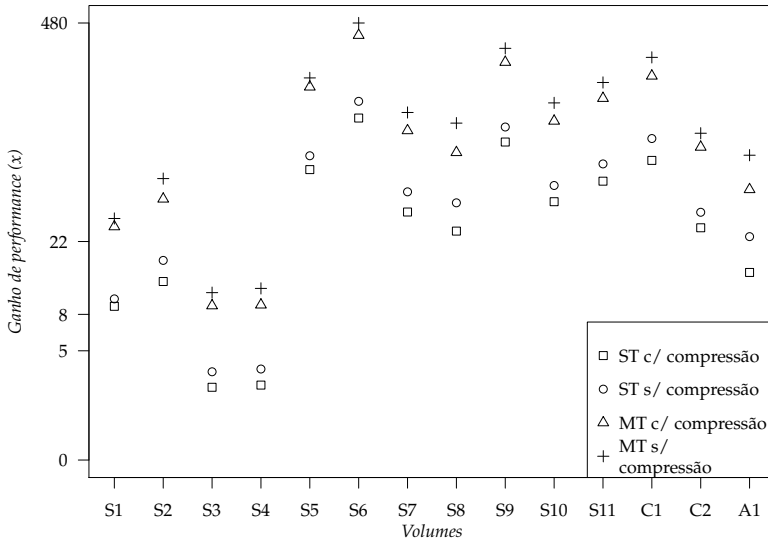


Figura 20: Ganho de performance do mapa de distâncias exatas em relação ao algoritmo de inflar esferas de Dong. Escala logarítmica

em relação a inflar esferas é de aproximadamente 2 a 455 vezes mais rápidos para os volumes de entrada, conforme visto na figura 20. Isso dá-se pelo fato de comparar-se implementações single thread e multithread e também pelo algoritmo de busca de esferas de Dong ser mais sensível ao volume de entrada e a distribuição do espaço poroso, como fica claro em alguns volumes, e. g. S5, S6, S9, C1.

O mapa de distâncias exatas, obtido por meio da execução do algoritmo de Saito, multithreaded ou não, demonstra-se mais robusto, obtendo desempenhos similares para volumes diversos e variando mais conforme a dimensão do volume de entrada, demonstrando assim uma linearidade e um comportamento previsível, para o caso de volumes de poros. Apesar disso, o algoritmo gera esferas que podem estar contidas em outras e estas precisam se não removidas acarretarão um processamento desnecessário nas etapas de aglomeração e geração da rede.

4.2 REMOÇÃO DE ESFERAS

As esferas resultantes do processo de varredura tem de ser cheçadas por um algoritmo de intersecção, com possíveis esferas que estejam contidas

Algoritmo 4: Descobre se S_0 está contido em S_1

entrada: R_0 é o raio da esfera S_0 ; R_1 é o raio da esfera S_1 ; C_0 é o centro de S_0 ; C_1 é o centro de S_1

saída : Verdade, se S_0 está contido e Falso no caso contrário

$v \leftarrow C_1 - C_0$;

$dist \leftarrow \sqrt{dot(v, v)}$;

$rDiff \leftarrow R_1 - R_0$;

retorna: $dist \leq rDiff$;

nela. Senão, persistem muitas informações repetidas nas próximas etapas do algoritmo, podendo gerar até resultados errados ou alterados para os cálculos feitos sobre a rede.

Uma maneira de checar-se se uma esfera S_0 está contida em outra S_1 é verificar se a distância entre elas é menor que a diferença entre seus raios. Assim:

$$dist(S_1, S_0) \leq R_1 - R_0 \quad (9)$$

A partir da equação 9, se utiliza-se os raios R_{min} e R_{max} de Hu Dong, conforme descritos na seção 4.1.1, para intersecção de duas esferas, observa-se que esferas que fisicamente não se intersectariam o fazem. Isso deve-se ao fato do valor do raio para Hu Dong ser inteiro e jamais exato.

O algoritmo 4 apresenta em pseudocódigo o proposto por Ericson (2005), algoritmo que testa se duas esferas estão se intersectando segundo a equação 9. As entradas são os centros e os raios de duas esferas S_0 e S_1 e resultado é se as S_0 está contida ou não. A figura 22 demonstra um exemplo onde as esferas a serem removidas estão destacadas em cinza escuro.

Observa-se na figura 21 que ganho de desempenho, em versão single thread foram piores que o MB original e, mesmo para versões multithreads, o ganho sobre o MB não foi da mesma grandeza da etapa de busca. Isso deve-se ao fato do algoritmo de remoção de Dong, utilizar os raios em valores quadráticos e inteiros para remover as esferas inclusas, enquanto no EMB, a intersecção é feita de forma exata, pela conversão do raio quadrático inteiro, obtido pelo mapa de distâncias quadráticas, para valores exatos, em ponto flutuante, conforme demonstrado na figura 15.

A vantagem de manter-se os valores de distância quadráticas de forma inteira é a possibilidade de evitar muitas comparações em ponto flutuante, pois se uma esfera é menor que uma esfera vizinha, ela não pode removê-la. Mesmo em arquiteturas de cpu modernas, os testes sobre valores inteiros são mais rápidos do que a comparação em ponto flutuante. No gráfico, parece

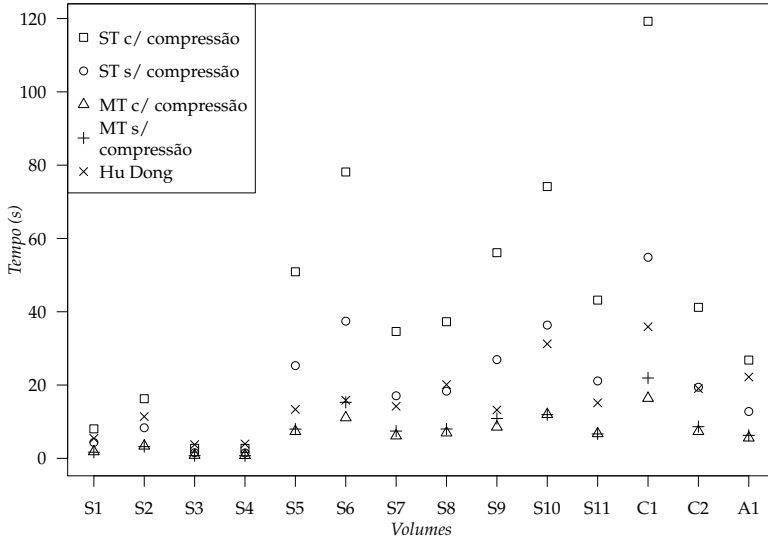


Figura 21: Tempos de execução para a remoção de esferas contidas em outras maiores

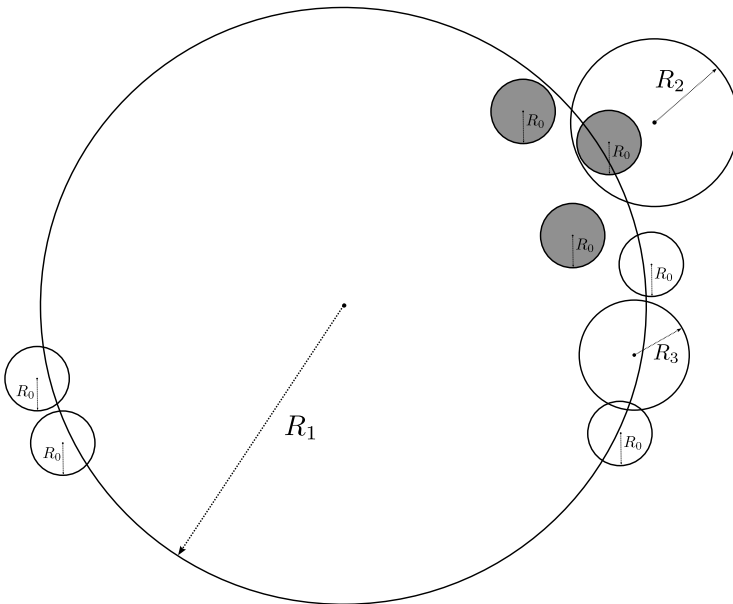


Figura 22: Exemplo de caso de remoção de esferas

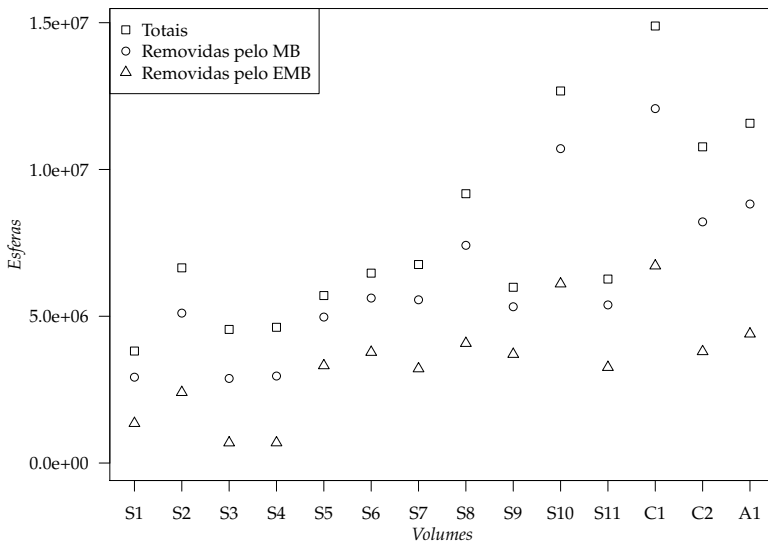


Figura 23: Esferas encontradas na etapa de busca e o número de esferas removidas, por EMB e por MB

que a versão comprimida praticamente não tem overhead em relação a *raw*, contudo isso não é verdade. A versão comprimida possui um tratamento especial, com um algoritmo único capaz de mudar a complexidade da iteração sobre as esferas no volume. A modificação é descrita na seção 4.5.

Finalmente, também é possível otimizar a execução do algoritmo pela ordenação prévia das esferas, tal que esferas pequenas, contidas em maiores, deixam de ser processadas. Os raios formam um conjunto finito definido, possibilitando a utilização direta do *bucket sort* (CORWIN; LOGAR, 2004).

Da aplicação da remoção, por meio do algoritmo 4, resultam as esferas que passarão pela etapa de aglomeração. Na figura 23, observa-se o número de esferas totais, achadas no algoritmo MB e EMB, cujos números iniciais são idênticos, uma vez que na etapa de busca acha-se o tantas esferas quantos voxels no espaço poroso. O número de esferas removidas pelo MB é bem maior porque, conforme visto na figura 15, o raio das esferas para esse é inteiro e maior que o exato, principalmente para poros grandes. Essa característica leva o número final de esferas ser bem menor no algoritmo original.

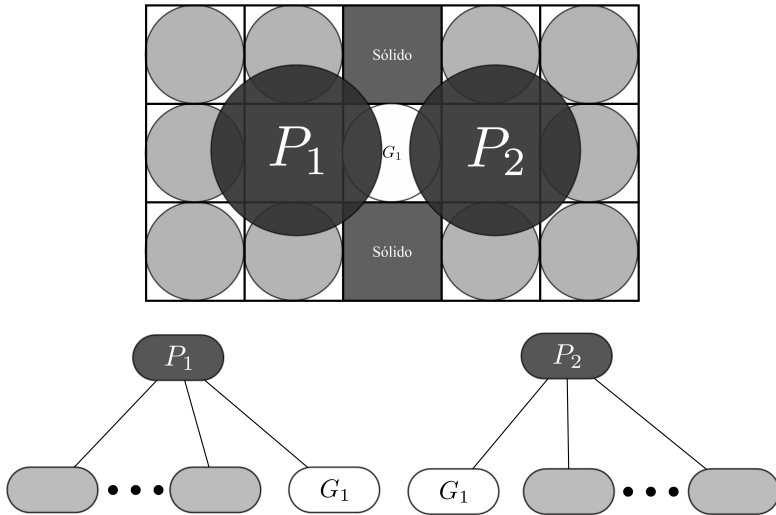


Figura 24: Volume de exemplo e as árvores hierárquicas geradas para os dois poros com uma garganta G_1 ligando-os

4.3 AGLOMERAÇÃO

No passo de aglomeração ou agregação ou ainda aglutinação, traduções válidas de *clustering*, o algoritmo MB de Dong e Blunt (2007) difere bastante do algoritmo de Al-Kharusi e Blunt (2007). Enquanto o último define, durante a aglomeração, uma hierarquia de conjunto de esferas, Dong define uma hierarquia direta de esferas, onde a esfera raiz é um poro. Essa modificação foi imposta para reduzir-se drasticamente o uso de memória que limitava o uso da implementação de Al-Kharusi, mesmo para volumes considerados pequenos, isto é, com pouco mais de cem voxels de lado. Segundo Dong e Blunt (2007), a aglomeração pode ser descrita em cinco passos:

1. Após a remoção das esferas inclusas, sobrarão um conjunto de esferas as quais definem um conjunto finito de raios diferentes. Elas podem ser ordenadas, novamente por um *bucket sort*, por exemplo. O resultado é o vetor de valores Z , ordenado em função do tamanho do raio.
 - (a) Dá-se a todas as esferas $S_i \in Z$ um *rank* infinito. Esse é definido, para fins de implementação, como o maior valor inteiro representável no tamanho de palavra da cpu alvo.
2. Começando-se pela primeira esfera S_0 , do maior conjunto de raios, Z_0 ,

define-se o *rank* dela como sendo a primeira e um novo nome de família é gerado e dado a essa esfera. Cada esfera S_i que intersecte com ela recebe o *rank* de segunda geração. Ainda assim, a esfera recebe o nome de família de S_0 . Cada esfera sabe quem é seu ancestral, mesmo que seja nenhum, como no caso da primeira.

3. Ordena-se então, novamente o conjunto de esferas de mesmo raio, com os *ranks* atualizados pela etapa anterior, do menor para o maior. Para cada esfera S_i que ainda não foi visitada, verifica-se se ela já foi visitada pelo seu *rank*. Se ela não foi, define-se o *rank* dela como sendo a primeira e repete-se a etapa 2 para ela. Se ela foi visitada, então ela verifica as esferas que intersectam com S_i , definidas como o conjunto C_j , e passa-se o nome de família para elas obtido da esfera raiz (poro).
 - (a) Se alguma esfera $S_j \in C_j$ já possui um nome de família diferente do nome da S_i , então essa esfera S_j define uma garganta e duas cadeias de esferas serão extraídas a partir dela, uma ligando até o ancestral de S_i e outra ligando ao ancestral já existente de S_j .
4. O mesmo processo de ordenação é feito até que todas as esferas do conjunto Z_i sejam processadas. Após serem visitadas todas as esferas do conjunto Z_i , começa-se novamente o processo, visitando-se as esferas do conjunto Z_{i+1} .
5. Os mesmos processos de ordenação e aglomeração são aplicados para todos os conjuntos $Z_i \in Z$.

A expansão das gargantas é uma das etapas chaves do MB, uma vez que é graças a ela que a geometria correta da rede é extraída. Nessa etapa, ao encontrar-se uma esfera que pertence a garganta, efetua-se o crescimento da região de garganta em direção aos dois poros envolvidos.

O fator percentual E_f , define a razão entre o raio da maior esfera a ser englobada na garganta e pode ser descrito, tal que se a razão r for menor que E_f , então a esfera é garganta. Para três esferas, a garganta S_g , de raio R_g , a esfera poro S_p , de raio R_p e uma esfera S_i , de raio R_i , a razão é dada por:

$$r = \frac{R_i}{R_p - R_g} \quad (10)$$

Assim, se r for menor que E_f , então a esfera S_i faz parte da garganta e sua ancestral é analisada, até que a razão r seja maior ou igual a E_f ou que a esfera analisada faça parte de um poro. Para toda esfera S_i cujo fator é maior que E_f na cadeia, essa esfera torna-se parte do poro.

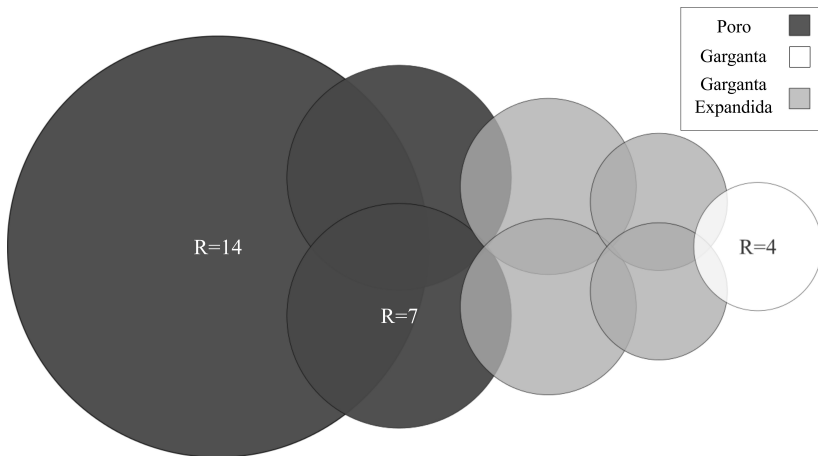


Figura 25: Expansão de gargantas, conforme proposto por Dong. Nesse caso, o fator E_f de expansão é de 70%

A figura 25, demonstra a expansão de uma garganta a partir da descoberta esfera que pertence, ao mesmo tempo, a duas famílias diferentes. Todas as esferas até o ponto de parada farão parte da garganta e se tornarão parte da região definida por essa. Dong e Blunt (2007) assumiram um fator de expansão E_f igual a 70% é o ponto de parada para o algoritmo de expansão. Nota-se que na figura a expansão parou na esfera com raio sete, uma vez que $r = 7 \div (14 - 4) = 0,7$.

Checou-se que o fator de expansão de Dong foi definido analiticamente em função de resultados amostrais de pressão capilar (DONG; BLUNT, 2007, 2009). Como até então, o EMB difere bastante do MB, sobretudo no volume de esferas processadas durante a aglomeração, decidiu-se utilizar vários fatores diferentes, os quais serão vistos no capítulo 5 e, espera-se gerar resultados bastante diferentes, uma vez que o volume, a área e a geometria dos poros e gargantas influenciam diretamente no cálculo de transporte e nas propriedades da rede.

Uma vez aplicado o algoritmo sobre as esferas, os resultados finais são esferas que definem o espaço poroso como garganta, poro ou indefinido. A figura 24 demonstra uma amostra com suas esferas já definidas. Os poros P_1 e P_2 são ligados pela garganta G_1 , enquanto as esferas em cinza fazem parte do volume poroso de cada uma. Ambas as hierarquias relativas aos dois poros são demonstradas abaixo da amostra.

O número de esferas geradas no EMB e no MB estão na figura 26. Nota-se que o EMB tende a gerar mais poros e gargantas que o MB, mesmo

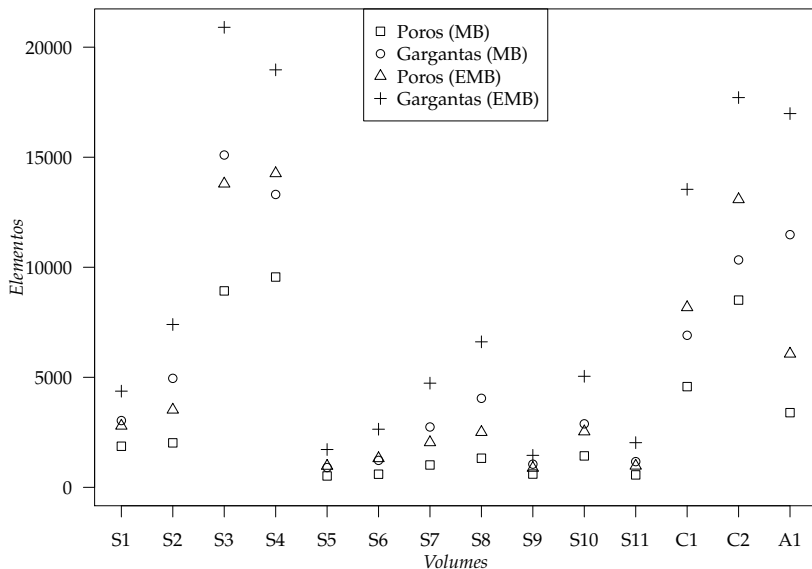


Figura 26: Número de poros e gargantas gerados pelo MB e pelo EMB

que em proporções parecidas. Isso deve-se ao fato de mais esferas permanecerem no EMB após a etapa de remoção, graças ao algoritmo de intersecção ser diferente no EMB. No capítulo 5, tem-se a descrição extensiva dos resultados para as amostras de entrada e essa ideia é trazida com mais informações que formam um plano de fundo para o entendimento das diferenças entre as técnicas.

Finalmente, os poros e gargantas podem gerar a rede para ser observada visualmente e os dados petrofísicos e estatísticos podem ser extraídos por meio dela. Contudo o número de poros indefinidos ainda pode ser grande, sem um pós-processamento adequado sobre o espaço poroso. Esse pós-processamento é definido na etapa de geração da rede de poros e gargantas.

4.4 GERAÇÃO DA RP

Após a aglomeração, tem-se quais esferas fazem parte do poro e garganta. As esferas restantes tem de ser caracterizadas como sendo poro, garganta ou voxel inválido. Essas etapas de pós-processamento refinam o resultado da aglomeração e são, curiosamente, pouco discutidas nos traba-

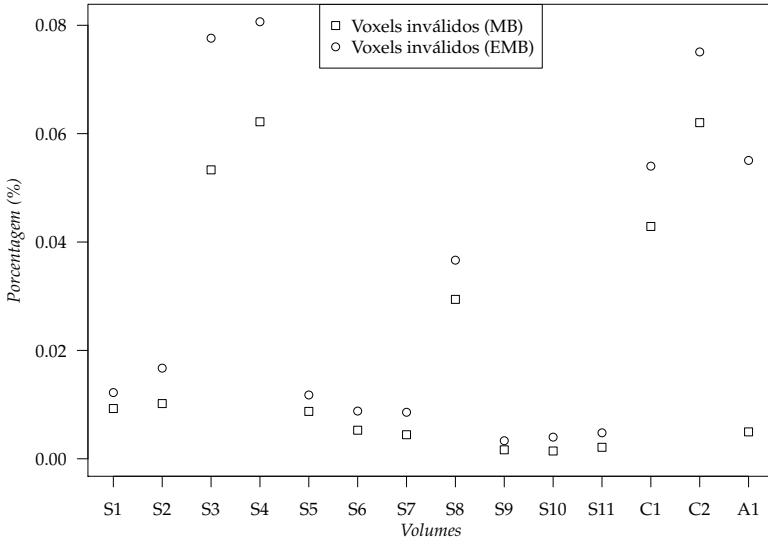


Figura 27: Porcentagem de voxels inválidos, em relação ao total de voxels, no final do processo para ambos os algoritmos de esferas máximas

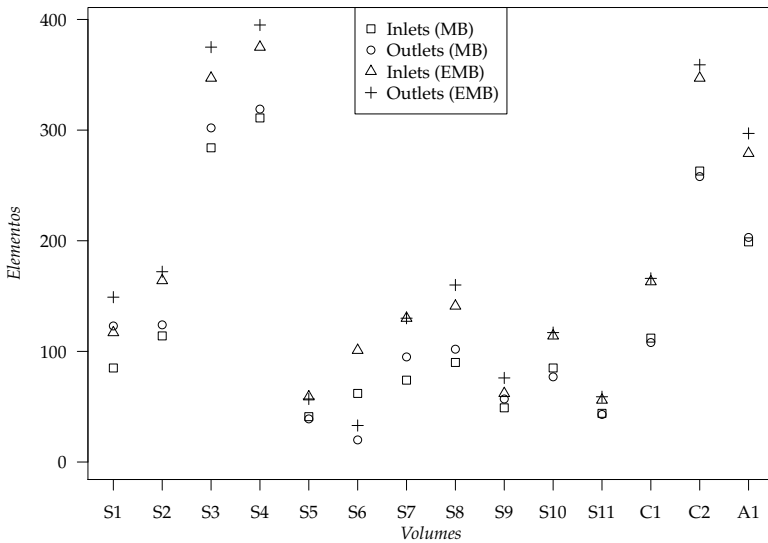


Figura 28: Número de inlets e outlets gerados pelo MB e pelo EMB

lhos de *esferas máximas* anteriores (AL-KHARUSI; BLUNT, 2007; DONG; BLUNT, 2009, 2007). No fim da aglomeração, é possível que hajam esferas em regiões de garganta, que se reprocessadas fariam parte dela. Isso é, essas esferas foram processadas antes de uma de suas vizinhas fazerem parte da região de garganta.

A fim de eliminar grande parte das esferas indefinidas, percorre-se as esferas que definam gargantas, em ordem de grandeza, achando esferas indefinidas que essas intersectem com. Essas esferas são definidas como pertencentes a mesma região de garganta. Após essa passada, tem-se uma segunda que define as esferas processadas restantes como sendo parte do poro. Por fim, tem-se todas as esferas válidas identificadas como poro ou garganta. Idealmente, todas as esferas encontradas contribuiriam para definição da RP, porém a irregularidade de alguns volumes e pequenas *ilhas* de poros desconexas. Isso pode ser frutos de filtragens fracas ou incompletas e a consequência é que parte dos dos voxels pertencentes ao poro sejam invalidados, ou seja, suas esferas representativas são inválidas.

As esferas inválidas são todas aquelas cujos raios são menores que o raio mínimo para ser poro e não intersectam com nenhuma esfera que faz parte do conjunto de poros e/ou gargantas. O gráfico da figura 27, demonstra o número de voxels (e esferas) inválidos para vários volumes, no MB e EMB. Vê-se que o número de voxels inválidos ao final do algoritmo EMB é maior que no MB. Uma possível explicação é, novamente, o algoritmo de intersecção de esferas, uma vez que é possível ele retornar esferas isoladas fisicamente como intersectantes, deixando menos esferas isoladas.

No trabalho de Dong e Blunt (2007), esferas cujos raios são menor que o mínimo permitido não sejam processadas, e portanto invalidadas se não forem intersectadas por outras. Isso faz com que trechos estreitos do espaço poroso, conforme o da figura 15, possam configurar um problema. Contudo, os valores são pequenos para o EMB e MB, isso deve-se ao fato do pós-processamento da rede gerada na aglomeração, comentado anteriormente, e também pela configuração citada ser pouco comum no espaço poroso. Assim, mesmo que o EMB tenha uma quantidade maior de voxels inválidos, ambos valores são bastante pequenos.

Por último, define-se quais elementos fazem parte dos *inlets* e *outlets*. Em Al-Kharusi e Blunt (2007), os *inlets* e *outlets* são definidos como os poros cuja posição no eixo de extração seja inferior a 10% ou superior a 90% da magnitude do eixo, para *inlets* e *outlets*, respectivamente. Isso, desde que com a adição desse elemento ao conjunto referente, esse não ultrapasse 25% do número total de poros. A figura 29 ilustra a definição de *inlets* num eixo de cálculo arbitrário, segundo a definição de Al-Kharusi.

No trabalho de Dong e Blunt (2007), define-se que os *inlets* e *outlets*

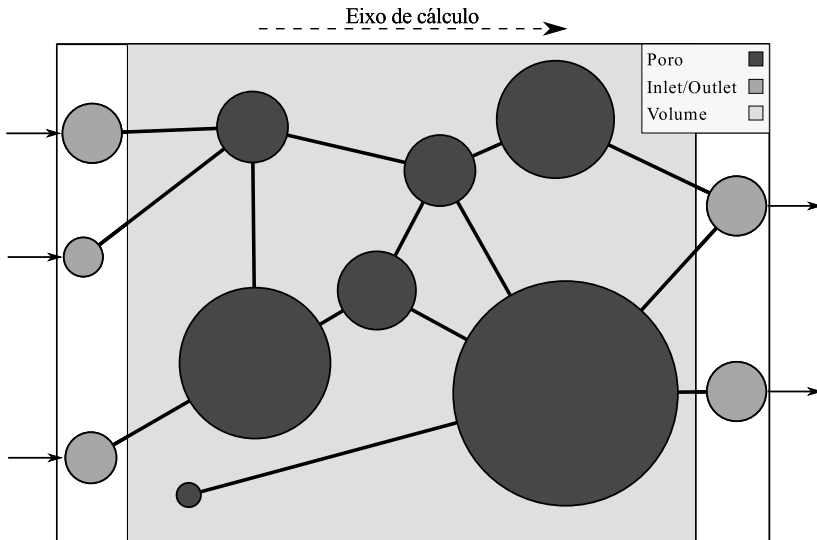


Figura 29: Definição de inlets (esq.) e outlets (dir.), conforme proposto por Al-Kharusi e Blunt (2007)

são aqueles poros que possuem ligação direta com a borda do volume no eixo de interesse. Essa mesma definição é válida no EMB porque assim obtém-se uma representação mais baseada na topologia e conectividade do espaço poroso real. Também, a definição de Al-Kharusi era válida para volumes de tamanho pequeno e talvez não possua a mesma validade para volumes maiores.

4.5 ESTRUTURAS COMPRIMIDAS

As estruturas que armazenam o volume de esferas a partir da etapa de busca e remoção das esferas possuem um tipo de compressão de dados similar a compressão sobre o volume RLE, do capítulo 3. Essas estruturas, ao invés de armazenarem um dado por valor de voxel, armazenam somente os valores relativos aos voxels representativos do espaço poroso. Isso é, utiliza-se o mesmo tipo de compressão por segmentos, apresentado no RLE, porém aplicado a dados não binarizados.

A eficiência final da compressão, depende diretamente da porosidade, definida na equação 1. Sendo n o número de elementos de tamanho t , o espaço total ocupado pela estrutura comprimida é o tamanho total, $n \times t$, multiplicado

Algoritmo 5: Obtém todos os valores de uma linha do volume, iterando por segmento

entrada: V é o conjunto de segmentos da linha de interesse, com os valores dos dados; d é o vetor de saída com um valor por voxel

saída : O vetor d com os valores da linha de interesse

for $i = 0$ até $i \leq \text{length}(d)$ **do**

```

  /*Todas posições são inicializadas com valores
  nullos                                     */
   $d[i] \leftarrow \varepsilon;$ 

```

for $v \in V$ **do**

```

  for  $i = v.\text{begin}$  até  $i < v.\text{end}$  do
     $d[i] \leftarrow v.d[i - v.\text{begin}];$ 

```

pela própria porosidade P .

Como, em geral, os volumes apresentam porosidades menor que 50%, as taxas de compressão são bastante interessantes. Contudo, ainda existe, como no RBV, o overhead da etapa de busca do valor. Isso é, a complexidade da busca de um pixel qualquer é $\log n$, para uma linha de tamanho n .

É possível, assim como na busca de valores por linha, trazer a performance mais próxima de dados não comprimidos. Para uma busca qualquer, pode-se obter o segmento relativo a essa busca e iterar os valores vizinhos, na linha, em função do segmento atual.

O algoritmo 5 ilustra a iteração por segmentos ao invés de obter-se individualmente cada valor de pixel. Assim, tem-se uma complexidade $O(n)$, porém, como nem sempre os algoritmos iteram sobre uma linha inteira, pode-se fazer obter o elemento inicial em tempo $\log(n)$ e repetir o processo de iteração de segmentos até o fim do intervalo desejado. Isso é, a complexidade final de uma busca, por linha, para n elementos torna-se $O(\log n + n)$ ao invés de $O(n \log n)$, que é mais próximo do $O(n)$ original. A contrapartida dessa técnica é a necessidade de passar um vetor do tamanho da linha do volume, ou seja, há um consumo maior de memória.

4.6 CONCLUSÃO

Nesse capítulo, definiu-se as diferenças básicas do MB em relação a outros algoritmos e, ademais, do MB e EMB. Observa-se que a alteração do método de intersecção para esferas afeta bastante o resultado final da RP.

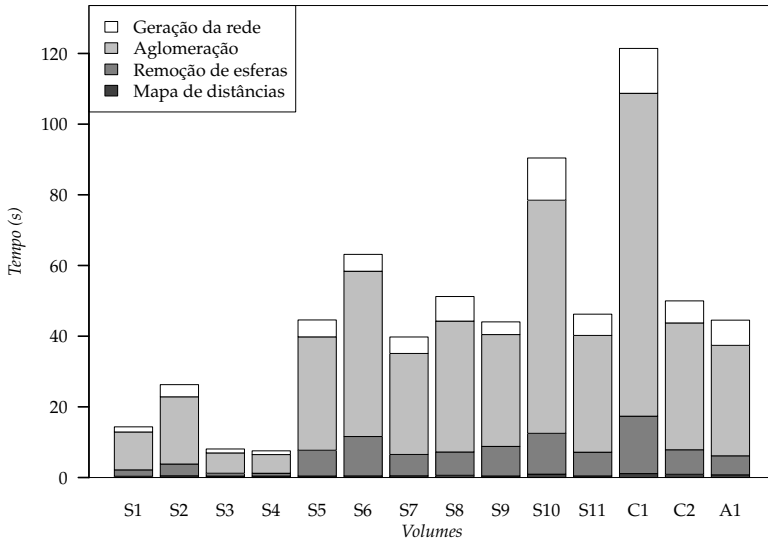


Figura 30: Tempo levado, em cada etapa do EMB, para volumes diversos. O Fator E_f de expansão é 50%

Na figura 23, tem-se o número de esferas totais e removidas em ambos. O número de esferas remanescentes no EMB é bem maior que no MB o que afeta diretamente o resultado da rede, na figura 26, onde o número de poros e gargantas no EMB é constantemente maior que no MB.

Ao analisar-se a rede gerada pelos algoritmos, o MB presente, em geral, poros e gargantas maiores, mas o volume poroso representado por ambas deve ser o mesmo. Portanto, espera-se que os resultados de cálculo de *permeabilidade absoluta* e o *fator de forma* sejam diferentes para ambos, no capítulo 5. O que é observado é uma semelhança, principalmente na permeabilidade absoluta, porém uma discordância quanto ao fator de forma, com tendências diferentes.

A variável E_f para o MB original é 70%. Decidiu-se que esse valor poderia não ser o melhor possível, já que o EMB apresenta mais esferas e difere, mesmo em número de poros e gargantas, em relação ao MB. Os valores de fator de expansão 50%, 60%, 70% e 80% são assumidos nesse trabalho para ter-se uma amostra significativa que possibilite o estudo de um melhor valor possível para ele. As figuras 30, e 31 demonstram o tempo de execução total para cada volume de entrada, e o tempo relativo, levado em cada etapa.

As etapas do algoritmo, não variam muito, relativamente as outras com a mudança do fator de escala, somente a etapa de geração da rede que torna-

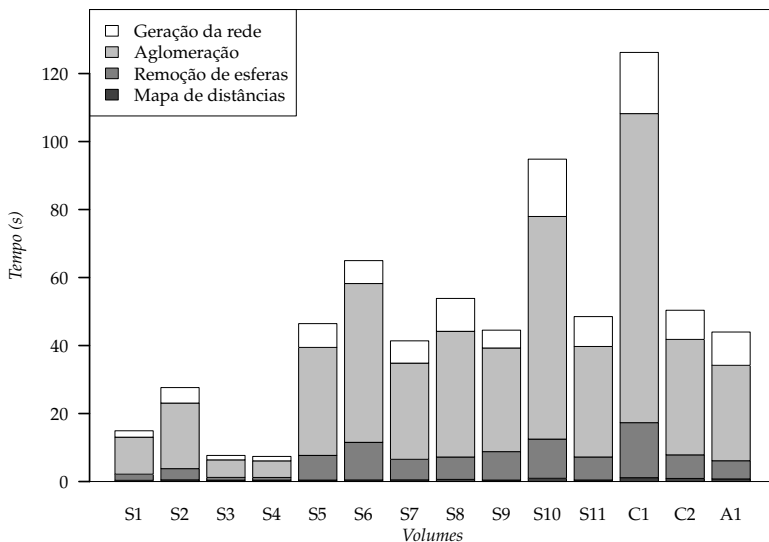


Figura 31: Tempo levado, em cada etapa do EMB, para volumes diversos. O Fator E_f de expansão é 80%

se mais custosa porque com um fator de expansão maior, mais esferas são gargantas e tem de ser pós-processadas. O tempo total, cresce em função do fator de expansão e tem seu ápice no carbonato C1, variando de 120 segundos, para E_f igual a 50% e 60%, até aproximadamente 140, nos fatores 70% e 80%.

A variação, quase que linear, do tempo levado em função da variação de E_f , caracteriza a robustez atingida com o EMB. No MB, a variação, sobretudo na etapa de inflar esferas, faz com que o tempo levado seja bastante diferente para diversos volumes de entrada. Também, para os vários volumes de entrada, os tempos totais do algoritmo EMB são bem menores que o MB. Isso deve-se ao fato do conjunto de técnicas de aceleração de para dados comprimidos aplicados na implementação e também pelo fato de vários algoritmos, principalmente a aglomeração, serem paralelos. Essa última é a etapa mais custosa do EMB e algumas estratégias para reduzir seu tempo total de execução são discutidas no capítulo 6.

Conseguiu-se ter um desempenho superior ao MB, cujos tempos de geração estão na figura 16. Mesmo que as diferenças no EMB façam com que mais esferas tenham de ser processadas, manteve-se um dos objetivos deste trabalho porque o tempo total de execução para o EMB foi, em todos os casos, menor que o MB. Resta apenas descobrir os impactos do algoritmo

sobre as propriedades e os cálculos feitos sobre a rede.

5 PROPRIEDADES DA REDE E CÁLCULOS DE TRANSPORTE

Nesse capítulo, são abordados as propriedades da rede reconstruída pela técnica EMB, relacionando-as diretamente com as propriedades da rede MB, de Hu Dong. Inicialmente, será feita uma comparação lado-a-lado para um volume amostral de arenito e o mesmo para um volume de rocha sedimentar carbonática. Em sequência, serão descritos os valores gerais e as propriedades para várias redes diferentes.

Na segunda parte, serão abordadas a previsão de transporte referente as redes, com os valores de permeabilidade absoluta e fator de forma para as redes EMB e MB.

Todos os valores extraídos foram a partir do resultado do simulador *two phase* proposto por Valvatne. O algoritmo MB, de Dong e Blunt (2007), não foi capaz de gerar todas as redes a partir dos volumes iniciais. Também, os resultados para as redes que foram testadas não foram idênticos aos da tese em questão. Assim, assume-se que o problema sejam as variáveis de entrada.

Como o *two phase* possui muitas combinações de configuração e mesmo para ele, os resultados variam de acordo com as bibliotecas matemáticas da plataforma, diferentes em Windows e Linux, e causam diferenças nos resultados. Pelo fato de os dados de entrada do *two phase* não terem sido definidos por Dong e Blunt (2007) foi impossível tentar produzir os mesmos resultados. Mesmo assim, no final do capítulo é feita uma comparação direta com os resultados da tese em questão. Lembra-se que o valor do fator de expansão para o MB é sempre 70%, conforme descrito no capítulo 4.

As configurações utilizadas para o *two phase* e o MB de Dong, neste trabalho, encontram-se nos anexos, capítulo 7. Entre as inúmeras variáveis descritas estão a viscosidade dos fluidos envolvidos e pressões de entrada e saída. Esses parâmetros são para uma simulação *multifásica*, mesmo que os valores abordados neste capítulo sejam somente relacionados a variáveis *monofásicas*.

5.1 ESTUDO DE CASO S1

O volume S1, visualizado na figura 32, é interessante para estudo, uma vez que é um volume pequeno, de dimensão 300^3 , com tempo de geração da rede pequeno e propriedades bem definidas. Na tese de Dong e Blunt (2007), valores amostrais para esse rede são determinados, em comparação com Oren e Bakke (2002). Também, o algoritmo MB gerou redes, em alguns casos, que não foram possíveis de rodar na implementação de Valvatne, na máquina M1.

	EMB	MB
Porosidade da rede	14.1	14.1
N de poros	2794.0	1868.0
N de gargantas	4371.0	3048.0
N de inlets	117.0	85.0
N de outlets	149.0	124.0
N de isolados	173.0	138.0
Elementos circulares	43.0	0.0
Elementos quadrados	65.0	19.0
Elementos triangulares	7059.0	4899.0

Tabela 3: Características da RP, no EMB e MB, para o volume S1

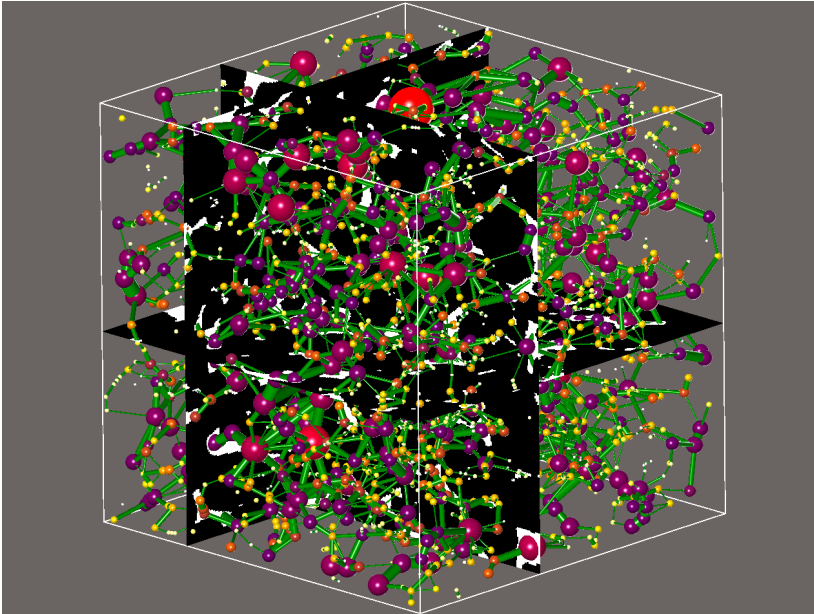


Figura 32: Rede gerada pelo EMB para o volume S1

Nesse trabalho, será feita uma comparação direta de valores amostrais para o EMB e o MB, ao mesmo tempo introduzindo diferentes variáveis estatísticas de comparação.

Na tabela 3, estão os valores absolutos para várias variáveis da RP nos dois casos. A porosidade da rede é a porosidade obtida pela soma dos volumes de poros e gargantas dividido pelo volume total. Pelo fato do número de voxels inválidos variar, a porosidade da rede também não é sempre a mesma da real, mas nessa RP o valor foi idêntico para o MB e o EMB com uma casa de precisão.

Na rede gerada pelo EMB o número de poros é 2794, enquanto na rede gerada pelo MB é 1868, ou seja, o EMB gera 50% poros a mais. Afim de comparar-se as populações de poros em ambos os algoritmos, utilizou-se a estratégia de normalizar as populações em função do número total de poros. Assim, tem-se uma comparação direta da distribuição dos raios de poros para ambos os resultados.

O número de gargantas geradas no EMB é 4371, enquanto no MB é de 3048. A proporção de poros em relação a gargantas em ambos é por volta de 60%, caracterizando a dissimilaridade no resultado de ambas. Ainda assim, o EMB gera mais de 40% de gargantas a mais, graças as modificações descritas no capítulo 4.

Define-se os inlets e outlets conforme o trabalho de Dong e Blunt (2007), onde a partir de poros que encostam na borda criam-se novas gargantas, conforme descrito na seção 4.4. Os números foram novamente dissimilares, 117 inlets e 149 outlets na rede do EMB e 85 inlets e 124 outlets na rede do MB. Nesse caso, gerou-se mais inlets e outlets no EMB, apesar de não ser sempre o observado, como nota-se na figura 28.

Elementos isolados, para o simulador *two phase*, são aqueles elementos que não possuem, simultaneamente, ligação com o inlets e outlets. Na RP do EMB constatou-se 173 desses poros enquanto na RP do MB foram 138, ou seja, o primeiro gerou aproximadamente 25% de elementos isolados a mais. Ou seja, nesse caso, a rede do EMB possui mais poros e esses são mais conexos, percentualmente uma vez que, como já constatado, essa rede tem 50% de poros a mais que a do MB.

Na tabela 3, define-se os valores para elementos circulares, quadrados e triangulares. O número de elementos triangulares é maior para as duas redes, contudo para a rede do MB, o número de elementos circulares chega a zero e a proporção de elementos triangulares é bem maior, chegando a mais de 99%. Esse fato será abordado na seção 5.5.1.

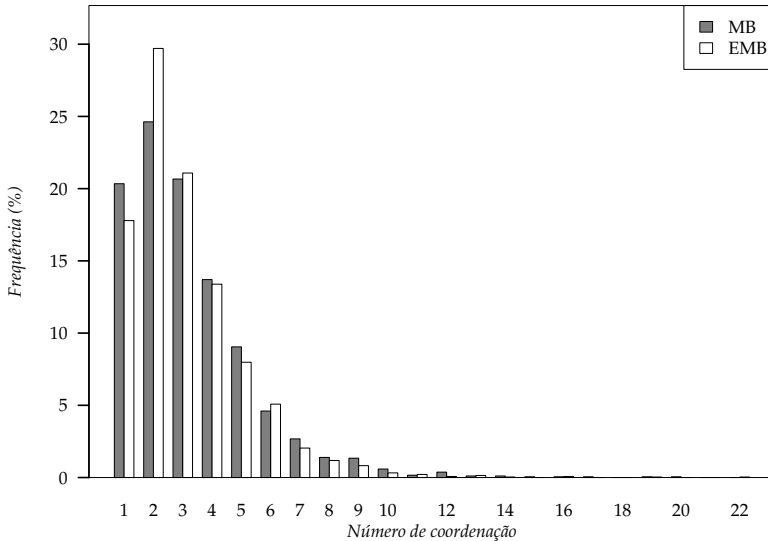


Figura 33: Frequência do número de coordenação nos algoritmos EMB e MB para o volume S1

5.1.1 Número de coordenação

O número de coordenação é uma variável tipicamente utilizada em caracterização atômica de materiais. É, para a rede de de poros, uma propriedade importante por denotar a conectividade interna da rede, isso é, o quanto os poros internos da rede encontram-se conectados. O número de coordenação para um poro qualquer é o número de gargantas que ligam ele a *outro* poro.

A figura 33 apresenta as frequências percentuais do número de coordenação no volume S1, para todos os poros da RP. O MB parece apresentar maiores frequências em números de coordenação maiores e nos poros com apenas uma conexão. Nota-se uma grande concentração de uma a quatro conexões, representando em ambos os casos mais de 70% do total de poros.

Pelo fato de muitos poros pequenos terem sido removidos a mais na etapa de remoção de esferas inclusas em outras, graficamente apresentado na figura 21, sobram mais poros maiores, mais bem conectados que os poros pequenos e desconexos remanescentes. Assim, esse resultado talvez seja proveniente das diferenças entre nas intersecções esfera-esfera entre o EMB e MB. Também, como os valores são em frequência, os poros maiores no EMB

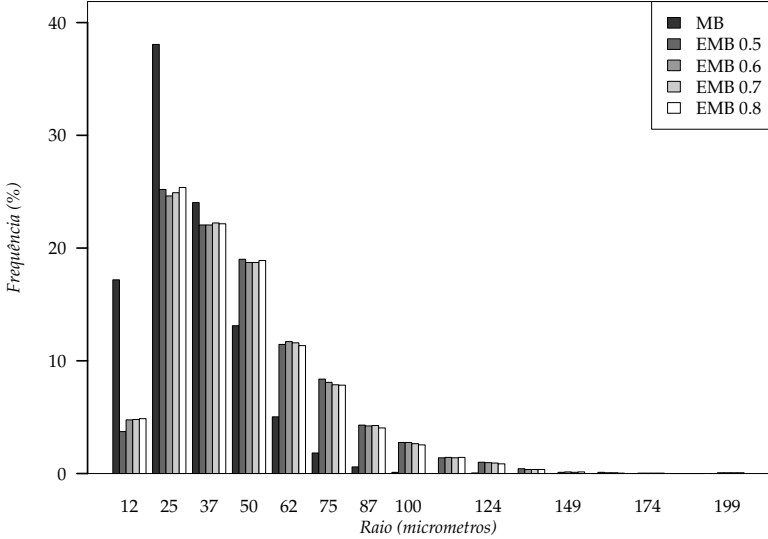


Figura 34: Distribuição de raios de poros para ambos algoritmos. Fatores de expansão 50%, 60%, 70% e 80% para o EMB

ficam obscurecidos pelo maior número total de poros, quando comparado ao MB.

Apesar de interessantes, os números de coordenação do S1 não são suficientes para extrair-se dados conclusivos. Faz-se necessário um estudo mais profundo, com mais dados do mesmo volume e outros, principalmente com volumes maiores e de diferentes resoluções.

5.1.2 Poros

Sendo R_v o raio extraído do volume esférico total do poro, definido em função do volume V_p , em voxels do poro. O raio R do poro é idêntico a R_v , o qual é definido por:

$$R_v = \sqrt[3]{V_p * \frac{3}{4\pi}} \quad (1)$$

Na figura 34, tem-se as distribuições percentuais de faixas de raios do MB e do EMB, para os fatores de expansão 50% e 80%, respectivamente. As faixas 60% e 70% foram omitidas por serem demasiadamente idênticas as

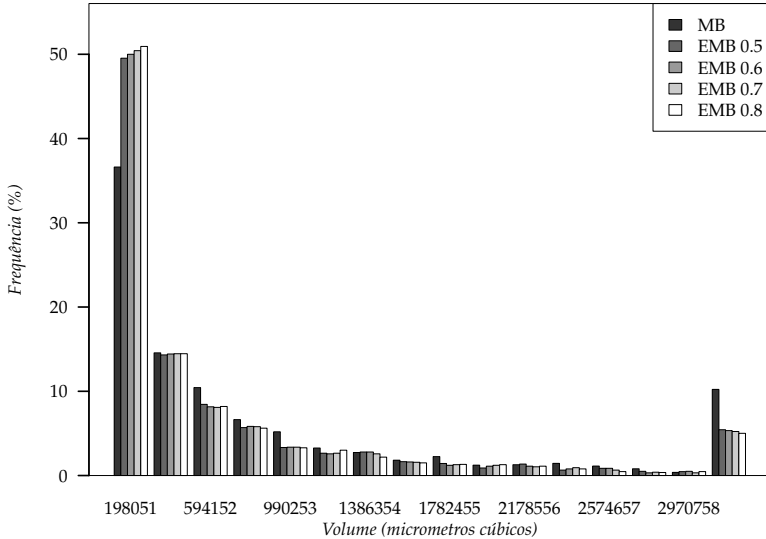


Figura 35: Frequência dos volumes dos poros para as redes EMB e MB do volume S1. A última faixa engloba todos os valores maiores que quatro vezes a média

duas apresentadas.

Observa-se que no MB os poros estão altamente concentrados em valores menores que 50 micrômetros, uma vez que mais de 70% dos poros possuem raios dentro desse limite. Também, raios maiores que 100 micrômetros são praticamente inexistentes para o MB. Em contraste, no EMB os valores encontram-se menos concentrados em valores pequenos e bem mais distribuídos variando bem pouco em função do fator de expansão de gargantas utilizado.

Como os poros apresentam uma distribuição mais acentuada em valores de raio alto no EMB, e uma menor população em valores baixos, acredita-se que a regularidade e a baixa quantidade de poros pequenos foram bem extraídas do volume arenítico. Ou seja, a rede EMB caracteriza os poros em volumes areníticos adequadamente.

Para fatores de expansão maiores, no EMB, os valores encontram-se levemente mais concentrados nas faixas menores de raio. Ainda assim, visualmente, a distribuição dos raios é quase idêntica. Isso deve-se ao fato de, em geral, o volume do poro ser pouco afetado pela taxa de expansão. Nas gargantas, os fatores de expansão tem impactos bem maiores porque influenciam diretamente o comprimento e a distribuição desses sobre a RP.

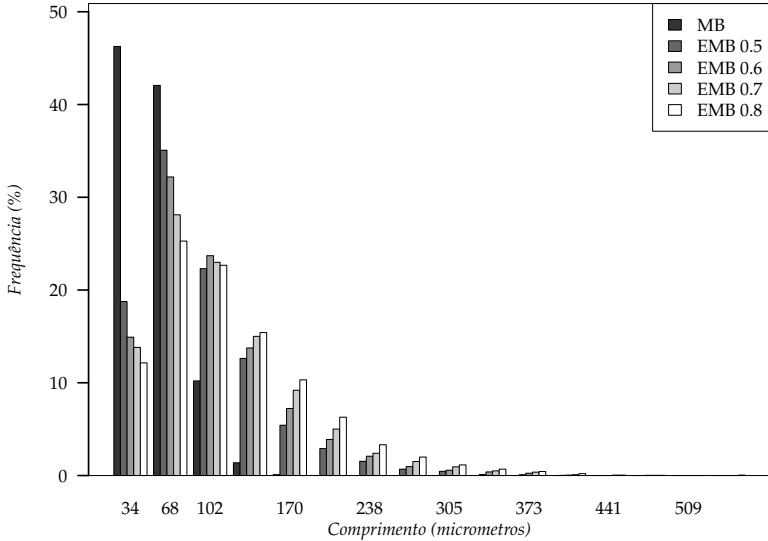


Figura 36: Distribuição de comprimentos das gargantas para ambos algoritmos no S1. Fatores de expansão 50%, 60%, 70% e 80% para o EMB

5.1.3 Gargantas

O comprimento de uma garganta é definido como a distância entre as interfaces de poro, isso é, para uma garganta qualquer:

$$c = \text{dist}(S_1, S_0) - R_1 - R_0 \quad (2)$$

Onde S_1 e S_0 são as esferas conectadas pela garganta e R_1 e R_0 seus respectivos raios, definidos pela equação 1. A função dist retorna a distância entre os centros de duas esferas.

Na figura 36, demonstra-se os resultados de distribuição de comprimento em gargantas. Nota-se um crescimento nas gargantas de maior comprimento em função do fator de expansão utilizado, conforme é esperado. Isso demonstra que o fator contribuem, diretamente para o comprimento total da garganta, ou seja, o comportamento da rede para o aumento do fator é adequado.

Em relação aos resultados do MB, o EMB apresenta, novamente, valores mais distribuídos. Mais de 90% das gargantas geradas pelo algoritmo original tem até 100 micrômetros. Mesmo que haja uma grande concentração nessa faixa, no EMB isso representa pouco mais de 50%. Essas diferenças

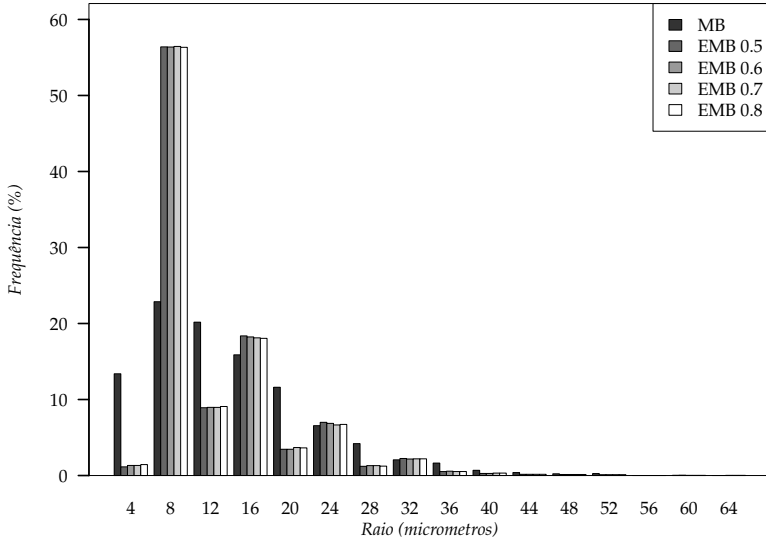


Figura 37: Distribuição de raio das gargantas para ambos algoritmos no S1. Fatores de expansão 50%, 60%, 70% e 80% para o EMB

tem impacto sobre os cálculos de previsão de transporte, principalmente no *fator de formação* e na *permeabilidade absoluta*.

A figura 37, demonstra os raios de cilindros nas redes geradas pelo EMB, para o fator de expansão variando, e MB. Observa-se que o MB tem resultados muito mais comportados nesse caso e isso deve-se ao fato da rede gerada pelo MB utilizar uma métrica diferente da utilizada na implementação do EMB. No primeiro, o raio de um cilindro é definido como no trabalho de , ou seja em função do raio da esfera que define a garganta e os raios dos poros conectados. Já no segundo, utiliza-se o mesmo raciocínio do raio do poro, isso é, obtêm-se o valor do raio em função do comprimento e do volume da garganta. Isso é, para uma garganta G_i qualquer, pertencente ao conjunto de gargantas do volume, com volume V_i e comprimento L_i define-se que o raio R_i da garganta é:

$$R_i = \sqrt{\frac{V_i}{\pi L_i}} \quad (3)$$

Essa equação é obtida diretamente da equação de volume de um cilindro, $V = \pi R^2 L$. Mesmo com essa diferença, o comportamento do EMB para o crescimento da garganta é mais ou menos constante. Esse resultado

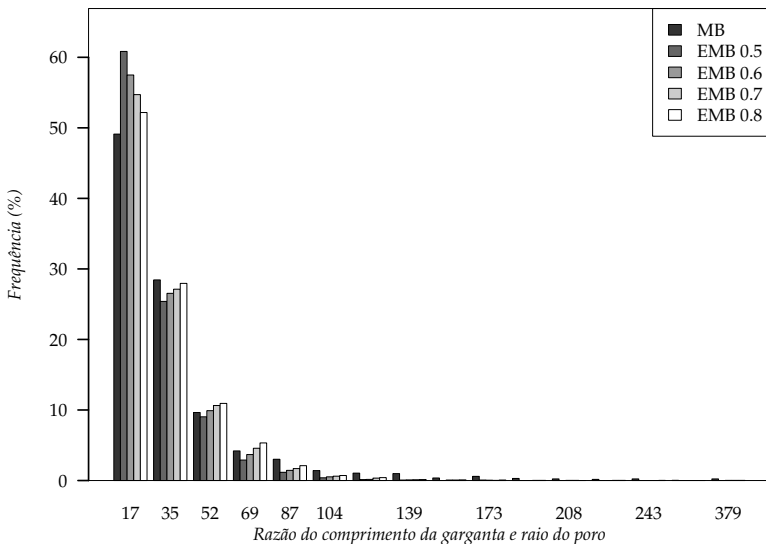


Figura 38: Razão do comprimento da garganta pelo raio da mesma no volume S1. A última faixa são os valores maiores que quatro vezes a média

é adequado porque pela equação 3, o raio cresce inversamente proporcional ao comprimento e proporcional ao volume. Ou seja, como para fatores de expansão, tanto o volume quanto o comprimento são maiores, o raio tende a manter-se na mesma escala. Acredita-se que com a definição do raio em função do comprimento da garganta, obtenha-se cilindros mais condizentes com a geometria real da garganta.

Uma possível caracterização das gargantas de um volume pode ser observada por meio da razão do comprimento das gargantas em função do tamanho de seu raio. Assim, tem-se uma ideia de qual proporção encontram-se as gargantas. Esse dado, aliado aos outros analisados, provê uma definição geométrica das gargantas em um volume. Na figura 38, tem-se a frequência de várias faixas de razão par ao volume S1. Nesse gráfico, a última faixa está em função da média até o maior valor de razão, portanto está visualmente escalado diferentemente das outras. Nota-se que os valores de razão crescem, em média, para o EMB, o que está de acordo com o observado nos gráficos das figuras 36 e 37, que demonstram o crescimento do comprimento da garganta e uma certa constância no tamanho do raio. Assim, tem-se que a razão escala com o aumento do fator de expansão. A razão média na rede MB é de 17.35, enquanto na rede EMB é de 13.53, 14.60, 15.32 e 16.24, para os fatores 50%, 60%, 70% e 80% de expansão, respectivamente.

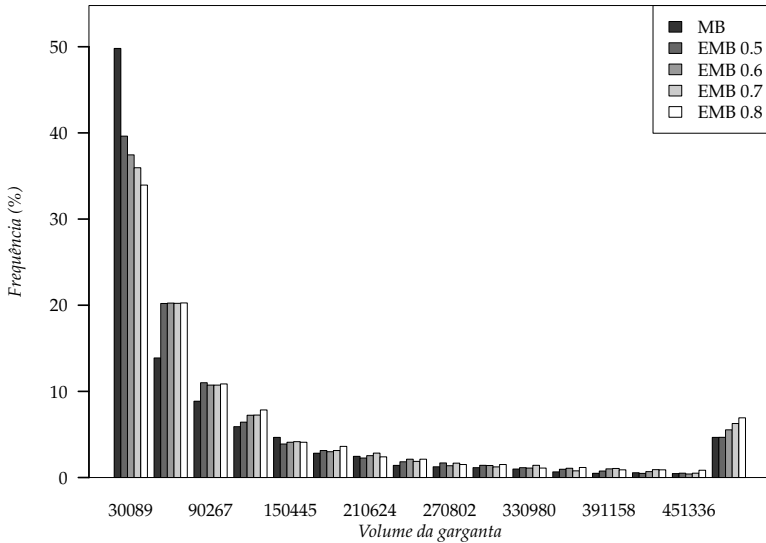


Figura 39: Frequência dos volumes das gargantas para o volume S1. A última faixa são os valores maiores que quatro vezes a média

A frequência de volumes de garganta fornece a informação visual de quão volumosas são as gargantas. Na figura 39, tem-se a frequência de faixas de volume para as gargantas onde a última faixa é definida em função da média. Tem-se uma grande aglomeração para valores pequenos, característica de acordo com a maior aglomeração de valores de raio para gargantas e poros em faixas de dezenas de micrômetros. Ainda assim, a escala de volume varia bastante, sobretudo nas gargantas com raios e comprimentos maiores cujos volumes serão cubicamente maior que outros.

5.2 ESTUDO DE CASO C1

O volume C1, visualizado em forma de esferas e cilindros na figura 40, é uma amostra carbonática discutida também no trabalho de Dong e Blunt (2007). Essa amostra, possui uma alta irregularidade, dada os processos diagenéticos os quais a originam. Ela é interessante por apresentar uma forte contrapartida ao volume S1, de menor porosidade e mais regular e também por apresentar, por sua morfologia, similaridade com rochas diversas de bacias sedimentares. Recomenda-se a leitura da seção 5.1 porque nela várias definições, nesta seção utilizadas, são explicadas.

	EMB	MB
Porosidade da rede	24.1	24.1
N de poros	8177.0	4576.0
N de gargantas	13542.0	6915.0
N de inlets	163.0	113.0
N de outlets	166.0	107.0
N de isolados	5454.0	3317.0
Elementos circulares	335.0	0.0
Elementos quadrados	302.0	67.0
Elementos triangulares	21084.0	11426.0

Tabela 4: Características da RP, no EMB e MB, para o volume C1

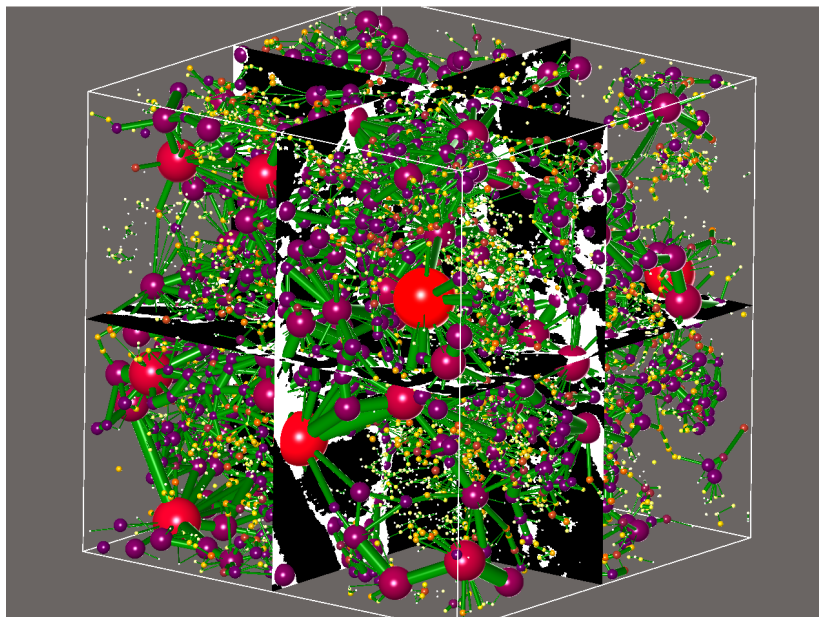


Figura 40: Rede gerada para o volume C1

Na tabela 4, encontram-se os valores de algumas propriedades da rede para as duas redes. No EMB, a rede gerada possui 8177 poros e 13542 gargantas, expressando uma proporção de poros em relação a gargantas em torno de 60%. Para o MB, a relação é similar, com 4576 poros e 6915 gargantas, ou seja, 66%. Novamente, a rede gerada obteve mais poros e gargantas porque a rede do EMB possui aproximadamente 78% de poros e 95% de gargantas a mais. Valores percentuais mais altos, quando comparados aos do S1.

O número de inlets e outlets foi de 163 e 166 para a rede das esferas exatas, enquanto a rede da implementação de Dong apresentou 113 e 107, respectivamente. Novamente, o número de inlets e outlets foi maior na rede do EMB, mas relembra-se que isso não ocorre para todos os casos, conforme visto na figura 28.

Uma grande diferença dos resultados do C1 com relação ao S1 é o número de poros isolados, totalizando 5454 na rede do EMB e 3317 no MB, ou seja 66% e 72% do número total de poros, respectivamente. Isso deve-se ao fato da morfologia interna da rocha, com muitos poros pequenos desconexos e poucos poros grandes bem conectados. Assim, é possível que pela utilização de filtragens mais fortes sobre o volume binarizado e o aumento no tamanho mínimo de um poro, parametrizável em ambos os algoritmos, tenha um impacto sobre esse resultado.

Os tipos de elementos gerados nas duas redes são bastante similares. Nota-se que na rede do MB tem-se zero elementos circulares de novo. Isso, reafirma-se, será um motivo de observação na seção 5.5.1.

5.2.1 Número de coordenação

A plotagem da frequência do número de coordenação é demonstrado na figura 41, para a amostra C1. Nela, é possível observar uma grande aglomeração em até quatro conexões por poro. Contudo, o mais frequente é ter uma conexão, diferentemente do S1, onde duas conexões é o mais frequente. Isso, se levado em consideração a figura 42, demonstra que o volume C1 é composto por poucos poros grandes, altamente conectados (máximo de 55 conexões) e possui mais poros menores. Ou seja, são evidências da irregularidade e heterogeneidade da amostra.

No esferas máximas exatas, o número de conexões é maior que o MB para valores maior que um, porém a partir de sete conexões ele apresenta maior frequência novamente. Novamente, o comportamento foi parecido com o S1, onde essa inversão ocorria para quatro conexões ou mais.

A irregularidade da amostra é evidente quando observa-se número de conexões próximos dos valores máximos. A baixa frequência que poros desse

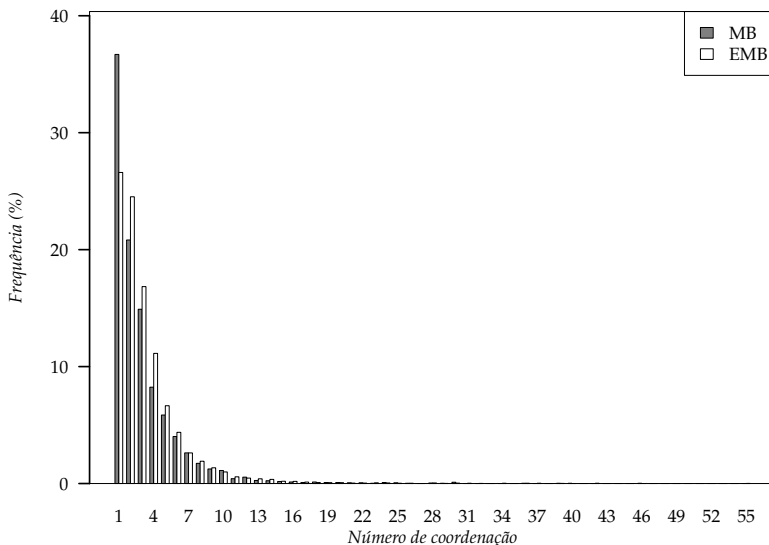


Figura 41: Frequência do número de coordenação nos algoritmos EMB e MB para o volume C1

tipo aliadas a grande quantidade de poros pequenos é característica desse tipo de volume. Ainda assim, tais características foram capturados de maneira adequada pelo EMB.

5.2.2 Poros

A distribuição de raio de poros no volume S1 era quase idêntica para vários fatores. Na figura 42 tem-se as distribuições percentuais de faixas de raios do MB e do EMB, para os fatores de expansão de 50% a 80%. Novamente, o raio final dos poros, obtido pela equação 1 varia pouco com o fator de expansão utilizado. Entretanto, nesse volume os raios estão muito mais concentrados em valores inferiores, isso é, há uma quantidade maior de poros de tamanho pequeno, e poucos poros grandes, quando comparado ao arenito S1. Isso também pode caracterizar uma falha na etapa de aquisição, ou seja, se a resolução utilizada nessa etapa fosse melhor, talvez esses elementos pequenos e desconexos apresentariam-se bem conectados.

Em relação ao esferas máximas, o EMB apresenta, como no S1, uma distribuição de raios dos poros maior. No MB, mais de 70% dos raios tem até 8 micrômetros, enquanto na versão exata, a mesma faixa representa pouco

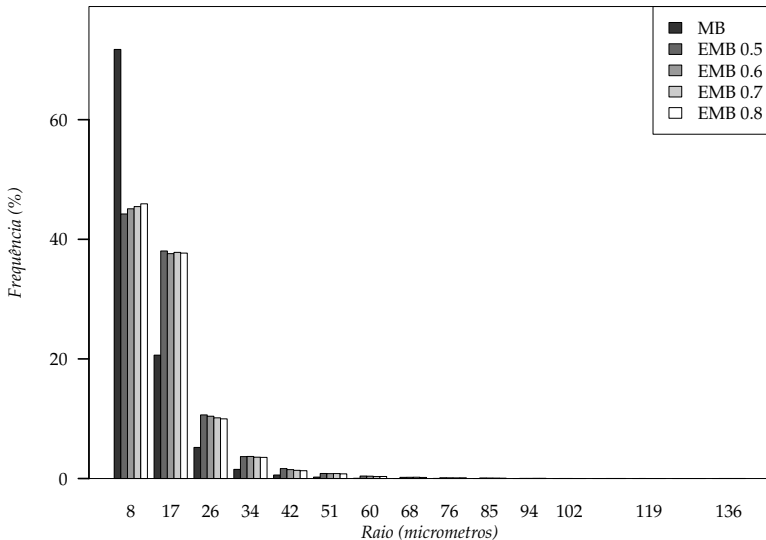


Figura 42: Distribuição de raios de poros para ambos algoritmos no volume C1. Fatores de expansão 50%, 60%, 70% e 80% para o EMB

mais de 40% dos poros. Entre 8 e 17 micrômetros estão 20% dos poros e quase 40% para o MB e EMB, respectivamente. Portanto, houve um crescimento expressivo nessa faixa de raios de poro para o EMB. O mesmo acontece para raios maiores, mas os valores absolutos para as demais faixas são menos expressivos que nas duas faixas citadas.

As faixas de volume de poros quando relacionadas a frequência em que ocorrem geram os resultados vistos na figura 47. Nela, a última faixa de frequência une todos os valores maiores que quatro vezes a média. Observa-se que, assim como nas gargantas, o volume dos poros no C1 é menor que no S1. Tem-se alguns poros grandes, porém a grande quantidade de poros é pequeno e desconexo, conforme visto pelo número de elementos isolados na tabela 4 e pela distribuição do número de coordenação, na figura 41. Conforme já observado, isso indica a necessidade de uma aquisição em uma melhor resolução.

5.2.3 Gargantas

O comportamento do crescimento das gargantas, visto na figura 44, é mantido para as gargantas dessa RP, como no S1. Apesar disso, as gargan-

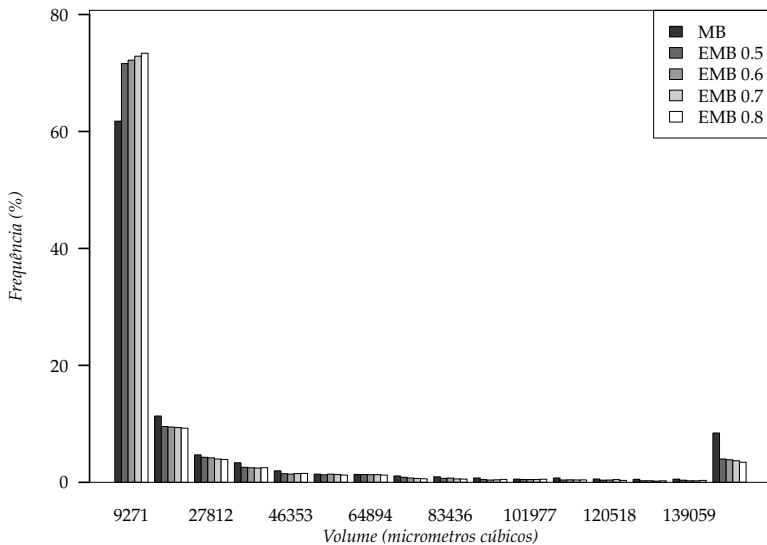


Figura 43: Frequência dos volumes dos poros para as redes EMB e MB do volume C1. A última faixa engloba todos os valores maiores que quatro vezes a média

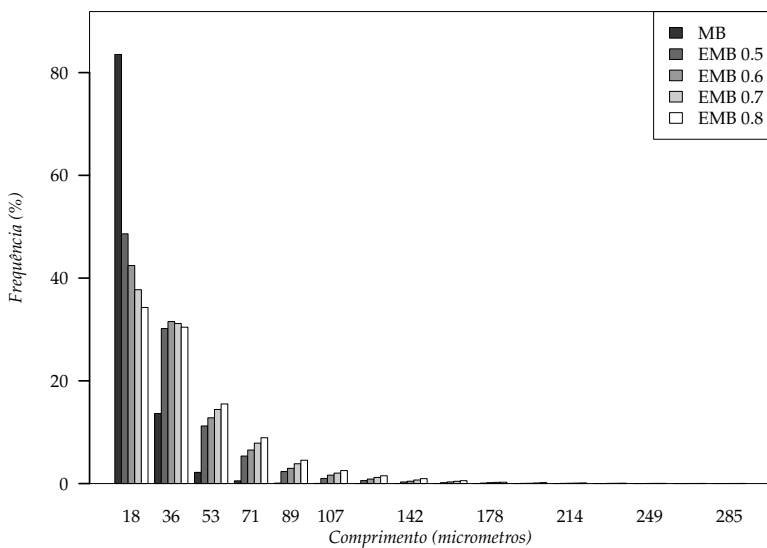


Figura 44: Distribuição de comprimentos das gargantas no volume C1. Fatores de expansão 50%, 60%, 70% e 80% para o EMB

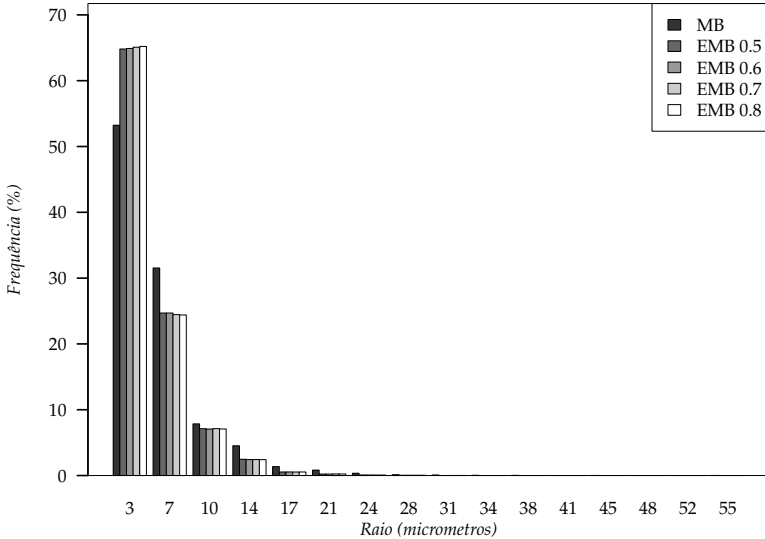


Figura 45: Distribuição de comprimentos das gargantas para ambos algoritmos. Fatores de expansão 50%, 60%, 70% e 80% para o EMB

tas são menos compridas e menos distribuídas, assim como os poros. Isso é, há uma alta concentração de gargantas com até 53 micrômetros no EMB e MB. No último, essa faixa representa praticamente a totalidade das gargantas, enquanto nas esferas exatas representam quase aproximadamente 90% das gargantas. Essa grande concentração dá-se pelo mesmo fato da alta concentração de poros de raios pequenos, ou seja, é característica de um volume heterogêneo irregular.

Na figura 45, estão os valores percentuais para as faixas de raios de garganta. Nesse caso, o MB e EMB geraram redes com raios similares o que implica que para volumes com muitos poros e gargantas pequenas, a definição da equação 3 resulte em pequenas diferenças com a equação , contudo tal constatação requer um maior estudo para mais dados amostrais. O comportamento da rede do EMB, para os vários fatores de expansão foi de pouca variação, conforme o visto no S1, sendo novamente adequado.

Para o volume C1, a razão média do comprimento das gargantas em função do raio é de 14.1, 15.34, 16.22 e 16.91 na rede EMB, para os fatores de expansão 50%, 60%, 70% e 80%, respectivamente, enquanto na gerada pelo MB a razão média é 18.88. A figura 46 demonstra as frequências para várias faixas de valores. Observa-se que o comportamento é similar ao obtido no S1, onde o EMB gera uma rede com essa razão menor em média.

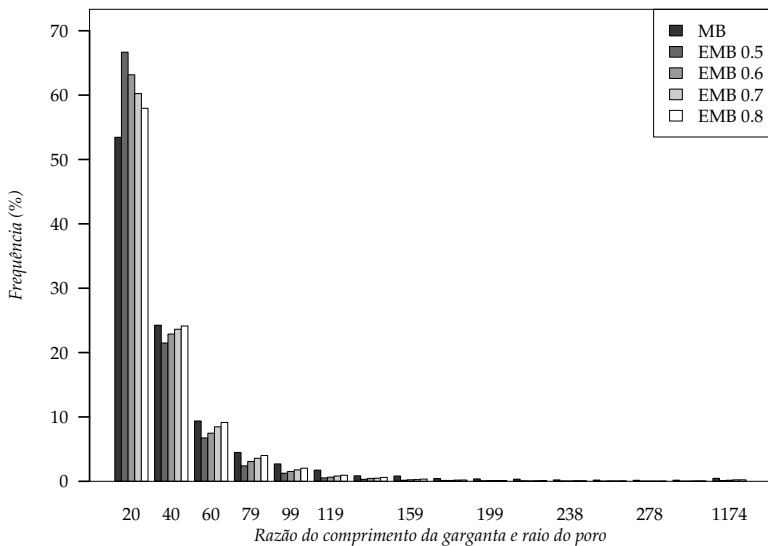


Figura 46: Razão do comprimento da garganta pelo raio da mesma no volume C1. A última faixa são os valores maiores que quatro vezes a média

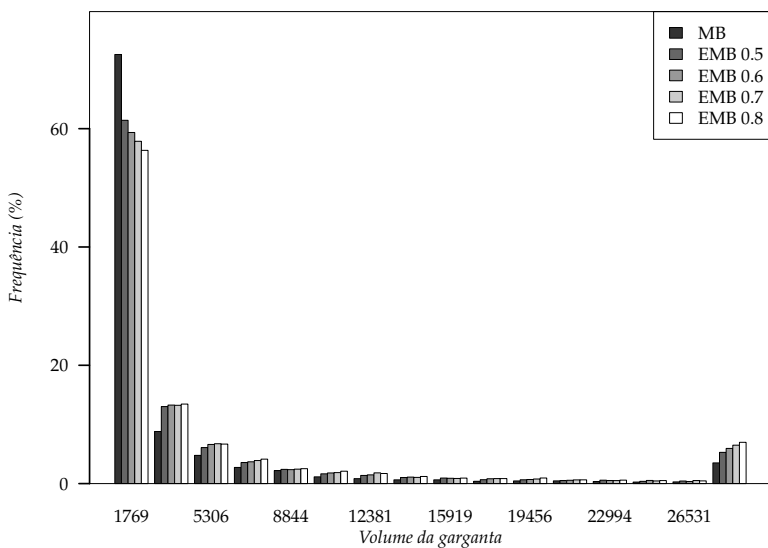


Figura 47: Frequência dos volumes das gargantas para o volume C1. A última faixa são os valores maiores que quatro vezes a média

Outro fator que influencia diretamente a análise da rede é a distribuição de volumes de gargantas. A figura 47 apresenta faixas de frequência para os volumes das gargantas das redes geradas pelo EMB e MB. A última faixa, como no S1, é definida em função da média, sendo visualmente maior, porém representando uma faixa bem maior de valores. Nota-se que as gargantas do C1 são, em média, menos volumosas que a do S1. Esse fato fica claro ao analisar-se os valores de faixa para ambos, onde os valores para o S1 estão quase que em outra escala de grandeza. Isso comprova que a partir desse volume mais gargantas menos volumosas.

5.3 DEMAIS ARENITOS

Pelo fato dos resultados de alguns arenitos serem visualmente repetitivos, ou seja, são similares e pela grande quantidade de volumes amostrais, parte dos resultados estão nos anexos desse trabalho. Na seção 7.2 encontram-se os resultados para os volumes S4, S7, S8 e S9. Apesar disso, os valores de permeabilidade e fator de formação, descritos na seção 5.5.4, são de todas as amostras analisadas também no capítulo 4.

Observa-se que assim como nas amostras S1 e C1, as redes EMB apresentam sempre um número de gargantas e poros maior que nas MB. Essa distinção nos resultados já fora observada no capítulo 4 e é devida a diferença na definição do raio e em ambos. Apesar disso, a porosidade calculada para ambas são sempre similares, nunca variando mais que 0.5% nas amostras estudadas.

Um fato que chama bastante atenção é o fato do MB nunca gerar fatores de forma circulares para os elementos da rede e, em sua maioria, os elementos gerados por ele serem triangulares. Os elementos quadrados são sempre insignificativos. Existe um motivo para tal, e ele será motivo de estudo na seção 5.5.1.

As tabelas 5, 6, 7 e 8 apresentam os valores obtidos para algumas propriedades básicas da rede, contrapostos com o resultado obtido com o MB para os mesmos volumes. A figura 48 demonstra o resultado visual da rede S2, que em contrapartida com a rede S3, da figura 49, apresenta poros maiores e menos numerosos. Isso pode ser observado nos números de ambas as redes, apesar de ambas possuírem porosidades não tão diferentes, isto é, 24.9% e 17.1%, a rede S2 tem 3523 poros e 7400 gargantas enquanto a S3 contém 13794 poros e 20903 gargantas. Essas diferenças morfológicas entre as duas rochas, refletem diretamente na permeabilidade absoluta e o fator de forma dessas redes, descritos na seção 5.5.4.

O volume S5, apresenta um número de poros bem menor que o S2,

	EMB	MB
Porosidade da rede	24.9	24.7
N de poros	3523.0	2021.0
N de gargantas	7400.0	4942.0
N de inlets	164.0	112.0
N de outlets	172.0	125.0
N de isolados	105.0	73.0
Elementos circulares	126.0	0.0
Elementos quadrados	147.0	19.0
Elementos triangulares	10652.0	6946.0

Tabela 5: Características da RP, no EMB e MB, para o volume S2

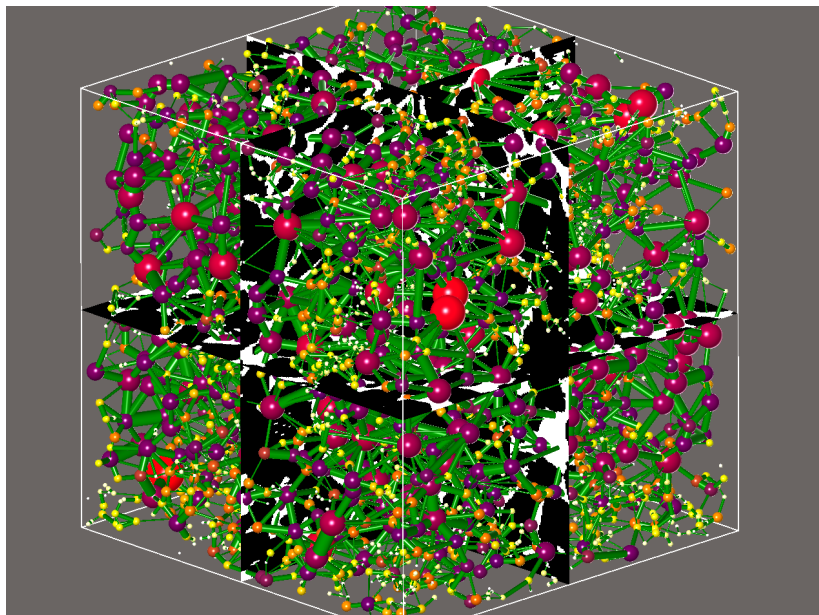


Figura 48: Rede gerada para o volume S2

	EMB	MB
Porosidade da rede	17.0	17.2
N de poros	13794.0	8926.0
N de gargantas	20903.0	15103.0
N de inlets	347.0	288.0
N de outlets	375.0	301.0
N de isolados	1075.0	656.0
Elementos circulares	216.0	0.0
Elementos quadrados	381.0	130.0
Elementos triangulares	34102.0	23901.0

Tabela 6: Características da RP, no EMB e MB, para o volume S3

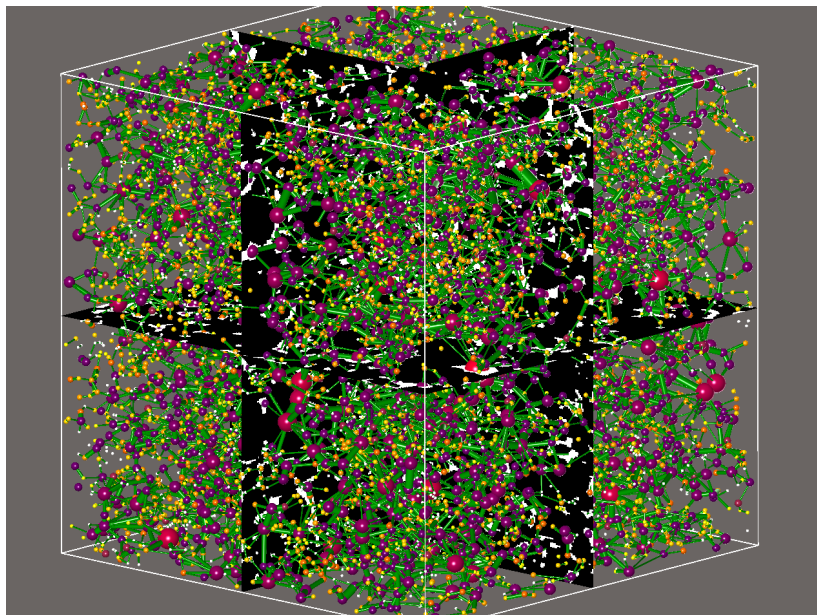


Figura 49: Rede gerada para o volume S3

	EMB	MB
Porosidade da rede	20.4	20.1
N de poros	970.0	518.0
N de gargantas	1719.0	900.0
N de inlets	59.0	40.0
N de outlets	57.0	39.0
N de isolados	83.0	66.0
Elementos circulares	40.0	0.0
Elementos quadrados	41.0	8.0
Elementos triangulares	2610.0	1412.0

Tabela 7: Características da RP, no EMB e MB, para o volume S5

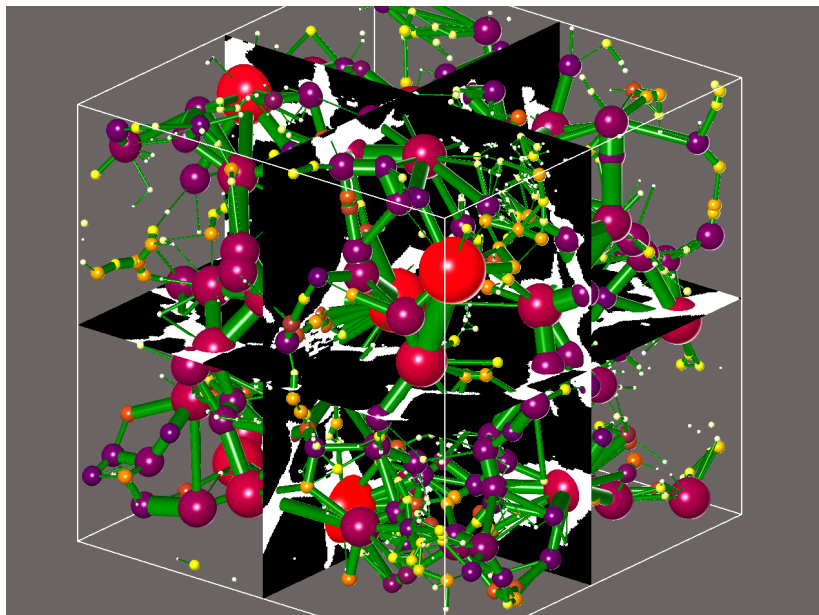


Figura 50: Rede gerada para o volume S5

	EMB	MB
Porosidade da rede	43.0	42.6
N de poros	6067.0	3393.0
N de gargantas	16983.0	11479.0
N de inlets	279.0	200.0
N de outlets	297.0	202.0
N de isolados	111.0	23.0
Elementos circulares	454.0	0.0
Elementos quadrados	399.0	47.0
Elementos triangulares	22199.0	14827.0

Tabela 8: Características da RP, no EMB e MB, para o volume A1

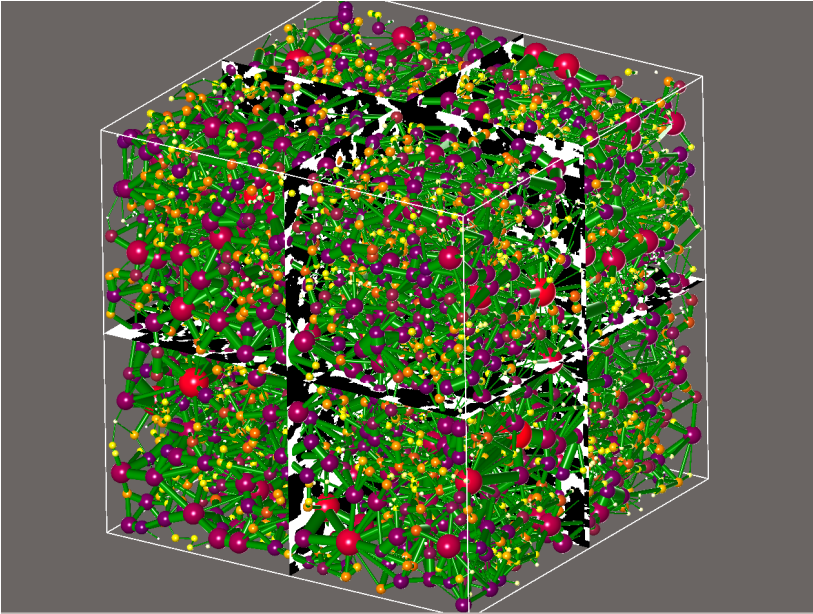


Figura 51: Rede gerada para o volume A1

970 poros e 1719 gargantas e uma porosidade de 20.4%. É um volume bem homogêneo e possui poucos poros pequenos conforme pode ser visualizado na figura 50. Os demais poros são maiores e bem conectados. Tal organização é bastante regular e esse volume deve possuir uma permeabilidade bastante diferente dos volumes apresentados também.

O volume A1 possui uma porosidade de 43.1%, 6067 poros e 16983 gargantas. Sua visualização é bastante densa com poucos poros pequenos. Isso deve-se ao fato de ser, dentre as amostras analisadas, a única de sílica sintética, e portanto, manufaturada. Tal origem, faz com que ela seja uma muito diferente das analisadas até então. Contudo, é interessante exatamente por apresentar uma forte contrapartida com os volumes vistos até então, sobretudo na porosidade elevada.

5.4 ROCHA C2

Como as rochas carbonáticas analisadas no capítulo 4 são apenas quatro, todos os resultados referentes a elas se encontram descritos nessa seção, com exceção da amostra C1, já descrita.

Na tabela 9 mantém-se as porosidades calculadas sobre a rede, de maneira similar para as RPs do MB e EMB e o número de poros e gargantas sempre maior no último, conforme já foi constatado na figura 26. Ou seja, as redes são, volumetricamente equivalentes para ambos, porém fundamentalmente diferentes. Dessa constatação, espera-se que as permeabilidades absolutas para ambas as redes sejam em mesma ordem de grandeza para um determinado fator de expansão. Os resultados finais são vistos na seção 5.5.4 e discutidos na seção 5.6.

O volume C2 difere bastante com relação ao do C1, tanto visualmente como em dados empíricos. Ele possui 13084 poros e 17710 gargantas e uma porosidade calculada de 16.1% para a RP do EMB. Apesar de apresentar uma certa similaridade como volume citado, o C2 é mais poluído e, analisando-se os poros e gargantas gerados, existem menos poros grandes no último que no primeiro. Também, as gargantas do C2 são em geral menores. Por fim, o tamanho amostral desses volumes é bastante diferente o que também influencia os resultados para as equações de transporte.

Em todas as amostras, nota-se que o número de elementos circulares é sempre zero no para redes do MB e o número de elementos quadrados é sempre insignificativo perante o número de elementos triangulares. Isso também é verdade para o EMB, porém, em geral, ele gera redes com mais elementos quadrados e um número sempre não nulo de elementos quadrados. O mesmo foi constatado nos volumes areníticos. Essa diferença com relação ao fator

	EMB	MB
Porosidade da rede	16.1	15.7
N de poros	13084.0	8508.0
N de gargantas	17710.0	10336.0
N de inlets	347.0	260.0
N de outlets	359.0	258.0
N de isolados	7728.0	5036.0
Elementos circulares	309.0	0.0
Elementos quadrados	349.0	130.0
Elementos triangulares	30138.0	18716.0

Tabela 9: Características da RP, no EMB e MB, para o volume C2

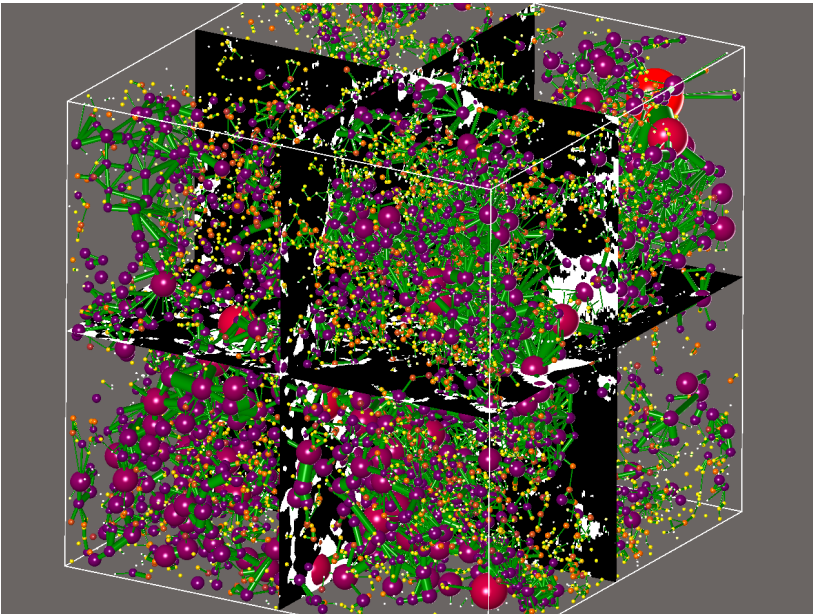


Figura 52: Rede gerada para o volume C2

de forma é proveniente de uma modificação feita sobre o MB, explanada na seção 5.5.1.

5.5 ESCOAMENTO MONOFÁSICO E PROPRIEDADES PETROFÍSICAS

A simulação do escoamento de fluido pela RP é importante por ser um mecanismo a mais para comprovação de padrões visuais e estocásticos observados na rede. Dentre as variáveis de previsão de transporte, tem-se aquelas obtidas para escoamento multifásico (*multiphase*), simulando-se óleo e água, ou ainda óleo, água e gás. Também, existe a previsão em uma única fase (*single phase*), também chamado de escoamento monofásico, capaz de extrair o comportamento de apenas um fluido atravessando a rede de poros, tipicamente a água.

Este trabalho, restringe-se a características para fases singulares, isso é, apenas leva-se em consideração um ambiente com uma única fase. Apesar disso, o simulador utilizado é capaz de extrair dados multifásicos.

Algumas suposições são feitas no ambiente monofásico de estudo: o fluido é newtoniano, incompressível, imiscível e homogêneo; o fluido molha completamente a fase porosa e, como não há interação com uma segunda substância, o invade os poros sem resistência alguma.

A viscosidade do fluido é 1 cP, a pressão de entrada nos inlets é a 1 Pa e a de saída é 0 Pa. Esses valores e todos os parâmetros utilizados encontram-se no apêndice, seção 7.4.

As variáveis petrofísicas que, neste trabalho, foram consideradas imprescindíveis foram o *fator de forma*, a *permeabilidade absoluta* e o *fator de formação*. A avaliação das três variáveis são vistas como suficientes para comprovar a possibilidade de extrair-se dados petrofísicos a partir da rede gerada pelo EMB, assim como compará-los com a mesma rede gerada pelo MB.

5.5.1 Fator de forma

O fator de forma, do inglês *shape factor*, é uma variável, segundo Mason e Morrow (1991), definida em função da área A do elemento e o perímetro P , isto é:

$$G_{2D} = \frac{A^2}{P} \quad (4)$$

O fator de forma é importante para a previsão das propriedades da

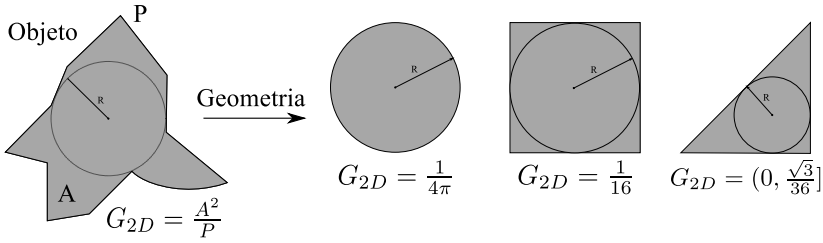


Figura 53: Determinação da geometria mais próxima a um determinado objeto a partir do fator de forma

transporte, principalmente em um ambiente multifase porque é a partir dessa variável que se determina qual geometria é mais apropriada para a representação de um determinado elemento e o quão irregular é esse elemento, e portanto mais propício a reter líquido devido a forças capilares, alterando a molhabilidade em uma interação multifásica (VALVATNE; BLUNT, 2004).

Um elemento irregular da rede, representado na forma de voxels pode possuir o mesmo fator de forma de uma geometria regular, conforme demonstrado na figura 53.

Os valores das geometrias regulares são, se relacionados a forma irregular obtida na representação voxelizada, apenas referências que demonstram de forma numérica a irregularidade do espaço poroso. Assim, um elemento que possua uma forma bastante regular será representado por um círculo ou um quadrado, enquanto um elemento bastante irregular será representado por um triângulo cujos cantos podem formar ângulos extremamente agudos, o que conforme já observado, essa característica modifica a passagem do fluido durante simulações multifásicas.

Uma vantagem de utilizar-se uma forma mais simples para calcular propriedades de transporte é que, além de ser possível calcular e definir a quantidade de fluido retido durante nos cantos do elemento durante a simulação, torna-se possível definir a pressão capilar de entrada como uma função direta do fator de forma do poro (MASON; MORROW, 1991).

A definição do fator de forma como G_{2D} não é válida em um ambiente volumétrico, sendo reescrita como:

$$G_{3D} = \frac{VL}{A^2} \quad (5)$$

Onde V é o volume da garganta ou poro e A a área. L é o raio para o poros um elemento esférico e o comprimento para a garganta, ou seja, para elementos esféricos e cilíndricos ele é diferente. As formas visualizadas na

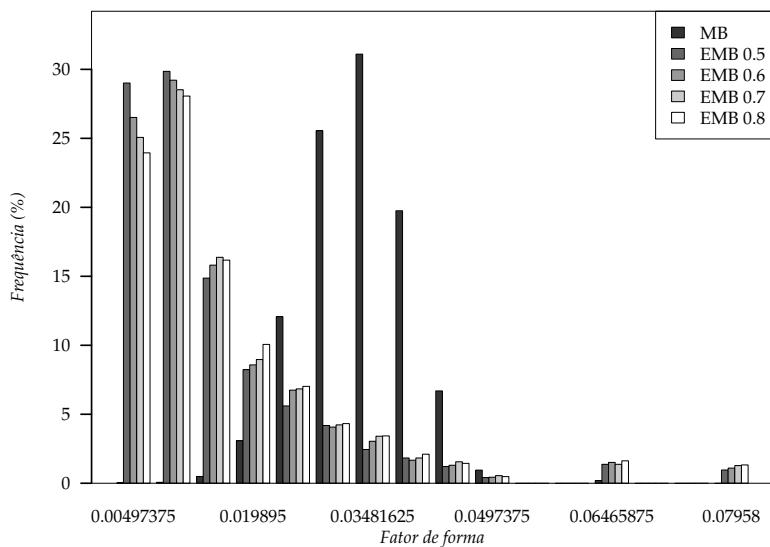


Figura 54: Frequência do fator de forma para o volume S1

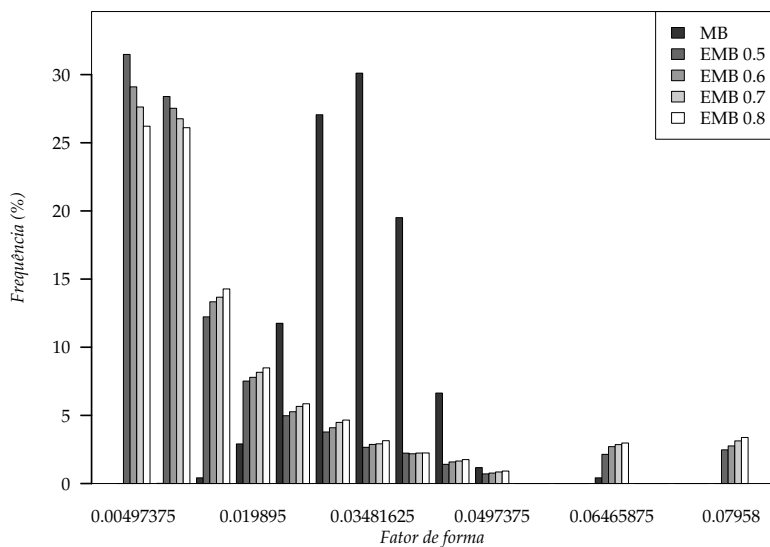


Figura 55: Frequência do fator de forma para o volume C1

figura 53 ainda são válidas numa simulação de escoamento fixa em um eixo.

Nas figuras 54 e 55, tem-se a distribuição dos fatores de forma para os volumes S1 e C1. Observa-se que com o aumento do fator de expansão das gargantas no EMB, os fatores de forma concentram-se mais em valores mais altos, enquanto para o MB são impossivelmente similares e tendem a seguir uma distribuição normal. A explicação para tal fato, pode ser encontrada no trabalho de Dong e Blunt (2007), onde a definição do fator de forma do elemento é dado pelo tamanho do raio, assim os valores são arbitrariamente distribuídos ao longo dos valores $R_{min} - 1$ a R_{max} , conforme definidos na seção 4.1.1, e o menor tamanho possível é 10% do tamanho real de um voxel no volume (resolução). O objetivo do autor foi parametrizar a curva de pressão capilar de modo a ela apresentar resultados mais similares ao PB. Tal diferença, devem fazer com que os resultados de permeabilidade absoluta e fator de formação sejam diferentes para o EMB e MB.

Confirma-se o que já era observado nas figuras 39, 36, 35 e 34 para o S1 e nas figuras 47, 44, 43 e 42 para o C1. Devido ao fato do volume e o raio dos poros serem pouco modificados pelo fator de expansão e o das gargantas ser, em contrapartida, modificados significativamente, há uma transferência de população dos fatores de forma menores para fatores de forma mais altos. Por meio da definição da equação 5, conclui-se que o número de elementos altamente irregulares diminui conforme o aumento do fator de expansão, assim há uma melhor definição dos elementos altamente irregulares da rede, isto é, as gargantas.

5.5.2 Permeabilidade absoluta

A permeabilidade é a vazão de um determinado fluido em um meio poroso e varia em função da variação da pressão de entrada. A permeabilidade absoluta K está relacionada com a capacidade do meio poroso de permitir o escoamento de um fluido por sua estrutura interna e é definida por:

$$K = \frac{\eta L Q}{A(p_{inlet} - p_{outlet})} \quad (6)$$

Essa definição é válida quando a rede encontra-se em saturada na monofase p de viscosidade corresponde a η . O fluxo monofásico total, denotado por Q , é dado pela diferença de potencial p entre inlets e outlets, dada individualmente por:

$$p = P - \rho_p g h$$

P é a pressão de entrada, ρ_p é a densidade da fase e g a constante de gravidade

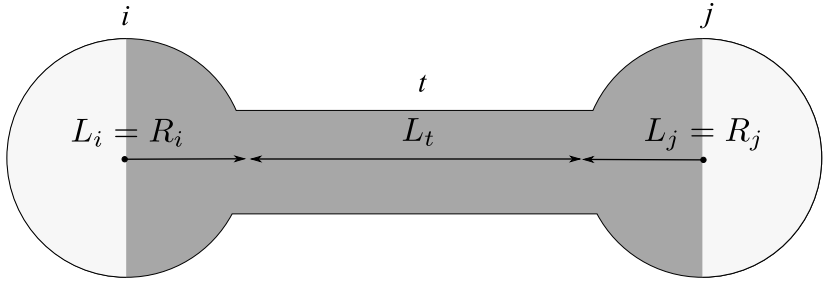


Figura 56: Configuração poro-garganta-poro onde a região cinza é a região de cálculo do fluxo $Q_{p,ij}$

e h é a altura do volume. Apesar de não ser objeto de estudo nesse trabalho, a permeabilidade relativa é dada por:

$$K_r = \frac{Q_{mp}}{Q}$$

Onde Q_{mp} é o fluxo da fase p no ambiente multifásico com a mesma pressão de entrada e saída. Q , O fluxo total do sistema é encontrada resolvendo-se a a pressão em todo poro i , impondo a conservação de massa em todos eles:

$$\sum_j Q_{ij} = 0 \quad (7)$$

A variável j percorre todas as gargantas ligadas ao poro i . O fluxo entre dois poros, i e j , é definido por:

$$Q_{ij} = \frac{g_{ij}}{L_{ij}}(p_i - p_j) \quad (8)$$

A diferença de potencial da fase é o $(p_i - p_j)$, enquanto a condutância é dada por g . A condutância entre dois poros i e j , ligados por uma garganta t , pode ser expressa como a média harmônica da condutância de cada elemento envolvido, isto é:

$$\frac{L_{ij}}{g_{ij}} = \frac{L_i}{g_i} + \frac{L_t}{g_t} + \frac{L_j}{g_j}$$

L_i e L_j são as distâncias do centro do poro a interface com a garganta em questão. L_t é o comprimento da garganta até a interface poro-garganta,

conforme visto na figura 56. Nessa figura, a região acinzentada é a interface poro-garganta-poro em si, sobre a qual o cálculo do fluxo é feito. A partir da fórmula de Hagen-Poiseuille, pode-se afirmar que a condutância g , no ambiente monofásico, é dada por:

$$g = \frac{kA^2G}{\mu_p}$$

ou

$$g = A^2S$$

O $\frac{kG}{\mu_p}$ ou S é o fator de forma (*shape factor*) influenciado pelo tipo de geometria utilizada. A constante k foi descoberta por testes de laboratório no trabalho de Patzek e Silin (2001). A constante vale 0.5 para estruturas circulares, 0.5623 para quadradas e 0.6 para equiláteras.

Pela equação 7, extrai-se um sistema linear de equações que pode ser resolvido por um *solver*. A partir das pressões extraídas pelo *solver*, substituindo-as na equação 8, tem-se o fluxo entre os conjuntos de poros conectados. A partir daí, obtém-se a solução do fluxo Q da fase p , e por sua substituição na fórmula geral, equação 6, acha-se o valor de permeabilidade absoluta para a RP em questão.

Dada uma rede de poros de entrada gerada pelo EMB ou MB é possível obter os valores de permeabilidade absoluta por meio do simulador *two phase*. Calcula-se a permeabilidade a partir do fluxo nas direções x , y e z e obtém-se de forma análoga K_x, K_y e K_z . A partir desses, tem-se a média aritmética:

$$K = \frac{K_x + K_y + K_z}{3} \quad (9)$$

Sendo K a permeabilidade absoluta, conforme descrita na equação 6, obtida pela execução em cada eixo do volume.

5.5.3 Fator de formação

O fator de formação é o resultado da analogia do fluido na RP com um circuito elétrico. Fatt (1956), definiu a permeabilidade absoluta em uma RP definida no espaço 2D por meio de um circuito elétrico análogo a uma rede analisada.

A lei de Poiseuille é análoga a lei de Ohm, generalizada por Kirchhoff como $J = \sigma E$, onde J é a densidade da corrente em um determinado local,

σ é condutividade do material e E o campo elétrico. Substituindo-se E pela diferença de pressão, σ pela condutividade hidráulica e J pelo fluxo tem-se a analogia entre as duas leis.

A partir da analogia, existe o fator de formação, obtido a partir da lei de Ohm. Ele caracteriza a expressão da permeabilidade absoluta sob a ótica da mesma. Portanto, define-se o fator como:

$$F = \frac{R_n}{R_w}$$

R_n é a resistividade da rede quando completamente saturada e R_w é a resistividade da água. A resistividade da rede é obtida a partir da lei de Ohm:

$$R_n = \frac{A\Delta E}{JL}$$

A é a secção transversal, ΔE é a diferença de tensão, J é o fluxo total e L o comprimento total da RP. A condutividade elétrica entre dois poros é definida pela área da secção transversal quando ocupada pela água. Assim:

$$\sigma = \frac{A_w}{R_w}$$

O valor do fator de formação para uma rede qualquer é, finalmente, dado por:

$$F = \frac{1}{\sigma} \quad (10)$$

É possível calcular esse valor em cada eixo, e a partir da média harmônica dos F_i , que podem ser obtidos de maneira homóloga a equação 10, ou seja $F_i = \frac{1}{\sigma_i}$ (VALVATNE; BLUNT, 2004). A média harmônica é o valor de F , isto é:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{3} \left(\frac{1}{F_x} + \frac{1}{F_y} + \frac{1}{F_z} \right) \quad (11)$$

O simulador *two phase* implementa a extração do fator de formação a partir de uma rede de entrada, além do cálculo da permeabilidade absoluta.

5.5.4 Resultados

Nessa seção são apresentados os resultados dos fatores de forma e permeabilidades absolutas pela utilização do simulador *two phase*, capaz de extrair informações monofásicas e multifásicas a partir de uma descrição de

rede. Para tanto, fez-se necessário a implementação de um exportador da rede para o formato textual exigido pelo simulador como entrada. Foi possível rodar o simulador para todos os casos, a partir do exportador implementado, contudo em um exemplo o simulador saiu com violação de memória após rodar a simulação.

Curiosamente, o exportador da rede gerada pela implementação de Dong e Blunt (2007) em muitos casos resultou em falhas no parsing do arquivo pelo simulador, mesmo para exemplos os quais haviam sido descritos na dissertação citada. Assume-se que esses erros devem-se ao fato dos códigos serem originalmente compilados em ambiente 32 bits e por possivelmente alguma alteração feita para que eles compilassem em um ambiente 64 bits tornou tais casos falhos. Essa última, é duvidosa pelo fato dos códigos terem sido compilados em 32 bits como forma de teste também e não terem obtido sucesso em todos os casos.

Para a maioria dos casos foi possível rodar o código para ambos, pelo menos no eixo das abcissas, conforme será discorrido mais adiante. Nos resultados que não puderam ser obtidos pelo esferas máximas, tem-se o valor zero na tabela 14, referente aos resultados do mesmo.

Nota-se na tabela 14 que os resultados para os eixos y e z diferem muito dos valores encontrados em x . O código original do MB gerava redes sempre no eixo x , impossibilitando a escolha de outro eixo sem a alteração do código. Sendo assim, modificou-se o software de modo a ser possível passar por linha de comando o eixo a ser calculado. Assim, esses resultados diferentes podem ser frutos da modificação feita e portanto, serão ignorados para fins de comparação, ou seja, somente o eixo x será considerado nas comparações EMB e MB na seção 5.6, pelo fato dos resultados obtidos serem duvidosos perante o esperado.

Os resultados obtidos para as redes geradas pelo EMB estão nas tabelas 10, 11, 12 e 13, enquanto o resultado original para a RP gerada pelo MB encontra-se na tabela 15. O resultado obtido na execução do código modificado encontra-se em 14. Nos três casos, as variáveis K e F são definidas de acordo com as equações 9 e 11, respectivamente. Ou seja, são resultados frutos de execuções singulares para cada um dos elementos pertencentes as tuplas (K_x, K_y, K_z) e (F_x, F_y, F_z) .

Da observação dos resultado tem-se que os dados empíricos diferem bastante para fatores de forma diversos e, de forma geral, de maneira linear, tanto para o fator de formação como para a permeabilidade absoluta. Essas tendências e suas implicações são o próximo estudo de caso.

	F_x	F_y	F_z	F	K_x	K_y	K_z	K
S1	12.51	7.72	6.92	8.47	2081.17	2318.79	3694.25	2698.07
S2	2.01	1.54	1.51	1.66	9954.72	10096.30	10274.60	10108.54
S3	30.05	4.68	6.61	7.53	167.92	1095.84	733.31	665.69
S4	41.23	5.78	9.47	9.90	131.23	721.37	511.27	454.62
S5	1.76	1.68	1.40	1.60	18542.70	18380.80	20128.40	19017.30
S6	1.53	1.41	1.74	1.55	38252.20	38257.40	29676.40	35395.33
S7	1.25	1.13	1.06	1.14	18592.80	18381.00	18702.50	18558.77
S8	0.75	0.71	0.68	0.71	45350.20	44135.10	44813.10	44766.13
S9	2.16	1.94	1.96	2.02	88669.80	89761.30	85824.20	88085.10
S10	2.75	2.31	2.32	2.44	3533.28	3590.51	3526.14	3549.98
S11	1.70	1.46	1.63	1.59	10504.30	10760.60	10411.60	10558.83
C1	4.90	2.37	3.55	3.30	3268.11	4108.49	3311.10	3562.57
C2	99.51	11.53	8.65	14.13	41.67	303.00	269.77	204.81
A1	0.67	0.50	0.53	0.56	18814.50	21782.50	21479.20	20692.07

Tabela 10: Tabela de valores dos fatores de formação e permeabilidades para o EMB. Fator de expansão 0.5

	F_x	F_y	F_z	F	K_x	K_y	K_z	K
S1	14.57	8.59	7.54	9.44	1741.27	1970.30	3421.12	2377.56
S2	2.36	1.75	1.74	1.91	8300.90	8485.78	8503.80	8430.16
S3	40.87	5.65	7.64	9.03	117.96	926.33	615.61	553.30
S4	52.89	6.71	11.01	11.59	100.68	616.94	431.73	383.12
S5	2.24	2.08	1.75	2.00	12965.40	13091.80	13322.90	13126.70
S6	1.99	1.78	2.01	1.92	28338.30	28650.10	24529.50	27172.63
S7	1.48	1.30	1.22	1.33	15000.20	14925.70	15078.90	15001.60
S8	0.86	0.81	0.77	0.81	38801.80	37637.10	38461.50	38300.13
S9	2.37	2.10	2.11	2.19	68894.40	70163.80	65725.50	68261.23
S10	3.24	2.66	2.67	2.83	3115.50	3157.01	3119.52	3130.68
S11	2.24	1.85	2.12	2.06	7659.00	8077.41	7610.67	7782.36
C1	6.20	3.49	4.30	4.41	2699.09	2832.20	2741.53	2757.61
C2	123.44	12.44	9.04	15.07	30.07	292.50	258.31	193.63
A1	0.77	0.60	0.62	0.66	16127.30	17253.10	17201.50	16860.63

Tabela 11: Tabela de valores dos fatores de formação e permeabilidades para o EMB. Fator de expansão 0.6

	F_x	F_y	F_z	F	K_x	K_y	K_z	K
S1	19.02	10.57	9.04	11.64	1252.98	1458.20	3078.16	1929.78
S2	2.72	1.94	1.96	2.16	7174.60	7372.87	7387.01	7311.49
S3	48.76	6.39	8.68	10.26	96.51	814.50	531.22	480.75
S4	64.18	7.01	12.06	12.44	80.50	585.27	386.13	350.63
S5	2.65	2.45	2.45	2.51	11479.90	11462.10	11462.10	11468.03
S6	2.11	1.88	2.08	2.02	27184.70	27511.60	23889.70	26195.33
S7	1.78	1.52	1.42	1.56	12845.90	12830.70	12950.40	12875.67
S8	1.00	0.92	0.87	0.93	32807.30	31839.80	32632.20	32426.43
S9	2.97	2.56	2.54	2.68	50846.60	51026.00	50420.70	50764.43
S10	3.70	2.95	2.98	3.18	2533.63	2581.51	2542.44	2552.53
S11	2.86	2.42	2.65	2.63	5937.19	5929.38	5888.77	5918.45
C1	6.46	3.64	4.47	4.59	2525.86	2643.77	2564.57	2578.07
C2	146.10	14.24	9.43	16.38	27.50	153.56	250.18	143.75
A1	0.91	0.70	0.71	0.76	13324.70	14082.70	14451.50	13952.97

Tabela 12: Tabela de valores dos fatores de formação e permeabilidades para o EMB. Fator de expansão 0.7

	F_x	F_y	F_z	F	K_x	K_y	K_z	K
S1	21.87	11.55	10.04	12.94	1093.41	1298.93	2943.11	1778.48
S2	3.12	2.16	2.19	2.42	6268.32	6490.20	6489.37	6415.96
S3	55.28	6.84	9.65	11.20	85.51	771.77	493.65	450.31
S4	73.42	7.53	13.58	13.64	69.44	538.03	335.45	314.31
S5	3.07	2.81	2.81	2.89	9773.88	9761.48	9761.48	9765.61
S6	2.35	2.07	2.29	2.23	23127.30	23416.00	20268.90	22270.73
S7	1.87	1.58	1.47	1.63	12504.30	12483.10	12642.50	12543.30
S8	1.12	1.02	0.96	1.03	28537.00	28126.50	28674.90	28446.13
S9	3.36	2.89	2.84	3.02	44853.00	45328.40	44902.00	45027.80
S10	4.44	3.41	3.48	3.72	2019.72	2060.75	2032.55	2037.67
S11	3.16	2.61	2.87	2.86	4981.95	4999.87	4970.75	4984.19
C1	7.31	3.87	4.83	4.98	2044.67	2209.00	2084.75	2112.81
C2	156.28	15.20	10.13	17.55	26.75	147.41	237.33	137.16
A1	1.02	0.76	0.80	0.85	11857.70	12730.10	12217.40	12268.40

Tabela 13: Tabela de valores dos fatores de formação e permeabilidades para o EMB. Fator de expansão 0.8

	F_x	F_y	F_z	F	K_x	K_y	K_z	K
S1	23.73	4.99	5.53	7.09	1939.57	13541.90	12232.10	9237.86
S2	5.89	1.47	1.99	2.22	4690.01	48397.10	13868.00	22318.37
S3	36.27	3.21	7.49	6.35	302.87	18252.30	4105.03	7553.40
S4	58.53	3.09	2.48	4.03	177.90	18985.30	37215.50	18792.90
S5	6.10	0.00	2.20	0.00	8530.12	0.00	83881.90	0.00
S6	5.27	1.15	1.28	1.63	19464.10	50834.70	43884.80	38061.20
S7	4.27	2.75	0.95	1.82	9142.70	75542.00	87776.80	57487.17
S8	2.84	3.54	1.58	2.36	16629.80	4772.53	514421.00	178607.78
S9	6.78	2.02	2.33	2.80	29063.60	15723.80	7251.52	17346.31
S10	11.01	1.38	1.57	2.07	1398.57	76756.00	85443.60	54532.72
S11	7.61	4.99	0.00	0.00	3242.83	13541.90	0.00	0.00
C1	17.73	1.47	5.53	3.27	1190.00	48397.10	12232.10	20606.40
C2	102.99	0.00	0.00	0.00	161.49	0.00	0.00	0.00
A1	2.17	3.21	0.00	0.00	8475.24	18252.30	0.00	0.00

Tabela 14: Tabela de valores dos fatores de formação e permeabilidades para o MB

	F_x	F_y	F_z	F	K_x	K_y	K_z	K
S1	36.30	37.90	53.50	41.30	1969.00	1752.00	1312.00	1678.00
S2	10.90	11.30	12.60	11.50	4318.00	3983.00	3394.00	3898.00
S3	52.20	41.90	70.30	52.40	143.00	420.00	109.00	224.00
S4	74.50	71.00	114.40	82.80	273.00	289.00	215.00	259.00
S5	14.10	14.60	15.90	14.80	4638.00	4874.00	4440.00	4651.00
S6	10.30	11.20	12.90	11.40	11289.00	10683.00	10951.00	10974.00
S7	9.60	9.30	11.20	9.90	7268.00	7594.00	6037.00	6966.00
S8	6.02	5.97	6.53	6.16	13063.00	13507.00	12936.00	13169.00
S9	16.40	19.90	18.10	18.00	2735.00	2093.00	1844.00	2224.00
C1	33.70	21.90	27.20	26.80	785.00	1469.00	1053.00	1102.00
C2	18.00	121.00	249.00	170.00	38.00	161.00	18.00	72.00
A1	4.47	4.57	5.73	4.86	8272.00	7977.00	5412.00	7220.00

Tabela 15: Tabela de valores dos fatores de formação e permeabilidades para o MB. Valores obtidos diretamente da tese de Dong e Blunt (2007)

	F_x 0.5	F_x 0.6	F_x 0.7	F_x 0.8	K_x 0.5	K_x 0.6	K_x 0.7	K_x 0.8
S1	0.527	0.614	0.801	0.921	1.073	0.898	0.646	0.564
S2	0.342	0.401	0.463	0.530	2.123	1.770	1.530	1.337
S3	0.829	1.127	1.345	1.524	0.554	0.389	0.319	0.282
S4	0.704	0.904	1.097	1.254	0.738	0.566	0.452	0.390
S5	0.289	0.367	0.435	0.504	2.174	1.520	1.346	1.146
S6	0.291	0.377	0.400	0.446	1.965	1.456	1.397	1.188
S7	0.292	0.347	0.417	0.438	2.034	1.641	1.405	1.368
S8	0.264	0.304	0.352	0.395	2.727	2.333	1.973	1.716
S9	0.319	0.350	0.437	0.496	3.051	2.370	1.749	1.543
S10	0.250	0.294	0.336	0.403	2.526	2.228	1.812	1.444
S11	0.223	0.295	0.376	0.415	3.239	2.362	1.831	1.536
C1	0.277	0.349	0.364	0.413	2.746	2.268	2.123	1.718
C2	0.966	1.199	1.419	1.517	0.258	0.186	0.170	0.166
A1	0.306	0.355	0.420	0.468	2.220	1.903	1.572	1.399
Média	0.420	0.520	0.619	0.695	1.959	1.564	1.309	1.128
Variância	0.058	0.101	0.148	0.180	0.896	0.593	0.416	0.293

Tabela 16: Tabela que apresenta a razão do resultado obtido pela simulação na rede EMB pela rede MB para diferentes fatores de expansão, no eixo x

5.6 CONCLUSÃO

Neste capítulo, foram estudadas diversas redes e a partir da observação de distribuições de raios, comprimentos, volumes e o número de coordenação constatou-se uma série de diferenças e semelhanças entre os comportamentos observados para as redes geradas pelo EMB e MB. Inicialmente, notou-se que nos casos de estudo S1 e C1, o EMB gera redes com poros mais bem conexos e gargantas e com uma população maior de ambos. Apesar disso, os volumes representativos das redes são bastante similares em todos os casos, com a rede EMB tendo uma variação de no máximo 0.5% para o cálculo da porosidade sobre ela.

Em ambas as redes EMB e MB observou-se que o comportamento da distribuição de comprimento de gargantas, a distribuição de tamanhos de poros e a razão do comprimento pelo raio dos poros conectantes. A variação do fator de expansão de gargantas implicou no crescimento do comprimento das gargantas e uma leve alteração na distribuição de tamanhos de poros e nos volumes dos mesmos. Concluiu-se que os elementos mais alterados pelo fator são as próprias gargantas e a contribuição dessa variável é vital para a definição delas.

Após a análise dos casos de estudo S1 e C1, fez-se uma breve demonstração dos resultados para os arenitos S2, S3, S5 e A1, reforçando as constatações já feitas. De maneira análoga tem-se a rochas carbonática C2,

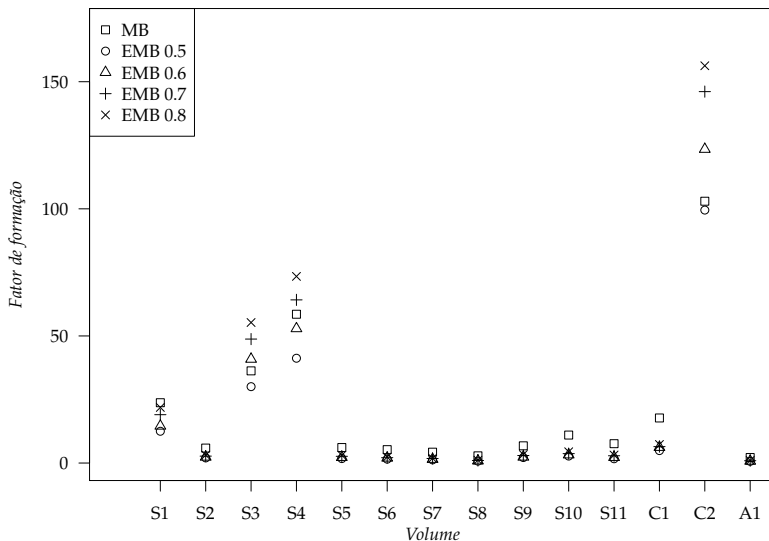


Figura 57: Fatores de forma F_x para as redes EMB e MB

para qual o resultado continuou a demonstrar tendências similares. Contudo, o número de elementos triangulares, circulares e quadrados nas RPs do EMB e MB, cuja definição é dado pelo fator de forma, foi bastante diferente. As figuras 54 e 55 demonstram os fatores de forma para as redes de esferas máximas e exatas e esferas máximas que são tão diferentes que parecem definir variáveis distintas. Isso deve-se a forma como na implementação do MB de Dong e Blunt (2007) os fatores de formas são exportados para o simulador *two phase*. Na tese, define-se que o fator de forma segue uma variação arbitrária entre os raios R_{min} e R_{max} a qual varia em função de uma distribuição normal, observada nas duas figuras.

A tabela 16, demonstra a razão dos valores obtidos no EMB, das tabelas 10, 11, 12 e 13, para os fatores de expansão referentes em relação ao MB, na tabela 14. Há uma aproximação de resultados do EMB e MB, para valores de expansão maiores, tanto para os fatores de forma como para as permeabilidades absoluta. Contudo, para o último caso, os resultados podem ser considerados mais interessantes, uma vez que tanto a média tende mais a 1 como a variância diminui. Já para o fator de forma, a variância tende a aumentar, para os casos de teste, indicando que os resultados apesar de mais próximos, tendem a variar mais. As figuras 58 e 57, demonstram graficamente os valores das tabelas 10, 11, 12, 13 e 14 para a execução no eixo das abcissas.

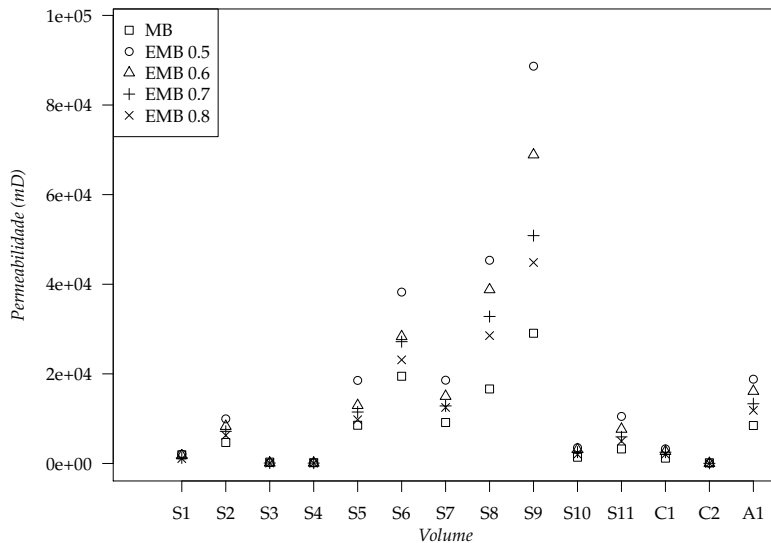


Figura 58: Permeabilidades K_x , em mD , para as redes EMB e MB

	F_x 0.5	F_x 0.6	F_x 0.7	F_x 0.8	K_x 0.5	K_x 0.6	K_x 0.7	K_x 0.8
S1	0.345	0.401	0.524	0.602	1.057	0.884	0.636	0.555
S2	0.185	0.217	0.250	0.286	2.305	1.922	1.662	1.452
S3	0.576	0.783	0.934	1.059	1.174	0.825	0.675	0.598
S4	0.553	0.710	0.862	0.986	0.481	0.369	0.295	0.254
S5	0.125	0.159	0.188	0.218	3.998	2.795	2.475	2.107
S6	0.149	0.193	0.204	0.228	3.388	2.510	2.408	2.049
S7	0.130	0.154	0.186	0.195	2.558	2.064	1.767	1.720
S8	0.125	0.143	0.166	0.186	3.472	2.970	2.511	2.185
S9	0.132	0.145	0.181	0.205	32.420	25.190	18.591	16.400
C1	0.146	0.184	0.192	0.217	4.163	3.438	3.218	2.605
C2	5.528	6.858	8.117	8.682	1.097	0.791	0.724	0.704
A1	0.149	0.172	0.204	0.228	2.274	1.950	1.611	1.433
Média	0.678	0.843	1.001	1.091	4.866	3.809	3.048	2.672
Variância	2.360	3.638	5.097	5.813	76.800	46.287	24.791	19.257

Tabela 17: Tabela que apresenta a razão do resultado obtido pela simulação na rede EMB em relação aos resultados do trabalho de Dong e Blunt (2007) para diferentes fatores de expansão, no eixo x

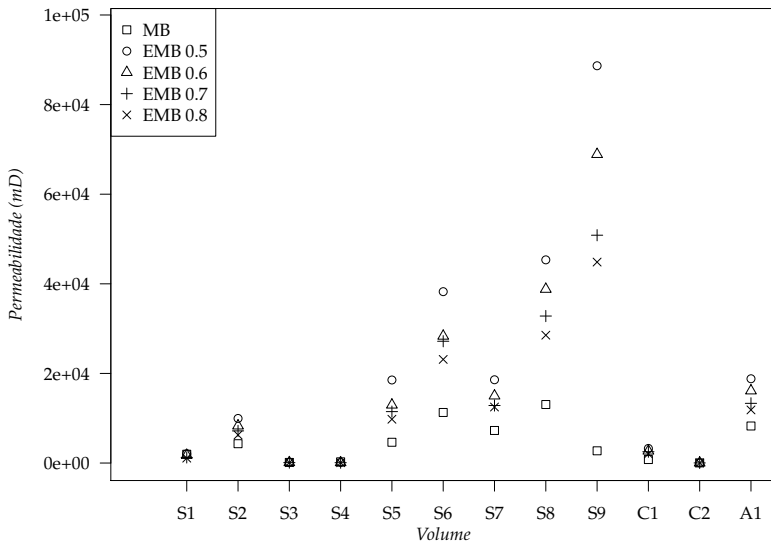


Figura 59: Permeabilidades K_x , em mD , para as redes EMB e o resultado original de Dong e Blunt (2007)

A tabela 17 demonstra a razão dos valores obtidos no EMB, das tabelas 10, 11, 12 e 13, em relação aos valores demonstrados na tese de Dong e Blunt (2007), cujos valores estão na tabela 15. Assim como no código rodado, há uma tendência a aproximação dos resultados obtidos no MB e EMB para o aumento do fator de expansão. Os melhores casos nesse sentido são os volumes S3 e S4 que são casos onde a população de poros e gargantas é bastante alta a distribuição de comprimentos e raios tende a valores baixos. É possível que isso deva-se ao fato do MB encontrar raios maiores, diminuindo a correlação entre ambos. Entretanto, tal conjectura requer um estudo mais profundo das variáveis envolvidas no fator de forma, sobretudo das etapas intermediárias de cálculo, destacadas na seção 5.5.1.

Os valores de permeabilidade absoluta estão em acordo com o já observado nas tabelas da execução do MB. Há uma proximidade, em média, dos valores, e uma diminuição da variância com o crescimento do fator de expansão. Ainda assim, os valores do MB rodado são mais próximos dos extraídos do EMB. Conforme já observado no início desse capítulo, o simulador *two phase*, apesar de fornecer informações detalhadas da rede de entrada, resulta em valores distintos para execução em diferentes plataformas e para diferentes compiladores. Tal fato pode ser fruto do fato da biblioteca básica de matemática ser implementada de diferentes maneiras em cada ambiente. Ou seja,

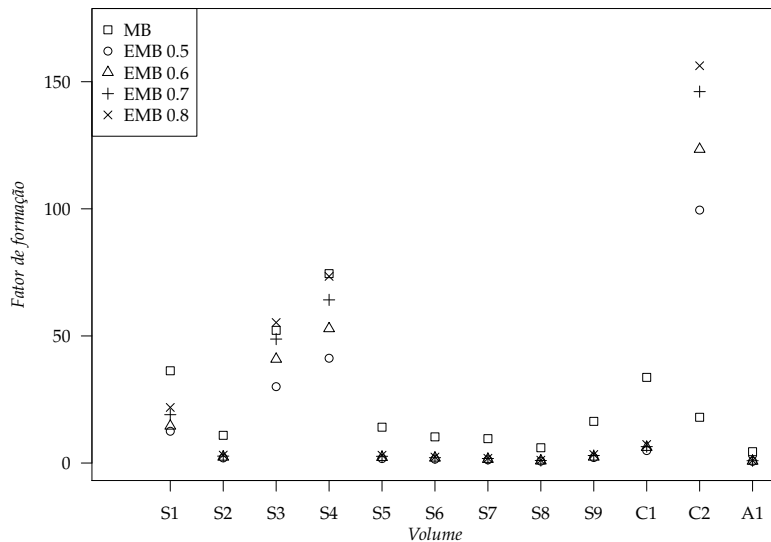


Figura 60: Fatores de forma F_x para as redes EMB e o resultado original de Dong e Blunt (2007)

não há como reproduzir o ambiente de execução utilizado em Dong e Blunt (2007) sem utilizar-se a mesma versão de compilador, sistema operacional e na mesma máquina, e principalmente os parâmetros originais utilizados em cada execução.

As tabelas de resultados para os eixos y e z estão nos anexos, seção 7.3. Os resultados visuais e características básicas das RPs dos arenitos S4, S6, S7, S8 e S9 estão na seção 7.2, também nos anexos.

6 CONCLUSÃO

Neste capítulo encontram-se as reflexões finais a respeito desse trabalho, fruto das conclusões locais de cada capítulo, nas seções 3.6, 4.6 e 5.6. As conclusões sobre essa trabalho são feitas em três partes, as reflexões conclusivas, os trabalhos futuros e os reconhecimentos e agradecimentos àqueles que contribuíram com esse trabalho.

6.1 REFLEXÕES CONCLUSIVAS

No capítulo 3, foi feita uma visão geral de como são adquiridos os dados brutos e as imagens microtomográficas de rochas. Observou-se como a partir da análise das imagens microtomográficas, é possível aprimorar os resultados na etapa de binarização de imagem. Os algoritmos de binarização são vários e mesmo os automatizados diferem em muitos pontos, porém, mesmo um método da bisettriz, visto no algoritmo 1, é suficiente para o auxílio ao especialista. Ainda assim, ele pode modificar esse valor manualmente conforme necessário.

Definiu-se uma técnica baseada em compressão RLE para diminuir o tamanho do volume em memória, definindo segmentos de valores *pretos ou brancos*. Ainda assim, foi possível obter desempenhos de ordem linear utilizando-se a ideia da seção 4.5. A iteração por segmento ao invés de valor de pixel não só permite a otimização de memória mas também a de processamento, principalmente efetiva em volumes grandes. Conforme demonstrado na seção citada, a mesma ideia é aplicável a várias estruturas de dados que utilizem necessite armazenar valores relacionados ao meio poroso, sendo assim uma técnica de compressão extremamente interessante com relação aos meios porosos.

Tem-se assim uma técnica simples, a nível de implementação e compreensão, com alta taxa de compressão, onde os pode-se dividir os valores em segmentos de valores homogêneos. A taxa de compressão é menor que a própria porosidade do volume, variando de 5% a 20% para os volumes de entrada para os volumes de entrada.

No capítulo 4, foram descritas as *esferas máximas (MB)*, *esferas máximas exatas (EMB)*, *extração rápida de rede (FNE)* e o *método baseado em processos (PB)* e os resultados comparativos entre o EMB e o MB, para as diversas etapas observadas na figura 7. O algoritmo MB original não possuía nenhum tipo de paralelização em suas etapas. A paralelização das etapas seriais do algoritmo resultaram em ganhos de performance notáveis. Também,

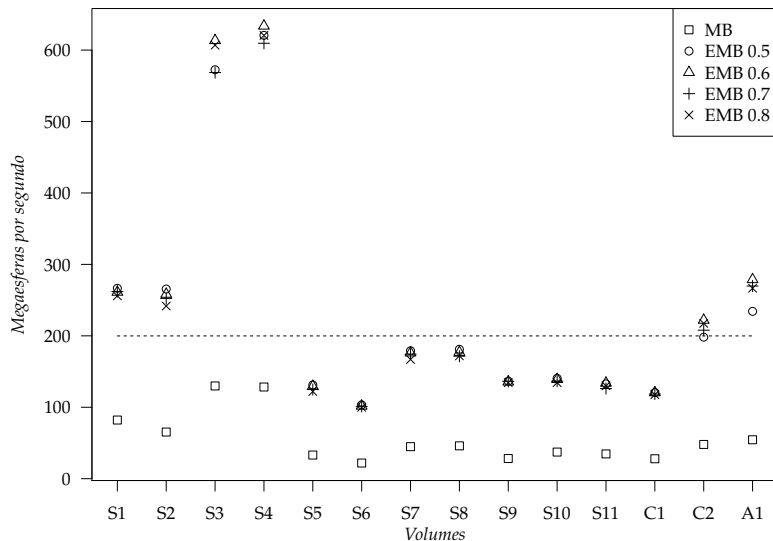


Figura 61: Valores em milhares de esferas processadas por segundo, durante a execução do EMB e MB no eixo x . A linha pontilhada é a média global

a utilização do mapa de distâncias exatas em substituição ao inflar de esferas do MB diminuiu drasticamente o tempo de busca das esferas (figura 20), responsável por quase 50% do tempo total em alguns volumes no algoritmo original.

A figura 61 mostra os valores em mega esferas (mil esferas) por segundo de execução para os volumes amostrais utilizados. O número de esferas contadas são o total de esferas encontradas e não o total remanescente após a remoção. Isso foi feito de modo a haver um piso equalitário comparativo entre as duas técnicas. De outra forma, o desempenho do EMB seria ainda mais destacado pelo fato dele remover menos esferas. No geral, os valores flutuam de 50 a 300 mega esferas por segundo para o EMB, com exceção dos volumes S3 e S4. Já no MB, ficam sempre abaixo dos valores do EMB, variando de aproximadamente 25 a 115 mega esferas processadas por segundo.

O conjunto de otimização de etapas individuais e paralelização dessas, fez com que, para todos os volumes de entrada, o tempo total de execução fosse inferior no EMB, mesmo com um volume maior de esferas sendo processadas. As etapas de remoção de esferas auto-inclusas e aglomeração apresentaram resultados menos promissores, porém ainda sim positivos e menores que os tempos apresentados pela implementação original. Portanto, um dos

objetivos principais desse trabalho foi alcançado, isto é, obter um tempo de execução total menor que o algoritmo MB original, mesmo com um volume maior de dados sendo processados.

A partir dos resultados obtidos pela extração de redes de poros, fez-se um exportador para o formato aceito como entrada pelo simulador *two phase*, utilizado também por Dong e Blunt (2007) e, portanto propício a uma comparação direta com esse. Fez-se uma descrição extensiva das amostras S1 e C1, avaliando fatores como distribuição de raios e volumes de poros e comprimentos, raios e volumes de gargantas. Também, observou-se o número de coordenação em ambas as amostras e os valores visuais e empíricos obtidos diretamente da rede. Foi verificado que o fator de expansão de gargantas é vital para definição das distribuições de gargantas, principalmente no que diz respeito aos comprimentos e volumes, enquanto os poros são pouco modificados pelo aumento do fator.

Os fatores de forma observados para as redes EMB e MB são bastante diferentes, porém esse fato foi explanado na seção 5.5.1. O exportador de redes do MB converte os fatores de forma para uma distribuição normal para obter um comportamento mais próximo do método baseado em processos (DONG; BLUNT, 2007). Tal distinção foi explorado na seção 5.5.1.

Não foi possível rodar todas as redes exportadas pela implementação do MB, feita pelo mesmo, contudo obteve-se êxito no eixo x . Assim, foram feitas comparações de permeabilidade e fator de forma somente para esse eixo. Observou-se que, principalmente para a permeabilidade, os resultados finais foram de mesma escala de grandeza, uma das metas desse trabalho. Além disso, os resultados foram próximos, em valores absolutos com o EMB gerando, em geral, valores maiores para permeabilidade absoluta e menores para fator de forma. Isso é condizente com a definição de ambos, uma vez que são variáveis inversamente proporcionais.

Um dos objetivos que não foi alcançado foi o de comparar os resultados obtidos com o LBM ou dados obtidos por meio de métodos destrutivos. Tais testes necessitam de aparelhagem e softwares não estavam disponíveis durante a execução deste trabalho. Assim, a comparação com dados terceiros é vista como um trabalho futuro, principalmente como validação da técnica utilizada, isto é, uma comparação com um padrão ouro.

Apesar de vários resultados positivos, há uma série de trabalhos futuros e trabalhos incompletos que devem ser revistos em possíveis retomadas do tema. A seção 6.2 trata exclusivamente de ideias não contempladas neste trabalho.

6.2 TRABALHOS FUTUROS

Nessa seção são exploradas três quatro vertentes diferentes a serem trabalhadas. São elas: otimizações em cpu e gpu, validação com outras técnicas, o estudo de variáveis de entrada e saída e o tratamento de dados multiescalares e volumes grandes.

6.2.1 Otimizações em cpu e gpu

Em termos de desempenho, o EMB foi melhor que o MB em todos os casos de entrada, entretanto mesmo para volumes pequenos, com 300 voxels de lado, o algoritmo pode levar algumas dezenas de segundos.

Um questionamento a ser feito é se há a possibilidade de obter um desempenho garantido, em tempo hábil, para uma determinada faixa de volume. Um exemplo: 500 voxels de lado e 5s de tempo máximo de execução. Acredita-se que a resposta seja afirmativa, pela observação de algumas características e algoritmos existentes na literatura e pela possibilidade de modificar-se os algoritmos existentes de modo a torná-los mais eficientes e paralelizáveis. Ainda assim, tais requisitos de desempenho são extremistas e requerem profundo estudo e mudanças em várias etapas e, no caso de gpus, um hardware robusto e que obedeça o padrão Khronos OpenCL™ ou NVIDIA CUDA™.

Existem cinco pontos principais exploráveis. Cada um deles será observado de maneira individual.

AGLOMERAÇÃO

A aglomeração é a etapa que consome mais tempo de processamento do algoritmo de *esferas máximas*, ainda mais na versão *exata*. Neste último, foi feita a paralelização da busca e intersecção de esferas de mesmo raio, e obteve-se uma melhora significativa de desempenho. Contudo, o esquema utilizado na paralelização possui uma etapa serial relativamente grande que é a expansão da garganta encontrada e processamento das esferas vizinhas.

Existem duas vertentes possíveis de solução do problema relatado. A primeira é propor um esquema produtor e consumidor, onde cada esfera processada em paralelo pelo produtor avisando o consumidor da necessidade de processamento da esfera. O consumidor então processa a esfera e aguarda outra. A segunda solução é propor um algoritmo de aglomeração novo, contemplando a paralelização.

No esquema produtor e consumidor, a dificuldade de implementação é pequena e os resultados são, em tese, promissores. No caso de propor um novo algoritmo para a aglomeração, tem-se a necessidade da validação do novo esquema segundo o padrão ouro, do algoritmo original. Também, algumas etapas do algoritmo são claramente seriais e a paralelização total necessitaria em alguns casos de um mecanismo de *rollback*. Isto é, seria necessário checar possíveis colisões de dependência entre esferas de mesmo raio intersectantes para não haver uma *violação* das etapas definidas e consequentemente um resultado *incorreto*.

Em suma, seria lógico a implementação do esquema produtor e consumidor e, caso não fosse suficiente para obter o desempenho esperado, a modificação do algoritmo de modo a fazê-lo perder grandes partes seriais.

Uma possível implementação em gpu da aglomeração requereria uma modificação total do algoritmo, até porque a expansão de gargantas não poderia ser feita da forma atual, isto é, sequencialmente. Uma alternativa menos radical é modificar somente a busca de esferas vizinhas, aliada ao esquema de produtor e consumidor em cpu. Em tese, essa forma traria os melhores resultados. Entretanto, tais conjecturas necessitam de reflexão e testes pontuais para serem feitas. Assim, são consideradas um trabalho futuro.

BUSCA DE ESFERAS VIZINHAS

A intersecção de esferas é feita da maneira exata e ótima, contudo há a possibilidade de aumentar-se a paralelização dos algoritmos que a utilizam. Isto é, otimizar a busca de esferas intersectáveis e não a intersecção em si. A busca de esferas colidíveis é utilizada na remoção de esferas auto-inclusas e na aglomeração de maneira extensiva. A otimização dos passos em cpu, por meio da paralelização dos algoritmos e da transformação da busca em uma operação linear, conforme demonstrado na seção 4.5, obteve ganhos de desempenho observado em ambas. Isto é, as etapas únicas de cada algoritmo não foram paralelizadas, mas somente a busca de esferas intersectáveis.

Apesar de otimizar a utilização de processamento, as otimizações citadas necessitam guardar o resultado intermediário para cada esfera de mesmo raio, ou seja, utilizam mais memória, mesmo que de maneira temporária. Assim, acredita-se que a utilização de algum esquema de intersecção em massa entre esferas seja capaz de obter resultados interessantes, se implementado em gpu, porém a utilização de memória pode ser proibitiva, sobretudo em volumes grandes.

ESTRUTURAS COMPRIMIDAS EM GPU

A representação de estruturas comprimidas em gpu, assim como foram concebidas em cpu, possibilita a implementação dos diversos algoritmos observados no capítulo 4 de maneira a utilizar menos memória. Tais otimizações de memórias são imprescindíveis, até porque a memória disponível em gpu é, em geral, menor que a memória principal, disponível para CPU. Isto deve-se ao fato da arquitetura única da gpu, denominada *single instruction multiple thread* (SIMT).

Implementando-se as estruturas comprimidas em gpu, tem-se a possibilidade de aplicar as ideias referentes a intersecção de esferas e busca de esferas nessa arquitetura. O principal desafio seria adaptar os algoritmos referentes para utilizar a memória local, um tipo de memória pequena e rápida, com garantia de acesso em tempo de registrador para um acesso coalescente à memória.

BUSCA DE ESFERAS EM GPU

A busca de esferas de maneira exata, em gpu, é possível. O algoritmo de *parallel banding* é capaz de extrair um mapa de distâncias exatas a partir de imagens binarizadas. Tal algoritmo, assim como de Saito e Toriwaki (1994), possui três passos distintos de transformação: 1D, 2D e 3D.

A ideia é dividir o volume em faixas (*bands*) distintas e resolver o problema localmente. Após solver o problema local, tem-se um passo de redução global, unindo resultados vizinhos. Em sequência, tem-se a nova aplicação do passo de solucionar as distâncias e a transformada é completa.

No eixo 1D, os três passos descritos são aplicados de maneira sem alteração. Na 2D, tem-se a necessidade de uma ordenação de faixas a serem visitadas. Colocando-as em uma pilha de visitação. A parte serial é pequena em relação a paralela e os desempenhos finais obtidos com tal técnica é melhor mesmo que em técnicas similares que calculam somente a distância aproximada. No eixo 3D a ideia é homóloga ao 2D.

A otimização da etapa de busca pode parecer desnecessária pelo fato dessa etapa ser a menos custosa entre todas as 4. Contudo, a otimização das outras fases pode vir a destacar essa como gargalo e solucionar esse problema em gpu pode ser útil em implementações diversas, uma vez que o mapa de distâncias exatas possui muitas outras aplicações.

UTILIZAÇÃO DE PONTO FIXO AO INVÉS DE PONTO FLUTUANTE

O ponto flutuante provê uma maneira de representar números decimais num computador. Uma outra maneira de representar-se números desse tipo é o ponto fixo. A vantagem dessa notação sobre o ponto flutuante é a de utilizar somente de operações inteiras para fazer operações sobre a representação. Assim, em cpu, haveriam ganhos grandes. Em contrapartida, a operação de extração da raiz quadrada, tipicamente utilizada nas fórmulas de intersecção e obtenção do raio das esferas seria aproximada.

O resultado final tenderia a ser mais preciso que o MB, mas menos preciso que o EMB. Uma avaliação do resultado final seria necessária, mas acredita-se que o ganho de eficiência seria interessante o suficiente para justificar o *tradeoff*.

6.2.2 Validação com outras técnicas e estudo de variáveis de entrada e saída

A validação com outras técnicas será vital afim de comprovar a eficácia e capacidade de representação da rede para as características geométricas, topológicas e petrofísicas da rede, sobretudo nas previsões de escoamento e simulações multifásicas. Nos trabalhos de Al-Kharusi e Blunt (2007) e Dong e Blunt (2007) definiu-se uma comparação com o método PB, com LBM e com dados obtidos por análise em laboratório como a *porosimetria por injeção de mercúrio* descrita no capítulo 3.

Neste trabalho, não foi possível fazer paralelos com outras técnicas por motivos diversos. Entre eles, indisponibilidade de equipamento e impossibilidade de aquisição de licenças dos softwares capazes de extrair tais dados. Se solucionado os problemas descritos, existe a possibilidade de uma validação baseada em dados obtidos por outras técnicas.

A partir dos dados validados, torna-se possível definir quais valores utilizar em variáveis parametrizáveis do algoritmo, isto é o fator de expansão das gargantas e o tamanho mínimo em voxels para uma esfera ser classificada como poro.

Acredita-se que tais variáveis não tenham um valor ótimo para todos os volumes, porém que em determinados tipos de rocha, *valores ótimos* obtidos, por meio da análise da variação dos parâmetros, existam. Uma outra possibilidade, seria propor variáveis adaptativas em ambos os casos, ou seja, fatores de expansão adaptativos, dependentes dos tamanhos dos poros conectantes e da garganta em questão. Também, os tamanhos mínimos de poro poderiam ser dependentes do tamanho do volume.

6.2.3 Tratamento de dados multiescalares e volumes grandes

Dois pontos que não foram abordados durante o trabalho mas foram citados direta ou indiretamente são a representação de volumes grandes e o tratamento de dados multiescalares. Durante o capítulo 3, descreveu-se uma técnica para compressão eficiente de volumes binarizados. Ainda assim, a representação de volumes gigantesco com mais de 8000 voxels de lado é um desafio na atualidade. Principalmente, se aliado ao tamanho do volume tem-se diferentes amostras com resoluções distintas representando os mesmos dados.

O tratamento de dados multiescalares, mesmo sua visualização é um desafio. Em Guthe et al. (2002), utilizou-se a compressão por *wavelets* para a visualização de dados em várias qualidades distintas. O objetivo do trabalho era ser capaz de visualizar grandes volumes de dados em workstations padrões da época. Ao considerar-se o panorama de visualização de múltiplos volumes, o uso da gpu é imprescindível (BEYER, 2009; KAINZ et al., 2009).

A caracterização de volumes multiescalares também constitui um desafio recorrente e tem sido abordado com maior frequência em tempos recentes (NORDBOTTEN, 2009; BISWAL et al., 2011). Ela é útil na caracterização de volumes heterogêneos pela representação macroscópicas e microscópica das características da rocha. Pode-se considerar a caracterização multiescalar como um problema aberto, cuja solução, mesmo para casos singulares, requer um estudo profundo.

6.3 RECONHECIMENTOS E AGRADECIMENTOS

Esse trabalho foi fruto de uma operação conjunta entre a Petrobras, o O Laboratório de Meios Porosos e Propriedades Termofísicas (LMPT) e o Laboratório de Processamento de Imagens e Computação gráfica (LAPIX), ambos da Universidade Federal de Santa Catarina. Conforme descrito no capítulo 3, quatro das amostras (C3, C4, S10 e S11) foram disponibilizadas pelo LMPT e pela Petrobras. Alguns dos resultados desse trabalho intersectam diretamente com o trabalho de Cunha (2012) e a leitura desse, além de ser complementar a esse trabalho, é indispensável para compreensão completa da área da caracterização de meios porosos.

Agradeço também aos colegas Felipe Borges Alves, Jeferson Vieira Ramos e Renan Teston Inácio. Todos parceiros de projeto e de laboratório há anos. Em especial ao Renan, pela descoberta das aproximações feitas por Hu Dong em seu trabalho e pela ideia de fazer uma compressão por segmentos, a qual foi definida e implementada nesse trabalho. Os trabalhos de Ramos

(2012) e Inácio (2012) também complementam os resultados obtidos nesse. O primero propõe a validação do EMB, enquanto o segundo trata da renderização de múltiplas esferas.

Agradeço ao Martin Prüsse pela ideia de utilizar o ponto fixo no lugar de ponto flutuante que pode trazer novos resultados para a extração de redes de poros. Por fim, agradeço o colega Adiel Mittmann, cuja introdução à linguagem R incentivou-me a usá-la.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AL-KHARUSI, A. S.; BLUNT, M. J. *Pore Scale Characterization of Carbonate Rocks*. Tese (Doutorado), 2007.

BAKKE, S.; OREN, P.-E. 3-d pore-scale modelling of sandstones and flow simulations in the pore networks. *SPE Journal*, Society of Petroleum Engineers, v. 2, n. 2, p. 136–149, Jun 1997. Disponível em: <<http://www.onepetro.org/mslib/servlet/onepetroreview?id=00035479&soc=SPE>>.

BERNASCHI, M. et al. A flexible high-performance lattice boltzmann GPU code for the simulations of fluid flows in complex geometries. *Concurrency Computat.: Pract. Exper.*, John Wiley & Sons, Ltd., Istituto Applicazioni Calcolo, CNR, Viale Manzoni, 30-00185 Rome, Italy; Nvidia Corporation, 2701 San Tomas Expressway, Santa Clara, CA 95050, U.S.A.; SOFT, Istituto Nazionale Fisica della Materia, CNR, P.le A. Moro, 2-00185 Rome, Italy; Department of Physics and School of Engineering and Applied Sciences, Harvard University, Cambridge, MA 02138, U.S.A.; Initiative in Innovative Computing, Harvard University, Cambridge, MA 02138, U.S.A., v. 22, n. 1, p. 1–14, 2010. ISSN 1532-0634. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1002/cpe.1466>>.

BEYER, J. *GPU-based Multi-Volume Rendering of Complex Data in Neuroscience and Neurosurgery*. Tese (Doutorado) — Institute of Computer Graphics and Algorithms, Vienna University of Technology, Favoritenstrasse 9-11/186, A-1040 Vienna, Austria, out. 2009. Disponível em: <<http://www.cg.tuwien.ac.at/research/publications/2009/beyer-2009-gpu/>>.

BISWAL, B. et al. Modeling of multiscale porous media. *Image Analysis & Stereology*, v. 28, n. 1, 2011. ISSN 1854-5165. Disponível em: <<http://www.ias-iss.org/ojs/IAS/article/view/846>>.

CHATZIS, I.; DULLIEN, F. A. L. Modelling pore structure by 2-d and 3-d networks with application to sandstones. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, n. 1, Jan 1977.

CHEN, S.; DOOLEN, G. D. Lattice boltzmann method for fluid flows. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, v. 30, n. 1, p. 329–364, 1998. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1146/annurev.fluid.30.1.329>>.

CORWIN, E.; LOGAR, A. Sorting in linear time - variations on the bucket sort. *J. Comput. Small Coll.*, Consortium for Computing Sciences

in Colleges, USA, v. 20, p. 197–202, October 2004. ISSN 1937-4771.
Disponível em: <<http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1040231.1040257>>.

CUNHA, A. R. *Caracterização de sistemas porosos de rochas reservatório de petróleo a partir da extração de redes poro-ligações*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2012. Em elaboração.

DONG, H.; BLUNT, M. J. *Micro CT Imaging and Pore Network Extraction*. Tese (Doutorado), 2007.

DONG, H.; BLUNT, M. J. Pore-network extraction from micro-computerized-tomography images. *Physical Review E - Statistical, Nonlinear and Soft Matter Physics*, APS, v. 80, n. 3 Pt 2, p. 036307, 2009.
Disponível em: <<http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevE.80.036307>>.

ERICSON, C. *Real-Time Collision Detection (The Morgan Kaufmann Series in Interactive 3-D Technology)*. Morgan Kaufmann, 2005. Hardcover. ISBN 1558607323. Disponível em: <<http://www.amazon.com/exec/obidos/redirect?tag=citeulike07-20&path=ASIN/1558607323>>.

FABBRI, R. et al. 2D euclidean distance transform algorithms: A comparative survey. *ACM Comput. Surv.*, ACM, New York, NY, USA, v. 40, n. 1, p. 1–44, fev. 2008. ISSN 0360-0300. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1145/1322432.1322434>>.

GPU Cluster for High Performance Computing. 47 p. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1392977>.

FATT. The network model of porous media iii. dynamic properties of networks with tube radius distribution. *Trans Soc. Min. Eng. AIME*, 1956.

FERNANDES, J. S.; APPOLONI, C. R.; FERNANDES, C. P. Determinação de parâmetros microestruturais e reconstrução de imagens 3-d de rochas reservatório por microtomografia de raios x. *RECEN - Revista Ciências Exatas e Naturais, Vol. 11, No 1 (2009)*, 2009. ISSN 2175-5620. Disponível em: <<http://revistas.unicentro.br/index.php/RECEN/article/view/384>>.

GUTHE, S. et al. Interactive rendering of large volume data sets. In: *Visualization, 2002. VIS 2002. IEEE*. [S.l.: s.n.], 2002. p. 53–60.

INÁCIO, R. T. *Visualização de conjuntos de dados representáveis por esferas*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2012. Em elaboração.

JONES, R. W. Comparison of carbonate and shale source rocks. *AAPG Special Volumes*, SG 18: Petroleum Geochemistry and Source Rock Potential of Carbonate Rocks, p. 163–180, 1984.

KAINZ, B. et al. Ray casting of multiple volumetric datasets with polyhedral boundaries on manycore gpus. In: *ACM SIGGRAPH Asia 2009 papers*. New York, NY, USA: ACM, 2009. (SIGGRAPH Asia '09), p. 152:1–152:9. ISBN 978-1-60558-858-2. Disponível em: <<http://doi.acm.org/10.1145/1661412.1618498>>.

KITCHENHAM, B. *Procedures for performing systematic reviews*. [S.l.], 2004.

LERDAHL, T. R.; OREN, P.-E.; BAKKE, S. A predictive network model for three-phase flow in porous media. Society of Petroleum Engineers, 2000. Disponível em: <<http://www.onepetro.org/mslib/servlet/onepetroreview?id=00059311&soc=SPE>>.

LOTUFO, R.; FALCAO, A.; ZAMPIROLI, F. Fast euclidean distance transform using a graph-search algorithm. *Graphics, Patterns and Images, SIBGRAPI Conference on*, IEEE Computer Society, Los Alamitos, CA, USA, v. 0, p. 269, 2000. ISSN 1530-1834.

LUCIA, F. J. *Carbonate Reservoir Characterization*. New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1999. 336 p.

MASON, G.; MORROW, N. R. Capillary behavior of a perfectly wetting liquid in irregular triangular tubes. *Journal of Colloid and Interface Science*, v. 141, n. 1, p. 262–274, 1991. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/002197979190321X>>.

NORDBOTTEN, J. M. Multiscale methods for multiphase flow in porous media. In: *Domain Decomposition Methods in Science and Engineering XVIII*. Springer Berlin Heidelberg, 2009, (Lecture Notes in Computational Science and Engineering, v. 70). p. 39–50. ISBN 978-3-642-02677-5. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-02677-5_4>.

OREN, P.-E.; BAKKE, S. Process based reconstruction of sandstones and prediction of transport properties. *Transport in Porous Media*, Springer Netherlands, v. 46, p. 311–343, 2002. ISSN 0169-3913. 10.1023/A:1015031122338. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1023/A:1015031122338>>.

PATZEK, T.; SILIN, D. Shape factor and hydraulic conductance in noncircular capillaries: I. one-phase creeping flow. *Journal of Colloid and Interface*

Science, v. 236, n. 2, p. 295 – 304, 2001. ISSN 0021-9797. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0021979700974137>>.

RAMOS, J. V.

Validação do Cálculo de Dados Petrofísicos com Base na Caracterização de Rochas de Reservatório — Universidade Federal de Santa Catarina, 2012. Em elaboração.

ROBERT, J.; CORDELL. Chapter 5 carbonates as hydrocarbon source rocks. In: CHILINGARIAN, S. M. G.; RIEKE, H. (Ed.). *carbonate reservoir characterization: a geologic—engineering analysis, part I*. Elsevier, 1992, (Developments in Petroleum Science, v. 30). p. 271 – 329. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0376736109701281>>.

SAITO, T.; TORIWAKI, J.-I. New algorithms for euclidean distance transformation of an n-dimensional digitized picture with applications. *Pattern Recognition*, v. 27, n. 11, p. 1551 – 1565, 1994. ISSN 0031-3203. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0031320394901333>>.

SCHENA, G.; FAVRETTO, S. Pore space network characterization with sub-voxel definition. *Transport in Porous Media*, Springer Netherlands, v. 70, p. 181–190, 2006. ISSN 0169-3913. 10.1007/s11242-006-9094-z. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s11242-006-9094-z>>.

SCHENA, G.; FAVRETTO, S.; PILLER, M. Pore space characterisation and permeability prediction using fast network extraction and pore throat conductance calculation. Society of Petroleum Engineers, 2008. Disponível em: <<http://www.onepetro.org/mslib/servlet/onepetropreview?id=SPE-113511-MS&soc=SPE>>.

SEZGIN, M.; SANKUR, B. Survey over image thresholding techniques and quantitative performance evaluation. *Journal of Electronic Imaging*, SPIE, v. 13, n. 1, p. 146–168, 2004. ISSN 10179909. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1117/1.1631315>>.

SILIN, D. B.; JIN, G.; PATZEK, T. W. Robust determination of the pore space morphology in sedimentary rocks. Society of Petroleum Engineers, 2003.

SILVA, A. F. B. et al. A multi-layered development framework for medical imaging applications. In: *CBMS'09*. [S.l.: s.n.], 2009. p. 1–4.

TORELLI, J. C. et al. A high performance 3D exact euclidean distance transform algorithm for distributed computing. *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, v. 24, n. 6, p. 1–19, 2010.

VALVATNE, P.; BLUNT, M. J. *Predictive Pore-Scale Modelling of Multiphase Flow*. Tese (Doutorado), 2004.

VALVATNE, P. H. et al. Predictive pore-scale modeling of single and multiphase flow. *Transport in Porous Media*, Springer Netherlands, v. 58, p. 23–41, 2005. ISSN 0169-3913. 10.1007/s11242-004-5468-2. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s11242-004-5468-2>>.

WASHBURN, E. W. The dynamics of capillary flow. *Phys. Rev.*, v. 17, p. 273–283, 1921.

7 APÊNDICE A: FORMATO RBV E RESULTADOS

7.1 FORMATO RBV

O formato *Run-length Encoded Binary Volume* (RBV) é composto por duas partes. A primeira é o header com extensão `.rbv`, cujas informações são:

Campo	Descrição	Exemplo	Tipo
DataDimensions	Tamanho do volume em voxels	“300 300 300”	Obrigatório
Spacing	Espaçamento entre cada voxel	“0.375 0.332 0.8”	Obrigatório
BinaryFile	Caminho absoluto ou relativo para a parte binária, isso é, o <code>.rle</code>	“arquivoTeste.rle”	Obrigatório
Title	Título da amostra	“amostra teste”	Opcional
Porosity	Porosidade do volume	“14.769”	Opcional

O arquivo `.rle` é definido como um conjunto de headers seguidos de segmentos. Em C:

```
#include <stdint.h>

struct RLESegmentHeader {
    uint16_t numberOfSegments;
    uint8_t firstPixelValue;
};

struct RLESegment {
    uint16_t start;
    uint16_t length;
};
```

7.2 VALORES PARA DEMAIS VOLUMES

Nessa seção são apresentados os resultados obtidos pela extração das RPs nos arenitos S4, S6, S7, S8 e S9. Os resultados observados nesses valores são análogos aos apresentados durante o capítulo 5. Também são apresentados os números de coordenação para todas as redes exceto a C1 e S1, já vistas durante o trabalho.

	EMB	MB
Porosidade da rede	17.2	17.3
N de poros	14265.0	9556.0
N de gargantas	18971.0	13321.0
N de inlets	375.0	312.0
N de outlets	395.0	317.0
N de isolados	2039.0	1221.0
Elementos circulares	163.0	0.0
Elementos quadrados	234.0	132.0
Elementos triangulares	32841.0	22747.0

Tabela 18: Características da RP, no EMB e MB, para o volume S4

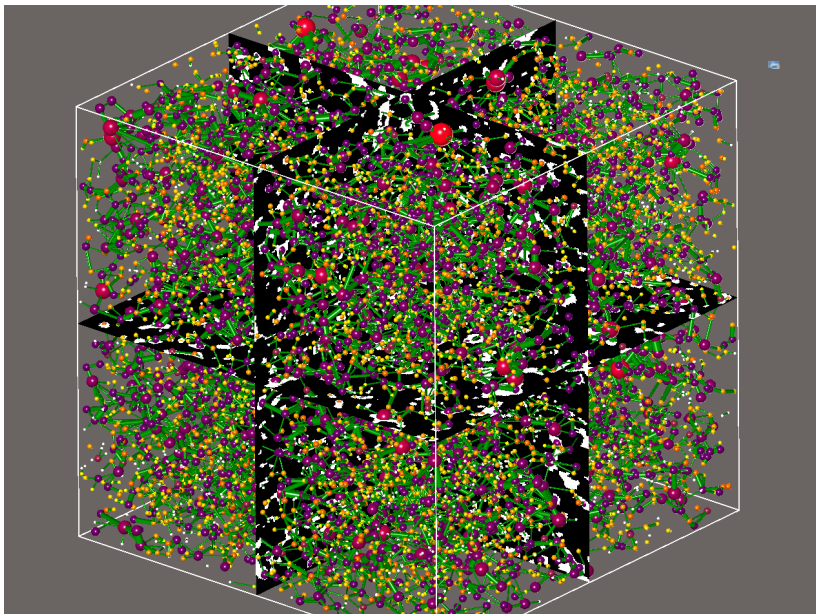


Figura 62: Rede gerada para o volume S4

	EMB	MB
Porosidade da rede	24.5	24.5
N de poros	1316.0	597.0
N de gargantas	2642.0	1234.0
N de inlets	101.0	61.0
N de outlets	33.0	21.0
N de isolados	66.0	44.0
Elementos circulares	101.0	0.0
Elementos quadrados	74.0	12.0
Elementos triangulares	3785.0	1821.0

Tabela 19: Características da RP, no EMB e MB, para o volume S6

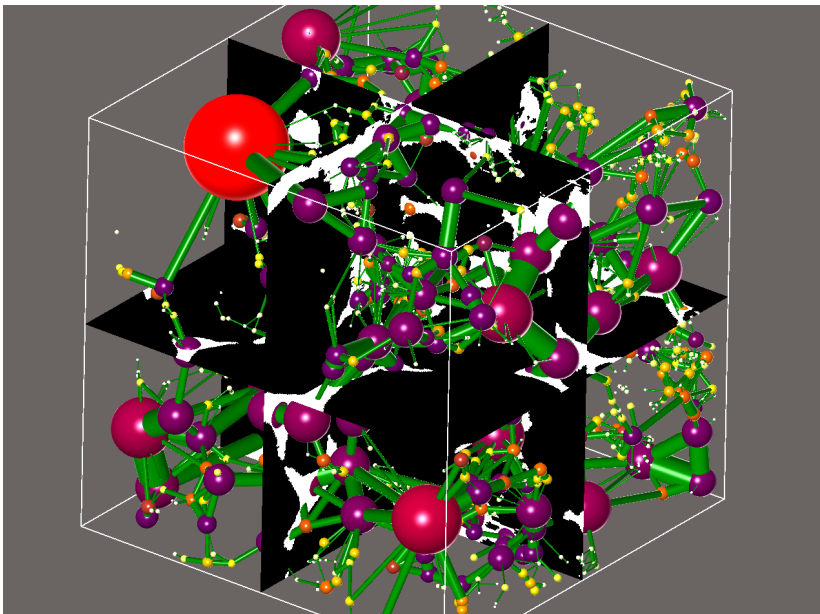


Figura 63: Rede gerada para o volume S6

	EMB	MB
Porosidade da rede	25.9	25.6
N de poros	2041.0	1016.0
N de gargantas	4734.0	2741.0
N de inlets	130.0	74.0
N de outlets	130.0	95.0
N de isolados	28.0	26.0
Elementos circulares	122.0	0.0
Elementos quadrados	126.0	13.0
Elementos triangulares	6529.0	3746.0

Tabela 20: Características da RP, no EMB e MB, para o volume S7

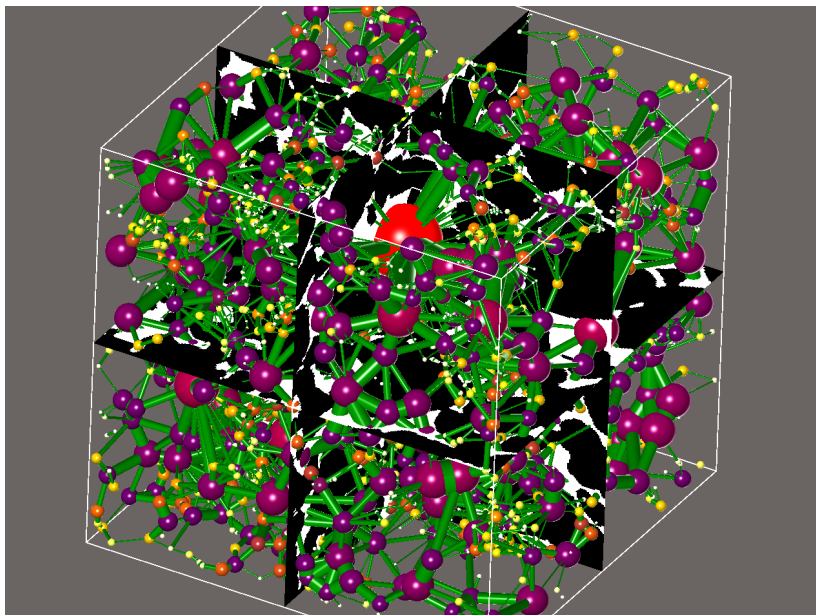


Figura 64: Rede gerada para o volume S7

	EMB	MB
Porosidade da rede	34.6	34.6
N de poros	2506.0	1324.0
N de gargantas	6612.0	4029.0
N de inlets	141.0	91.0
N de outlets	160.0	101.0
N de isolados	74.0	56.0
Elementos circulares	176.0	0.0
Elementos quadrados	170.0	20.0
Elementos triangulares	8774.0	5335.0

Tabela 21: Características da RP, no EMB e MB, para o volume S8

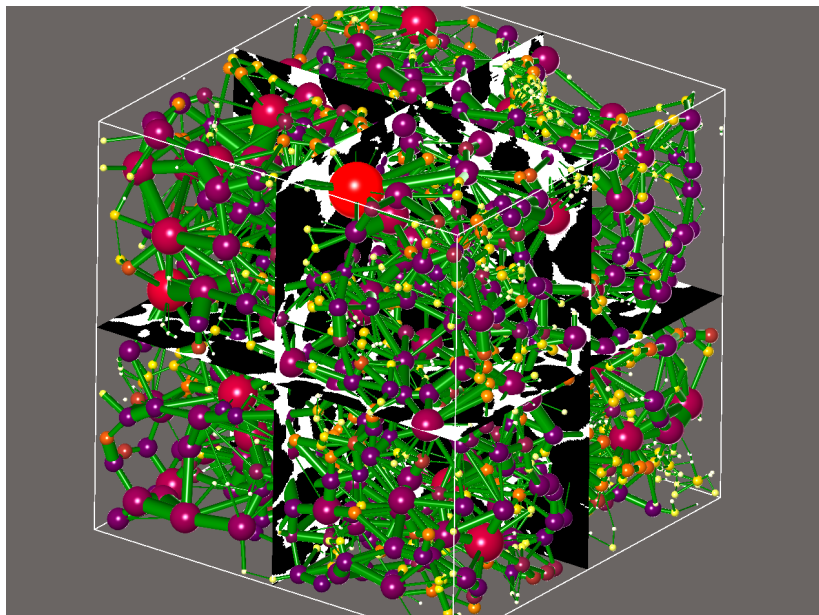


Figura 65: Rede gerada para o volume S8

	EMB	MB
Porosidade da rede	23.2	23.0
N de poros	880.0	604.0
N de gargantas	1454.0	1054.0
N de inlets	62.0	48.0
N de outlets	76.0	56.0
N de isolados	85.0	67.0
Elementos circulares	20.0	0.0
Elementos quadrados	23.0	10.0
Elementos triangulares	2293.0	1650.0

Tabela 22: Características da RP, no EMB e MB, para o volume S9

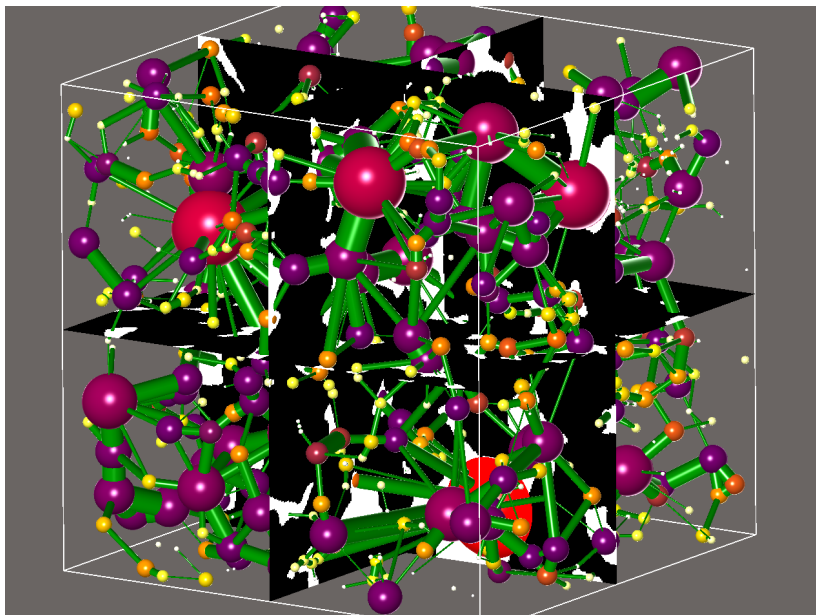


Figura 66: Rede gerada para o volume S9

	EMB	MB
Porosidade da rede	19.8	19.5
N de poros	2534.0	1429.0
N de gargantas	5047.0	2888.0
N de inlets	114.0	86.0
N de outlets	117.0	77.0
N de isolados	120.0	81.0
Elementos circulares	115.0	0.0
Elementos quadrados	66.0	17.0
Elementos triangulares	7402.0	4302.0

Tabela 23: Características da RP, no EMB e MB, para o volume S10

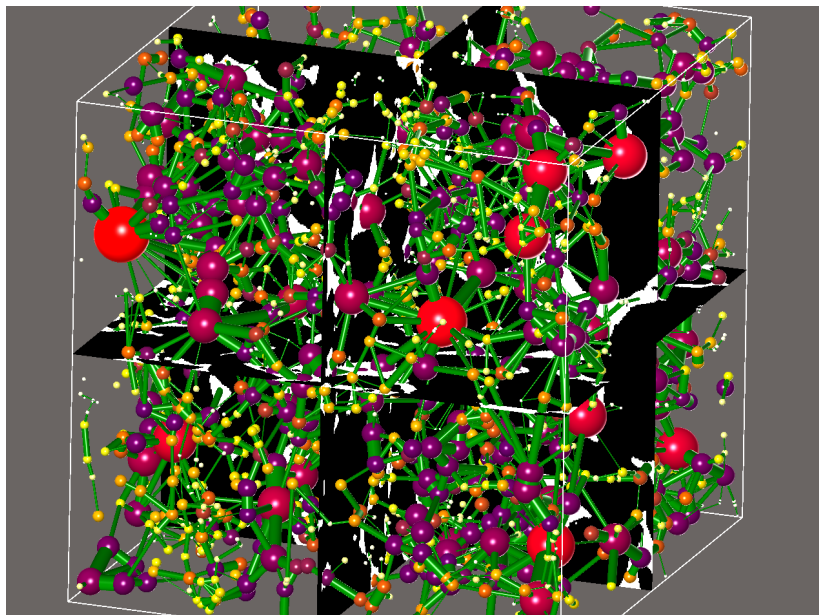


Figura 67: Rede gerada para o volume S10

	EMB	MB
Porosidade da rede	23.7	23.6
N de poros	977.0	566.0
N de gargantas	2030.0	1171.0
N de inlets	56.0	44.0
N de outlets	59.0	45.0
N de isolados	32.0	22.0
Elementos circulares	59.0	0.0
Elementos quadrados	30.0	6.0
Elementos triangulares	2920.0	1733.0

Tabela 24: Características da RP, no EMB e MB, para o volume S11

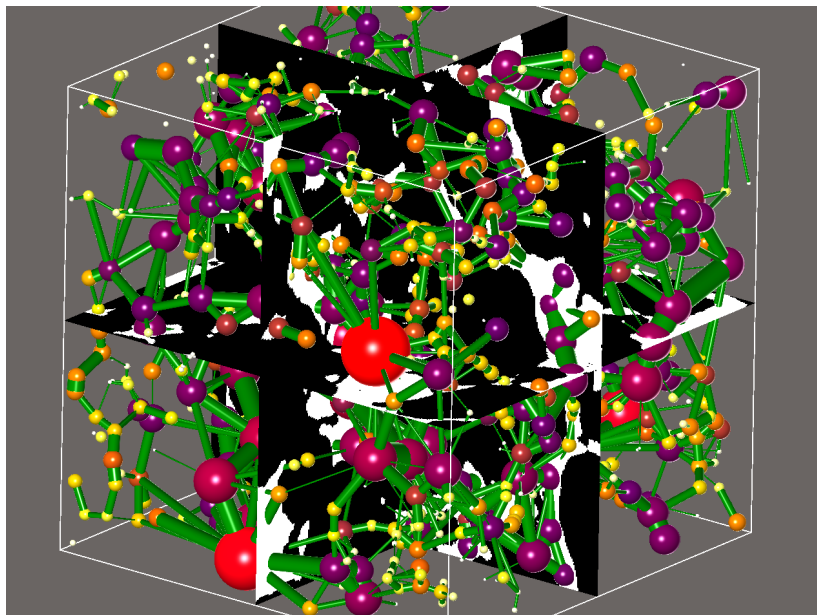


Figura 68: Rede gerada para o volume S11

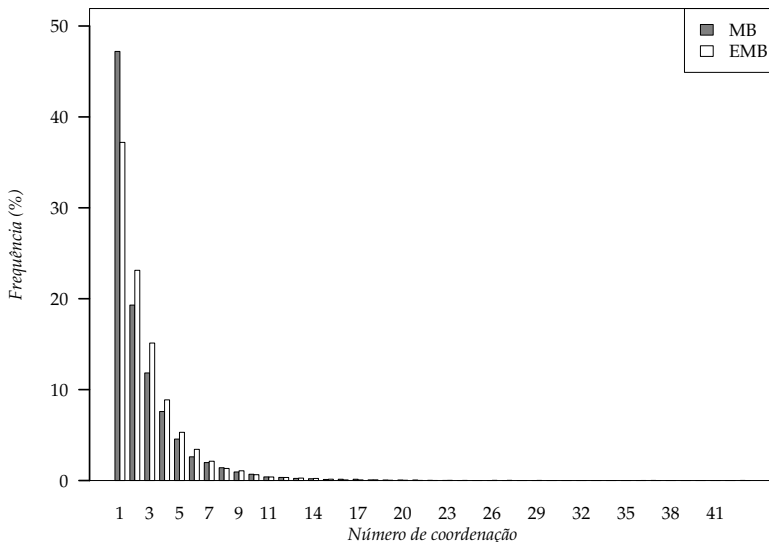


Figura 69: Distribuição do número de coordenação para o EMB e MB no volume C2

7.2.1 Números de coordenação

Nessa seção são demonstrados graficamente os números de coordenação para as amostras não vistas durante o capítulo 5.

Uma forte tendência que pode ser observada em todas as figuras é a de gerar menos poros com zero ou uma conexão. Isso comprova que apesar de gerar um número maior de voxels inválidos, conforme visto no capítulo 4, o EMB gera menos poros desconexos.

Na tese de Dong e Blunt (2007) ele teoriza em certo ponto que um número alto de poros desconexos pode ser devido a baixa resolução da imagem de entrada. Apesar de tal constatação poder ser verdadeira, há espaço para melhoria na técnica MB nesse sentido. Ou seja, é possível extrair poros mais bem conexos da mesma imagem de entrada do MB, conforme demonstrado pela rede EMB gerada.

Também, percebe-se uma tendência similar a do C1 e S1. Isso é, no C2 há uma alta concentração em valores baixos de coordenação e poucos poros com valores altíssimos. Em contrapartida, nos arenitos observa-se uma maior regularidade da distribuição com uma frequência bem maior de poros medianos.

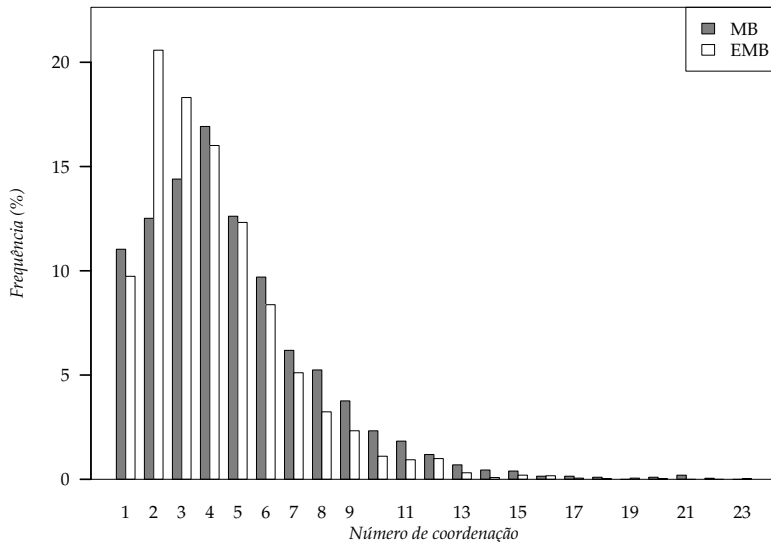


Figura 70: Distribuição do número de coordenação para o EMB e MB no volume S2

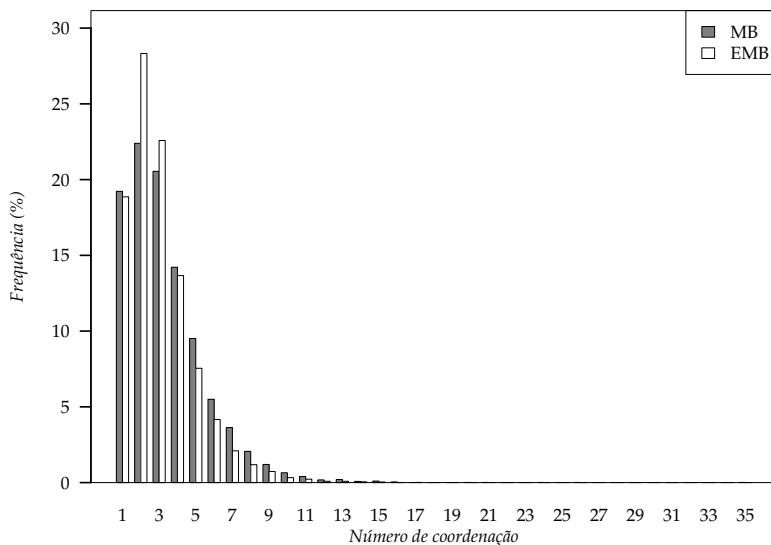


Figura 71: Distribuição do número de coordenação para o EMB e MB no volume S3

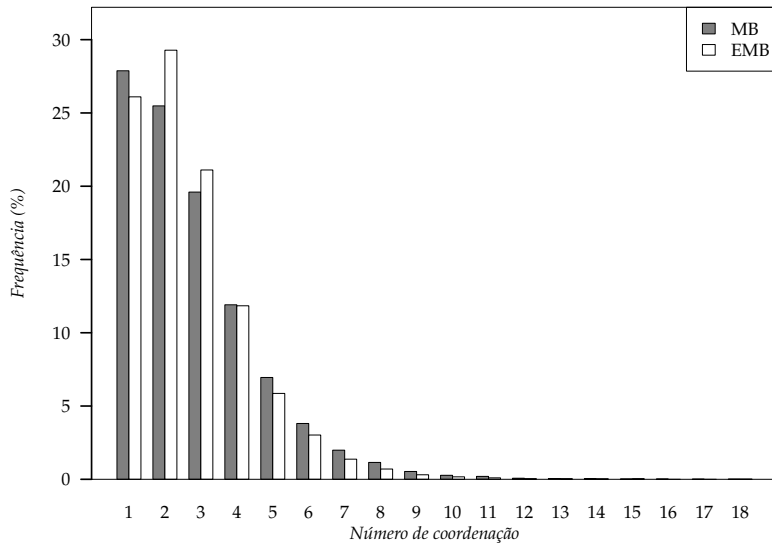


Figura 72: Distribuição do número de coordenação para o EMB e MB no volume S4

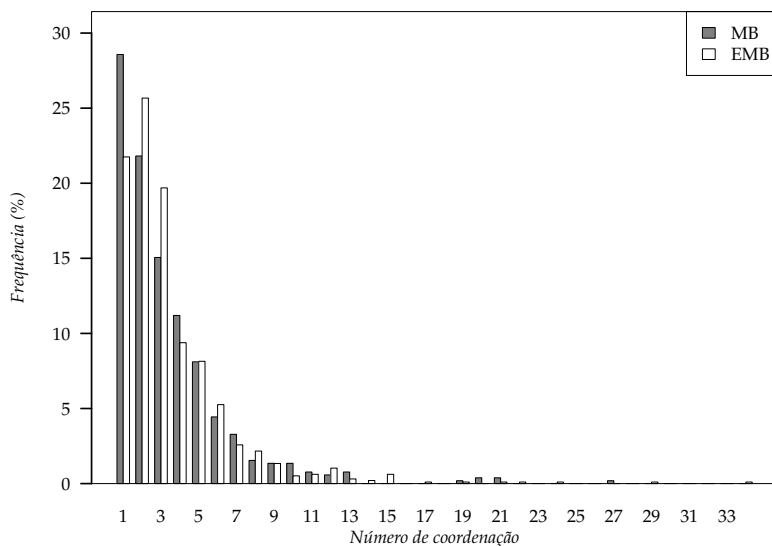


Figura 73: Distribuição do número de coordenação para o EMB e MB no volume S5

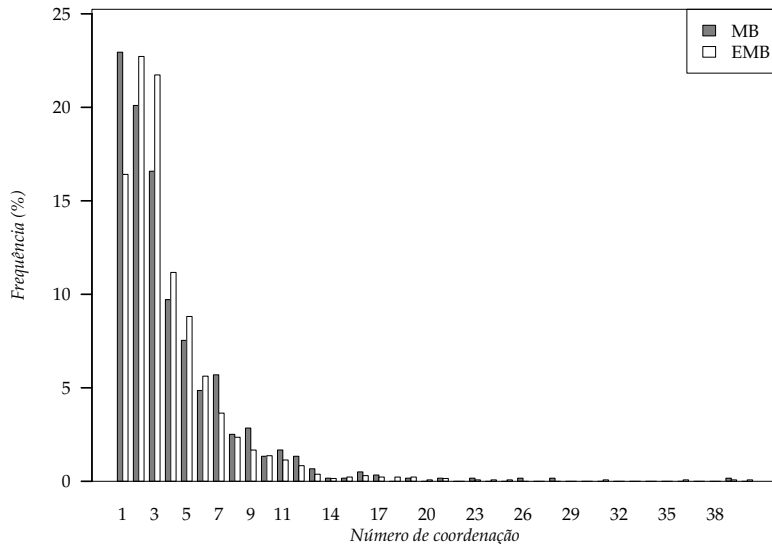


Figura 74: Distribuição do número de coordenação para o EMB e MB no volume S6

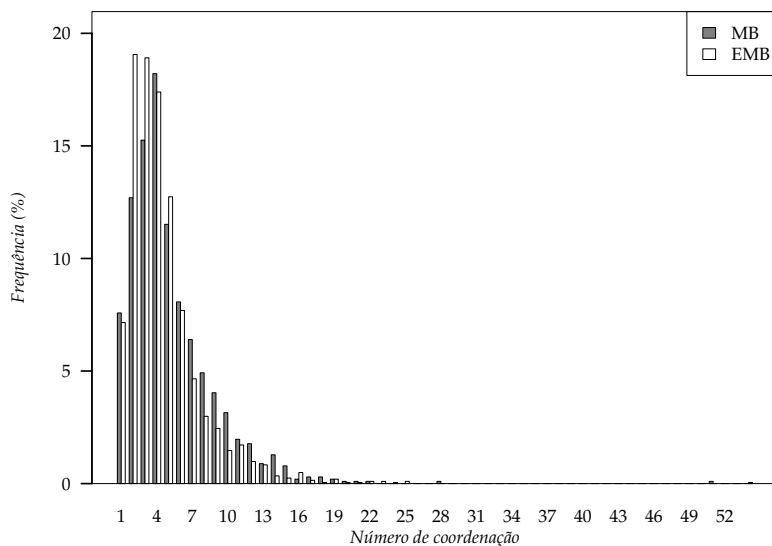


Figura 75: Distribuição do número de coordenação para o EMB e MB no volume S7

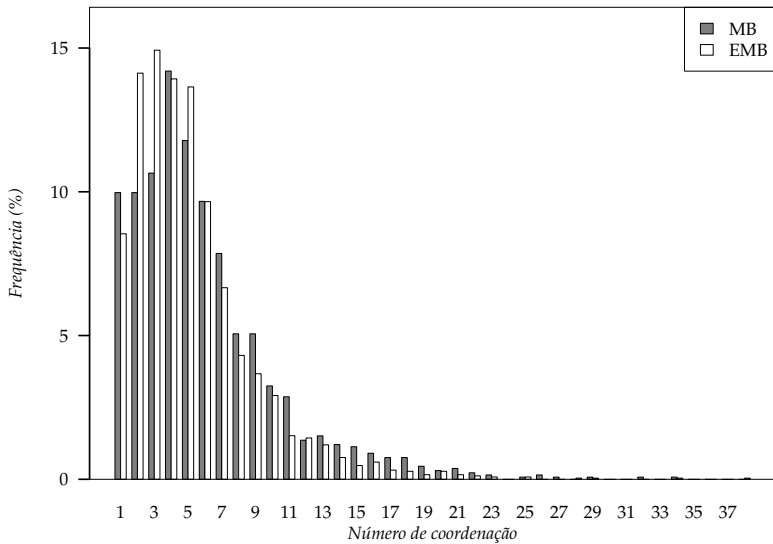


Figura 76: Distribuição do número de coordenação para o EMB e MB no volume S8

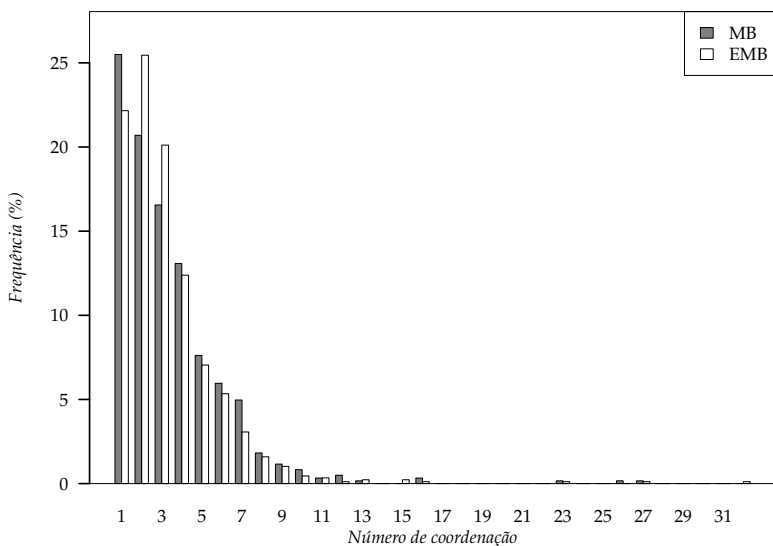


Figura 77: Distribuição do número de coordenação para o EMB e MB no volume S9

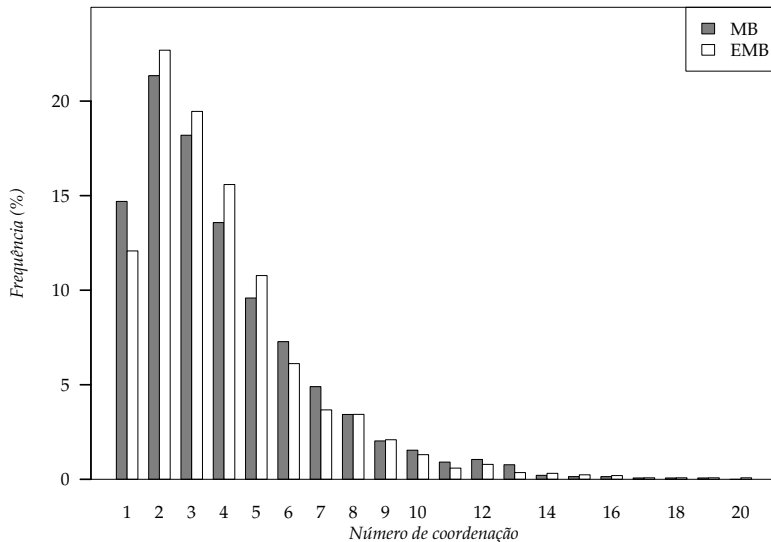


Figura 78: Distribuição do número de coordenação para o EMB e MB no volume S10

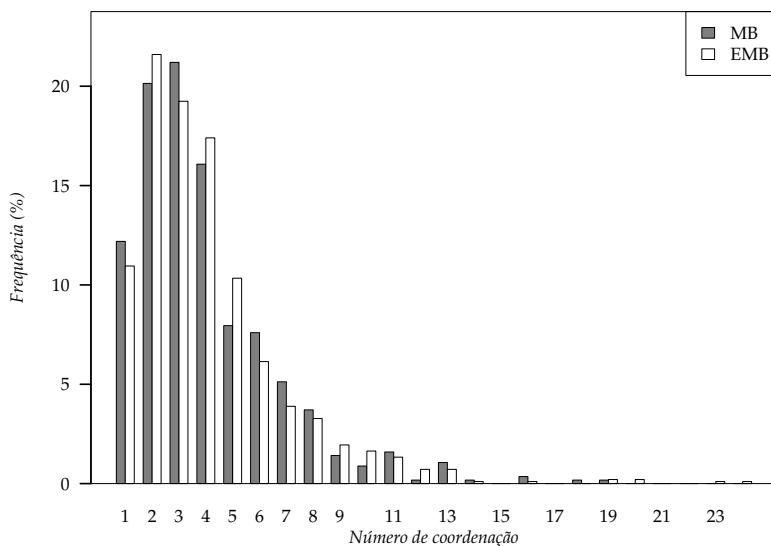


Figura 79: Distribuição do número de coordenação para o EMB e MB no volume S11

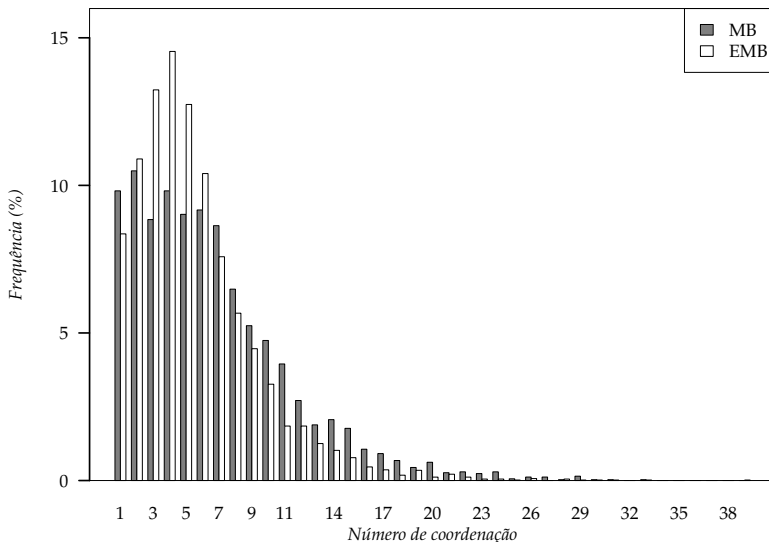


Figura 80: Distribuição do número de coordenação para o EMB e MB no volume A1

7.3 ESCOAMENTO MONOFÁSICO NAS REDES EMB E MB NOS EIXOS Y E Z

Os resultados são referentes aos valores apresentados na tese de Dong e Blunt (2007). No capítulo 5, foi feita uma comparação com os valores de escoamento no eixo x . O eixo y apresentou, assim como o x , bons resultados, porém no eixo z os valores para a rede EMB e MB foram bastante discrepantes. No geral, observou-se valores esperados para as redes, porém no caso C2, o resultado do EMB foi muito maior que o do MB para os fatores E_f utilizados. Uma explicação seria a diferença entre os parâmetros utilizados na tese referente. Ainda assim, os resultados encontrados no trabalho citado diferem bastante do encontrado nos testes rodados.

7.4 PARÂMETROS PARA O SIMULADOR

A definição dos parâmetros para escoamento no simulador *two phase* foi feita usando um arquivo de descrição do mesmo, cuja definição das variáveis encontra-se no trabalho de Valvatne e Blunt (2004). O arquivo de

	F_y 0.5	F_y 0.6	F_y 0.7	F_y 0.8	K_y 0.5	K_y 0.6	K_y 0.7	K_y 0.8
S1	0.204	0.227	0.279	0.305	1.324	1.125	0.832	0.741
S2	0.137	0.155	0.172	0.191	2.535	2.130	1.851	1.629
S3	0.112	0.135	0.153	0.163	2.609	2.206	1.939	1.838
S4	0.081	0.094	0.099	0.106	2.496	2.135	2.025	1.862
S5	0.115	0.143	0.168	0.192	3.771	2.686	2.352	2.003
S6	0.126	0.159	0.168	0.184	3.581	2.682	2.575	2.192
S7	0.121	0.140	0.163	0.170	2.420	1.965	1.690	1.644
S8	0.118	0.135	0.154	0.171	3.268	2.786	2.357	2.082
S9	0.098	0.105	0.129	0.145	42.886	33.523	24.379	21.657
C1	0.108	0.159	0.166	0.177	2.797	1.928	1.800	1.504
C2	0.095	0.103	0.118	0.126	1.882	1.817	0.954	0.916
A1	0.110	0.132	0.153	0.166	2.731	2.163	1.765	1.596
Média	0.119	0.141	0.160	0.175	6.025	4.762	3.710	3.305
Variância	0.001	0.001	0.002	0.002	135.205	82.238	42.637	33.589

Tabela 25: Tabela que apresenta a razão do resultado obtido pela simulação na rede EMB em relação aos resultados do trabalho de Dong e Blunt (2007) para diferentes fatores de expansão, no eixo y

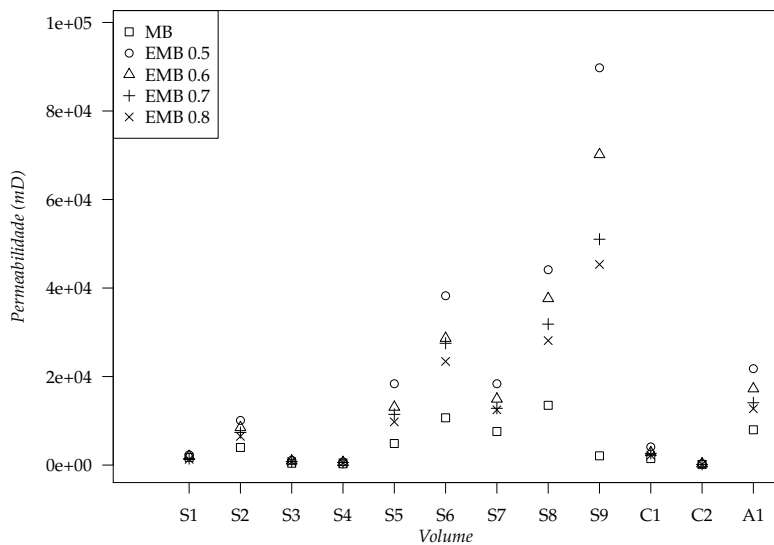


Figura 81: Permeabilidades K_y , em mD , para as redes EMB e o resultado original de Dong e Blunt (2007)

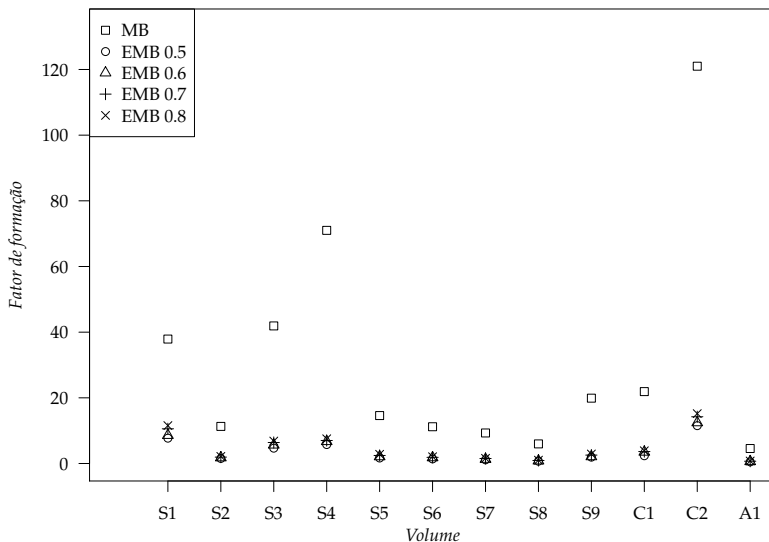


Figura 82: Fatores de forma F_y para as redes EMB e o resultado original de Dong e Blunt (2007)

	F_z 0.5	F_z 0.6	F_z 0.7	F_z 0.8	K_z 0.5	K_z 0.6	K_z 0.7	K_z 0.8
S1	0.129	0.141	0.169	0.188	2.816	2.608	2.346	2.243
S2	0.120	0.138	0.156	0.174	3.027	2.506	2.176	1.912
S3	0.094	0.109	0.123	0.137	6.728	5.648	4.874	4.529
S4	0.083	0.096	0.105	0.119	2.378	2.008	1.796	1.560
S5	0.088	0.110	0.154	0.177	4.533	3.001	2.582	2.199
S6	0.135	0.155	0.161	0.177	2.710	2.240	2.182	1.851
S7	0.095	0.109	0.127	0.132	3.098	2.498	2.145	2.094
S8	0.104	0.118	0.134	0.148	3.464	2.973	2.523	2.217
S9	0.108	0.117	0.140	0.157	46.542	35.643	27.343	24.350
C1	0.131	0.158	0.164	0.178	3.144	2.604	2.435	1.980
C2	0.035	0.036	0.038	0.041	14.987	14.351	13.899	13.185
A1	0.092	0.108	0.124	0.140	3.969	3.178	2.670	2.257
Média	0.101	0.116	0.133	0.147	8.116	6.605	5.581	5.031
Variância	0.001	0.001	0.001	0.002	158.494	95.263	58.158	47.382

Tabela 26: Tabela que apresenta a razão do resultado obtido pela simulação na rede EMB em relação aos resultados do trabalho de Dong e Blunt (2007) para diferentes fatores de expansão, no eixo z

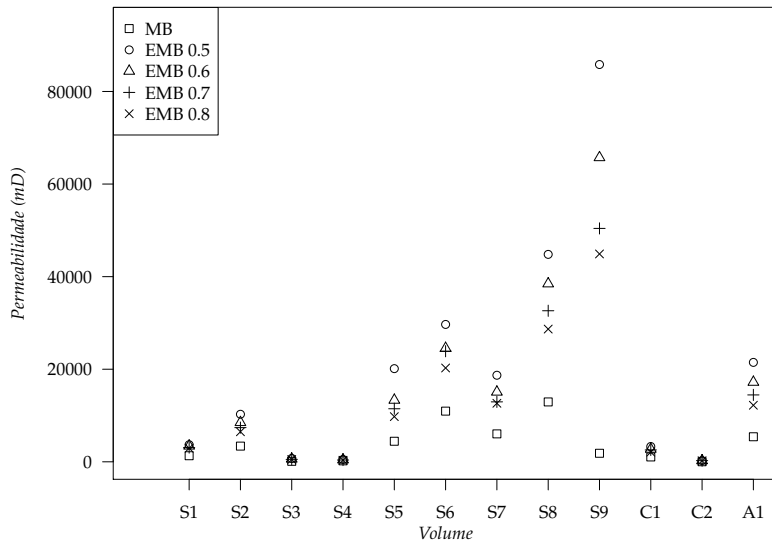


Figura 83: Permeabilidades K_z , em mD , para as redes EMB e o resultado original de Dong e Blunt (2007)

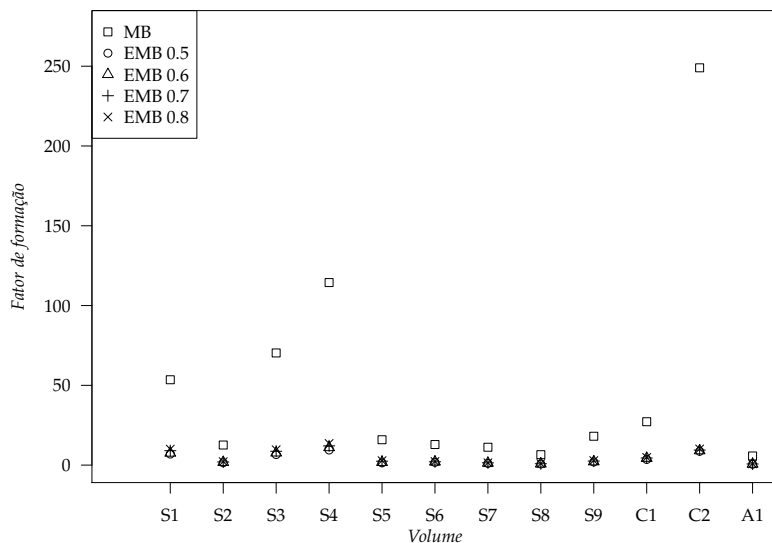


Figura 84: Fatores de forma F_z para as redes EMB e o resultado original de Dong e Blunt (2007)

parâmetros base utilizado no simulador foi o seguinte:

```

RAND_SEED
5654875
#

OUTPUT
% PropertyOutput      SwOutput
      T                T
#

SAT_TARGET
%finalSat      maxPc      maxDeltaSw      maxDeltaPc      calcKr      calcI
      0.00      1.0E21      0.20      500000.0      T      F
      1.00      -1.0E21      0.20      500000.0      T      F
#

INIT_CON_ANG
0.0  0.0  0.2  3.0
#

EQUIL_CON_ANG
3  50.0  60.0  -10.0  -1.0  rMax
#

%FRAC_CON_ANG
% fraction  volBased  min  max  delta  eta
%  0.5      T      90.0  140.0  -10.0  -1.0
% method  Clust  Diam  Oil-in-Wat
% corr    4      F
%#

RES_FORMAT
excel
#

RELPERM_DEF
single F
#

TRAPPING
% Inject fluid from      allow drainage      water mult fact in
%      entry  exit      of dangling ends      filled circ elem
%      T      F      T      0.0E-30
#

SOLVER_TUNE
% min      Memory Scaling      Solver      Verbose      Conductance
% tolerance      Factor      output      Solver      Cut-Off
% 1.0E-30      8      0      F      0.0
#

PRS_BDRS
% calc kr using      record press      num press
% avg press      profiles      profiles
%      F      F      10
#

%SOLVER_DBG
% Matrices      Velocities      Filename      Matlab      Init Only
% W O Res      W O Res
% T T T      F F F      test      F      F

```

%#

PORE_FILL_ALG

oren2

#

PORE_FILL_WGT

0 0.5 1.0 5.0 10.0 50.0

#

%FILLING_LIST

%T T T

%#

FLUID

% interfacial		water	oil	water	oil
water	oil				
% tension		viscosity	viscosity	resistivity	resistivity
density	density	(cp)	(cp)	(Ohm.m)	(Ohm.m)
(kg/m3)	(mN/m)				
	(kg/m3)				
1000.0	30.0	1.0	1.0	1.2	1000.0 1000.0
%	12.3	0.991	5.23	1.2	1000.0
1044.0	1044.0				
#					

CALC_BOX

0.1 0.9

#

%A_CLOSE_SHAVE

%0.7

%#

%MODIFY_MOD_SIZE

%0.4329

%#

%PRS_DIFF

%10.0 0.0 T

%#

%GRAV_CONST

%-9.81 -9.81 0.0

%#

%MODIFY_RAD_DIST

%		=====	THROATS	=====		
%1	./throat_lpc_clay.txt	-2.0	-600.0	%	Read pore size distribution	
%		=====	PORES	=====		
%2	-1.0 -3.0 0.2 3.0			%	Aspect ratio	
%T	T 15					
#						

%MODIFY_G_DIST

%-1

%5 0.001 0.04811 -1.0 -1.0

%T 50

%#

```
%WRITE_NET
%T  bere_bin
%#

SAT_COVERGENCE
%  minNumFillings  initStepSize  cutBack  maxIncr  stable disp
   10              0.1          0.8      2.0      F
```

A definição das variáveis TITLE e NETWORK foram feitas de acordo com a amostra de entrada.