UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**MODELO DE DIMENSÃO FRACTAL PARA
AVALIAÇÃO DE PARÂMETROS HIDRÁULICOS
EM MEIO FISSURAL**

João Manoel Filho

Orientador: Prof. Dr. Aldo da Cunha Rebouças

TESE DE DOUTORAMENTO

COMISSÃO JULGADORA

Presidente :

Examinadores:

nome

ass.

Prof. Dr. Aldo da Cunha Rebouças

Prof. Dr. Benjamin Bley de B. Neves

Prof. Dr. Jorge Kazuo Yamamoto

Prof. Dr. Hung Kiang Chang

Prof. Dr. Fernando Olavo Franciss

Handwritten signatures of the five members of the Commission, corresponding to the names listed in the 'nome' column.

**SÃO PAULO
1996**

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

DEDALUS - Acervo - IGC

30900005145

**MODELO DE DIMENSÃO FRACTAL PARA
AVALIAÇÃO DE PARÂMETROS HIDRÁULICOS
EM MEIO FISSURAL**

João Manoel Filho

Orientador: Prof. Dr. Aldo da Cunha Rebouças

TESE DE DOUTORAMENTO

Programa de Pós-Graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia

**SÃO PAULO
1996**

Modificado de Mandelbrot (1983)

... I claim that many patterns of Nature are so irregular
and fragmented that
compared with *Euclid* ... Nature exhibits
not simply a higher degree
but an altogether different level of complexity.

Benoit Mandelbrot

in memoria

João Manoel da Silva
e
Estelita Timóteo da Silva

SUMÁRIO

Lista de figuras.....	x
Lista de tabelas.....	xvi
Lista de quadros.....	xix
Resumo.....	xx
Abstract.....	xxi
1 - INTRODUÇÃO.....	1
1.1 OBJETIVOS.....	1
1.2 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA.....	2
1.3 METODOLOGIA.....	5
1.3.1 - Planejamento e execução de testes de bombeamento.....	5
1.3.2 - Utilização de dados de testes executados por terceiros.....	6
1.3.3 - Organização dos dados dos testes.....	6
Codificação dos dados.....	6
Sistema georeferencial	8
1.3.4 - Tratamento dos dados de bombeamento.....	11
1.4 ESTRUTURA DA TESE.....	8 12
1.5 NOTAÇÃO.....	14
1.6 AGRADECIMENTOS.....	17
PARTE I	18
CONCEITOS E FUNDAMENTOS BÁSICOS	
2 - OS AQUÍFEROS DAS ROCHAS CRISTALINAS.....	19
2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.2 - OCORRÊNCIA E IMPORTÂNCIA.....	23
2.2.1 - Região semi-árida.....	23
Subprovincia Coberturas Clásticas São Francisco.....	23
Subprovincia Coberturas Carbonáticas São Francisco.....	25
Vazões dos poços.....	26
Produtividade de aquífero.....	27
Subprovincia Escudo Oriental Nordeste.....	28
Espessura do manto e profundidade do nível estático.....	30
Coeficiente de carga estática do manto de cobertura indiferenciada.....	32

<i>Níveis dinâmicos e entradas de água mais profundas.....</i>	33
<i>Coefficiente de carga dinâmica da fenda mais profunda.....</i>	34
<i>Vazões bombeadas e resíduos secos das águas subterrâneas.....</i>	36
<i>Produtividade de aquífero.....</i>	38
2.2.2 Região úmida.....	38
Subprovíncia Escudo Oriental Sudeste.....	41
<i>Profundidade dos poços.....</i>	41
<i>Espessura do manto eluvial.....</i>	43
<i>Nível estático.....</i>	43
<i>Coefficiente de carga estática do manto eluvial.....</i>	44
<i>Níveis dinâmicos e fendas mais profundas.....</i>	45
<i>Coefficiente de carga dinâmica da fenda mais profunda.....</i>	46
<i>Vazões dos poços.....</i>	46
<i>Produtividade de aquífero.....</i>	47
Subprovíncia Serra Geral.....	47
<i>Profundidade dos poços.....</i>	48
<i>Diâmetro dos poços.....</i>	49
<i>Fendas produtoras mais profundas.....</i>	49
<i>Vazões dos poços.....</i>	50
<i>Produtividade de aquífero.....</i>	50
2.3 - AQUÍFERO COM POROSIDADE SECUNDÁRIA E	
CONDUTOR HIDRÁULICO.....	51
2.3.1 - Conceito de aquífero com porosidade secundária.....	51
2.3.2 - Conceito de condutor hidráulico.....	52
2.3.3 - Conceito de condutor hidráulico fractal.....	54
2.4 - GEOMETRIA E HIDRÁULICA DOS RESERVATÓRIOS	
SUBTERRÂNEOS FRATURADOS.....	58
2.4.1 - Métodos de análise geométrica de domínios 2D.....	59
Mapeamento de fraturas em campo	60
Mapeamento de fraturas por sensoriamento remoto.....	60
Mapeamento de fraturas em poços.....	61
<i>Testemunhagens.....</i>	61
<i>Imagens.....</i>	61
2.4.2 - Métodos hidráulicos.....	62
Tipos de testes.....	62
"Slug-test" (ST).....	62
Teste de "impulso" ou teste "pulso".....	62

<i>"Drill-stem test" (DST) ou teste de formação.....</i>	62
<i>Teste de bombeamento.....</i>	63
<i>Teste harmônico.....</i>	63
Regimes de fluxo.....	63
<i>Testes em regime estacionário ou quase estacionário.....</i>	64
<i>Testes transientes.....</i>	64
2.4.3 - O problema da locação de poços no cristalino.....	65
Parâmetros geométricos.....	65
Parâmetros hidráulicos.....	66
3 - OS MODELOS CONCEITUAIS DE FLUXO PARA POÇOS EM MEIO HETEROGÊNEO.....	72
3.1 - MODELO CAIXA PRETA.....	73
3.1.1 - Simulação em função do tempo.....	73
3.1.2 - Simulação em função da frequência.....	73
3.2 - MODELO DE MEIO CONTÍNUO EQUIVALENTE.....	74
3.2.1 - Modelos de porosidade única.....	75
Poço de raio finito.....	76
Poço de raio finito com reboco de espessura infinitesimal	76
Poço de raio finito com reboco de espessura finita	77
Modelo de transformação.....	78
Modelo de recuperação.....	80
3.2.2 - Modelos de dupla porosidade.....	80
Duplo domínio com drenagem retardada	81
Duplo domínio com drenagem instantânea.....	82
Duplo domínio com anisotropia.....	83
Sistema de blocos e fraturas horizontais.....	85
<i>Fluxo vertical no bloco.....</i>	86
<i>Fluxo vertical e horizontal no bloco.....</i>	88
3.3 MODELO DE MEIO DESCONTÍNUO.....	90
3.4 - VALIDADE DOS MODELOS CONCEITUAIS DE FLUXO EM... MEIO HETEROGÊNEO.....	91
4 - FRACTAIS E GEOMETRIA FRACTAL.....	93
4.1 O CONCEITO DE FRACTAIS.....	93
4.2 - PROCESSO DE GERAÇÃO DE UM CONJUNTO FRACTAL....	97
4.2.1 - Exemplos de processos iterativos determinísticos.....	98
4.3 - CAOS EM PROCESSOS ITERATIVOS DETERMINÍSTICOS....	99

4.3.1 - Iteração de uma expressão quadrática.....	100
4.3.2 - Iteração de um modelo de crescimento populacional.....	103
4.3.3 - Ilustração gráfica de um processo iterativo.....	105
4.4 - ALGUNS FRACTAIS CLÁSSICOS.....	110
4.4.1 - O conjunto de Cantor.....	110
4.4.2 - A curva de Koch.....	111
4.4.3 - A ilha de Koch.....	113
4.5 - CONCEITOS DE AUTO-SIMILARIDADE E INVARIÂNCIA DE ESCALA.....	115
4.6 - DIMENSÃO FRACTAL.....	116
4.6.1 - Dimensão de auto-similaridade.....	117
4.6.2 - Dimensão de escala.....	118
4.6.3 - Dimensão de lacunaridade.....	119
4.6.4 - Dimensão de contagem de caixas.....	119
4.7 - AUTO AFINIDADE.....	121
5 - O MODELO FRACTAL PROPOSTO.....	123
5.1 - FLUXO NO POÇO BOMBEADO.....	123
5.1.1 - Hipóteses básicas.....	123
5.1.2 - Parâmetros do poço.....	124
Espessura saturada inicial.....	124
Espessura da zona ativa.....	125
Esbeltez do poço.....	125
Submergência estática do crivo da bomba.....	125
Capacidade específica observada.....	125
Capacidade específica fractal.....	126
Descarga específica fractal.....	126
Coeficiente de produção do poço.....	127
Vazão integral uniforme.....	127
A dimensão fractal D	128
Lei de variação da vazão do poço.....	128
Evolução do rebaixamento em função da vazão.....	129
5.1.3 - Interpretação dos testes.....	129
Procedimento para o cálculo de Q^* e D	129
Transmissividade do condutor hidráulico.....	130
Abertura média das fraturas.....	130
Condutividade hidráulica.....	130
Permeabilidade.....	131

Porosidade do condutor hidráulico.....	131
5.2 - FLUXO NO PLANO VERTICAL (r,z).....	131
5.2.1 - Hipóteses básicas.....	131
Diferenças conceituais propostas.....	132
5.2.2 - Interpretação dos testes.....	132
Cálculo dos parâmetros hidráulicos.....	135
<i>Curvas de rebaixamento</i>	135
<i>Curvas de recuperação</i>	135
Ilustração do processo de cálculo.....	136

PARTE II

APLICAÇÕES DO MODELO AO ESTUDO DE CASOS

6 - PROVÍNCIA ESCUDO ORIENTAL.....	150
6.1 - SUBPROVÍNCIA ESCUDO ORIENTAL NORDESTE.....	150
6.1.1 - Estado do Ceará.....	150
Magnitude Q^* e dimensão D, do fluxo fractal.....	150
Propriedades hidráulicas	154
6.1.2 - Estado do Rio Grande do Norte.....	155
Magnitude Q^* e dimensão D, do fluxo fractal.....	155
Propriedades hidráulicas	156
6.1.3 - Estado da Paraíba	157
Magnitude Q^* e dimensão D, do fluxo fractal.....	157
Propriedades hidráulicas	159
6.1.4 - Estado da Bahia.....	161
Magnitude Q^* e dimensão D, do fluxo fractal.....	161
Propriedades hidráulicas	163
7 - PROVÍNCIA SÃO FRANCISCO.....	164
7.1 - SUBPROVÍNCIA COBERTURAS CLÁSTICAS.....	164
Magnitude Q^* e dimensão D, do fluxo fractal.....	164
Propriedades hidráulicas	165
7.2 - SUBPROVÍNCIA COBERTURAS CARBONÁTICAS.....	166
Magnitude Q^* e dimensão D, do fluxo fractal.....	166
Propriedades hidráulicas	167
8 - ILHAS OCEÂNICAS.....	169

8.1 - ILHA DE FERNANDO DE NORONHA.....	169
8.1.1 - Magnitude Q^* e dimensão D , do fluxo fractal.....	169
8.1.2 - Propriedades hidráulicas	170
8.2 - ILHA DE ROATÁN	170
8.2.1 - Magnitude Q^* e dimensão D , do fluxo fractal.....	171
8.2.2 - Propriedades hidráulicas	174
9 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	175
9.1 - O MODELO.....	175
9.2 - OS PARÂMETROS FUNDAMENTAIS.....	176
9.3 - AS APLICAÇÕES	177
9.4 - OS RESULTADOS.....	178
9.5 - A VALIDADE.....	180
9.6 - OS FATORES INFLUENTES NA VAZÃO DO POÇO.....	180
9.7 - A PRODUTIVIDADE DE "AQUÍFERO".....	181
9.8 - O PROBLEMA DA LOCAÇÃO DE POÇOS NO CRISTALINO.....	182
9.9 - AS AÇÕES.....	182
10 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	185
11 - APÊNDICE.....	193

Lista de figuras

1.1	Divisão do território Nacional em Regiões ou Bacias Hidrográficas	9
1.2	Divisão do território Nacional em Províncias Hidrogeológicas.....	10
2.1	Esboço geotectônico e subprovíncias hidrogeológicas do Pré-Cambriano Nordestino.....	24
2.2	Histograma de frequência de vazão de poços, baseado em amostra de 33 poços, na subprovíncia Coberturas Carbonáticas São Francisco, no Estado da Bahia.....	27
2.3	Produtividade de aquífero, baseada em amostra de 33 poços na subprovíncia Coberturas Carbonáticas São Francisco, no Estado da Bahia.....	28
2.4a	Histograma de frequência de espessura do manto de cobertura indiferenciada, para uma amostra de 799 poços, na subprovíncia Escudo Oriental Nordeste, nos Estados da Paraíba e Rio Grande do Norte.....	31
2.4b	Histograma de frequência de profundidade do nível estático, para 814 poços, na subprovíncia Escudo Oriental Nordeste, nos Estados da Paraíba e Rio Grande do Norte.....	31
2.5	Distribuição do coeficiente de carga estática do manto de cobertura indiferenciado, para 799 poços, na subprovíncia Escudo Oriental Nordeste, nos Estados da Paraíba e Rio Grande do Norte.....	32
2.6a	Histograma de frequência de profundidade do nível dinâmico, para uma amostra de 814 poços, na subprovíncia Escudo Oriental Nordeste, nos Estados da Paraíba e Rio Grande do Norte.....	33
2.6b	Histograma de frequência de profundidade da fenda produtora mais profunda, para uma amostra de 814 poços, na subprovíncia Escudo Oriental Nordeste, nos Estados da Paraíba e Rio Grande do Norte	33
2.7a	Distribuição do coeficiente de carga dinâmica na fenda produtora mais profunda, em amostra de 814 poços, na subprovíncia Escudo Oriental Nordeste, nos Estados da Paraíba e Rio Grande do Norte.....	34
2.7b	Distribuição da carga dinâmica, na fenda produtora mais profunda, para amostra de 814 poços, na subprovíncia Escudo Oriental Nordeste, nos Estados da Paraíba e Rio Grande do Norte.....	35
2.8	Gráfico ilustrativo da falta de correlação entre o nível dinâmico e a profundidade da fenda produtora mais profunda, em amostra de 814 poços, na subprovíncia Escudo Oriental Nordeste, nos Estados da Paraíba e Rio Grande do Norte.....	36

2.9a	Histograma de frequência de vazão bombeada, baseado em amostra de 814 poços, na subprovíncia Escudo Oriental Nordeste, nos Estados da Paraíba e Rio Grande do Norte.....	37
2.9b	Histograma de frequência de resíduo seco das águas subterrâneas, baseado em amostra de 814 poços, na subprovíncia Escudo Oriental Nordeste, nos Estados da Paraíba e Rio Grande do Norte.....	37
2.10	Produtividade de aquífero, baseada em amostra de 814 poços, na subprovíncia Escudo Oriental Nordeste, nos Estados da Paraíba e Rio Grande do Norte.....	38
2.11a	Histograma de frequência de profundidade de poços, baseado em amostra de 85 poços, na subprovíncia Escudo Oriental Sudeste, no Estado de São Paulo.....	42
2.11b	Histograma de frequência de espessura do manto eluvial, baseado em amostra de 75 poços, na subprovíncia Escudo Oriental Sudeste, no Estado de São Paulo.....	43
2.12a	Histograma de frequência da profundidade do nível estático, baseado em amostra de 85 poços, na subprovíncia Escudo Oriental Sudeste, no Estado de São Paulo.....	44
2.12b	Variação do coeficiente de carga estática no manto eluvial, para uma amostra de 85 poços, na subprovíncia Escudo Oriental Sudeste, no Estado de São Paulo.....	44
2.13a	Histograma de frequência de profundidade do nível dinâmico, baseado em amostra de 85 poços, na subprovíncia Escudo Oriental Sudeste, no Estado de São Paulo.....	45
2.13b	Histograma de frequência de profundidade da fenda produtora mais profunda, para uma amostra de 75 poços, na subprovíncia Escudo Oriental Sudeste, no Estado de São Paulo.....	45
2.14	Variação do coeficiente de carga dinâmica na fenda produtora mais profunda, para uma amostra de 75 poços, na subprovíncia Escudo Oriental Sudeste, no Estado de São Paulo.....	46
2.15	Histograma de frequência de vazões, baseado em amostra de 85 poços, na subprovíncia Escudo Oriental Sudeste, no Estado de São Paulo.....	46
2.16	Produtividade de aquífero, baseada em amostra de 85 poços, na subprovíncia Escudo Oriental Sudeste, no Estado de São Paulo.....	47
2.17	Histograma de frequência da profundidade de poços, baseada em amostra de 197 poços, na subprovíncia Serra Geral, no Estado do Paraná.....	48
2.18	Histograma de frequência do diâmetro de 197 poços, perfurados na subprovíncia Serra Geral, no Estado do Paraná.....	49

2.19	Histograma de frequência da profundidade da fenda produtora mais profunda, baseado em amostra de 187 poços, na subprovíncia Serra Geral, no Estado do Paraná.....	49
2.20	Histograma de frequência de vazões, baseado em amostra de 198 poços, na subprovíncia Serra Geral, no Estado do Paraná.....	50
2.21	Produtividade de aquífero, baseada em amostra de 198 poços, na subprovíncia Serra Geral, no Estado do Paraná.....	50
2.22	Capacidade específica de poços perfurados na subprovíncia Escudo Oriental Sudeste, nos Estados da Paraíba e Rio Grande do Norte.....	55
2.23	Lei de potência (característica da capacidade específica fractal) ajustada aos dados de 34 poços de vazão constante e igual a 3 m ³ /h, na subprovíncia Escudo Oriental Nordeste, nos Estados da Paraíba e Rio Grande do Norte.....	57
2.24	Possíveis domínios de investigação 2D de rochas fraturadas. A geometria do domínio 3D, do aquífero fissural é suposta desconhecida.....	59
2.25	Histograma de frequência de permeabilidade de rochas fissuradas, para uma amostra de 380 valores, na localidade de Torpa, Suécia (Broch & Kjørholt, 1994)	68
2.26	Histograma de frequência da porcentagem de fluxo total medido em 92 testes de feitos em fraturas na área de Kamlunge - Suécia (Tsang et al.1989).....	70
2.27	Histograma de frequência dos valores de condutividade hidráulica, determinados em 92 testes, na área de Kamlunge - Suécia (Tsang et al. 1989).....	70
3.1	Unidade bloco-fissura e a solução de Boulton (1963).....	82
3.2	Idealização de uma formação rochosa fissurada segundo Boulton & Streltsova (1977).....	85
3.3	Elemento ideal bloco-fissura, de uma formação fissurada com fluxo vertical no bloco (Boulton & Streltsova, 1977).....	86
3.4	Elemento bloco-fissura de uma formação fraturada, com fluxo horizontal e vertical no bloco (Boulton & Streltsova, 1977).....	88
4.1	Domínio considerado para o jogo do caos, com os três pontos marcados	94
4.2	Primeiros seis passos do jogo do caos	95
4.3	Jogo do caos: a) após 100 iterações; b) após 500 iterações; c) após 1000 iterações; d) após 10.000 iterações.....	96
4.4	Esquema básico de uma máquina de processamento iterativo.....	97
4.5	Ilustração de um processo iterativo de redução de uma imagem em uma MSCR.....	98

4.6	Geração de um triângulo de Sierpinsky, partindo de uma imagem qualquer	99
4.7	Representação esquemática do processamento iterativo da equação linear $y = x^2 + c$	100
4.8	Ilustração do processo iterativo de convergência da equação logística (4.5), para uma solução estável no ponto $x = 1/3$, sob condições iniciais $a=0.8$, $x_0=0,4$	106
4.9	Ilustração do processo iterativo de convergência da equação logística (4.5), para uma solução estável no ponto $x = 0$, sob condições iniciais $a=1.5$, $x_0=0,1$	106
4.10	Ilustração do processo iterativo de convergência da equação logística (4.5), para uma solução estável no ponto $x = 0.622642$, sob condições iniciais $a=2.65$, $x_0=0,1$	107
4.11	Ilustração do processo iterativo de convergência da equação logística (4.5), para uma solução estável no ponto $x = 0.636364$, sob condições iniciais $a=2.75$, $x_0=0,4$	107
4.12	Ilustração do processo iterativo de convergência da equação logística (4.5), para um ciclo estável de dois pontos: $x=0.533494$ e $x_0=0.783966$, sob condições iniciais $a=3.15$, $x_0=0,1$	108
4.13	Ilustração do processo iterativo de divergência, instabilidade ou comportamento caótico da equação logística (4.5), para 25 iterações, sob condições iniciais $a = 4.0$, $x_0=0.1$	108
4.14	Ilustração do processo iterativo de divergência, instabilidade ou comportamento caótico da equação logística (4.5), para 50 iterações, sob condições iniciais $a = 4.0$, $x_0=0.1$	109
4.15	Ilustração do processo iterativo de divergência, instabilidade ou comportamento caótico da equação logística (4.5), para 100 iterações, sob condições iniciais $a = 4.0$, $x_0=0.1$	109
4.16	Ilustração do processo de geração do conjunto de Cantor, onde se observa o número, o tamanho e a escala (invariante) dos fragmentos ou pedaços auto-similares, gerados a cada iteração	110
4.17	Ilustração do processo de geração da curva de Koch, onde se observa o número, o tamanho e a escala (invariante) dos fragmentos ou pedaços auto-similares, gerados a cada iteração	111
4.18	Ilustração do processo de geração da ilha de Koch ou curva triádica (base 3) de Koch	114
4.19	Dimensão, calculada a partir do número de pedaços e fator de redução (escala), de quatro objetos auto-similares: segmento de reta, quadrado, cubo e curva de Koch	117

4.20	Quatro estágios do processo de cobertura de um objeto, por caixas, com um fator de redução de tamanho (escala) igual a $\frac{1}{2}$	120
4.21	Dimensão de contagem de caixas, de um objeto fractal irregular no plano...	121
5.1	Espessura saturada inicial de um condutor hidráulico em aquífero fraturado	124
5.2a	Curvas-padrão de Boulton (1963) em coordenadas mono-log para a função do rebaixamento em um poço em meio fraturado para $\eta = 10$	133
5.2b	Curvas-padrão de Boulton (1963) em coordenadas mono-log para a função do rebaixamento em um poço em meio fraturado para $\eta = 100$	133
5.2c	Curvas-padrão de Boulton (1963) em coordenadas mono-log para a função do rebaixamento em um poço em meio fraturado para $\eta = 1000$	133
5.3	Curvas de rebaixamento e recuperação de teste de produção em metacalcário na subprovincia Coberturas Carbonáticas São Francisco (52), superpostas às curvas da função de Boulton (1963)	136
5.4	Curvas de rebaixamento e recuperação de teste de produção em quartzito, na subprovincia Coberturas Clásticas São Francisco (51) superpostas às curvas padrão da função de Boulton (1963).....	137
5.5	Curvas de rebaixamento e recuperação de teste de produção em gnaiss, na subprovincia Escudo Oriental Nordeste (61), superpostas às curvas da função de Boulton (1963).....	137
II -1	Produtividade de aquífero (capacidade específica de 6 horas) em 72 poços perfurados em meio fissural em diferentes litologias e diferentes subprovincias hidrogeológicas.....	141
6.1	Dimensão fractal de fluxo avaliada em testes de bombeamento na subprovincia Escudo Oriental Nordeste, no Estado do Ceará, em testes feitos com bomba submersa.....	150
6.2	Teste de bombeamento em 3 etapas, com bomba submersa. a) Vazão decrescente com o tempo; b) magnitude Q^* e dimensão D do fluxo fractal uniforme equivalente ao fluxo variável.....	152
6.3	Variações da vazão bombeada determinantes da dimensão do fluxo fractal uniforme. a) vazão crescente passando a uniforme; b) vazão oscilante, com tendência crescente, depois decrescente.....	153
6.4	Dimensão fractal do fluxo avaliada em testes de bombeamento na subprovincia Escudo Oriental Nordeste, no Estado do Rio Grande do Norte, em testes feitos com compressor.....	156
6.5	Dimensão fractal do fluxo avaliada em testes de produção realizados com compressor, em 20 poços na subprovincia Escudo Oriental Nordeste, no Estado da Paraíba.....	159
6.6	Dimensão fractal do fluxo avaliada em testes de produção realizados com	

	compressor, em 7 poços na subprovíncia Escudo Oriental Nordeste, no Estado da Paraíba.....	161
6.7	Teste realizado com rebaixamento constante , em pegmatito, na subprovíncia Escudo Oriental Nordeste no Estado da Bahia e sob condição de fluxo variável de dimensão não fractal.....	162
6.8	Capacidade específica linear, não fractal, dependente apenas da vazão bombeada, em teste com rebaixamento constante na subprovíncia Escudo Oriental Nordeste no Estado da Bahia.....	162
7.1	Dimensão fractal do fluxo avaliada em testes de produção na subprovíncia Coberturas Clásticas São Francisco no Estado da Bahia.....	164
7.2	Gráfico monolog de rebaixamento x tempo, com a transmissividade calculada pela tangente à curva no trecho inicial, em poço na subprovíncia Coberturas Clásticas São Francisco(51).....	165
7.3	Dimensão fractal do fluxo avaliada em 9 testes de produção na subprovíncia Coberturas Carbonáticas São Francisco (52) no Estado da Bahia.....	166
8.1	Dimensão do fluxo fractal uniforme em 3 (três) testes de produção realizados com compressor em basaltos na Ilha de Fernando de Noronha - PE.....	169
8.2	Dimensão do fluxo fractal em 6 (seis) testes de produção realizados com bomba submersa em gnaisses na Ilha de Roatán - República de Honduras.	171
8.3	Teste escalonado em três patamares crescentes de vazão constante numa mesma etapa de bombeamento, no poço 99990005 (Spanish Bay) Ilha de Roatán - República de Honduras.....	172
8.4	Capacidade específica versus rebaixamento obedecendo a uma lei de potência (equação 5.5) e evoluindo (no gráfico dilog) segundo retas paralelas de declividade -1.....	173

Lista de tabelas

1.1	Número de poços perfurados na Província Escudo Oriental	2
1.2	Estrutura do arquivo de dados dos testes de bombeamento em planilha Lotus.....	7
2.1	Parâmetros estatísticos de algumas características de 33 poços,perfurados na subprovíncia Coberturas Carbonáticas São Francisco, no Estado da Bahia.....	25
2.2	Classificação de produtividade de aquífero no Brasil (Mente & Mont'Alverne, 1982).....	28
2.3	Parâmetros estatísticos de algumas características de 814 poços,perfurados na subprovíncia Escudo Oriental Nordeste, nos Estados da Paraíba e Rio Grande do Norte.....	30
2.4	Parâmetros estatísticos de algumas características de 85 poços, perfurados na subprovíncia Escudo Oriental Sudeste, no Estado de São Paulo.....	42
2.5	Parâmetros estatísticos de algumas características de 198 poços, perfurados na subprovíncia Serra Geral, no Estado do Paraná.....	48
2.6	Capacidade específica de 34 poços na subprovíncia Escudo Oriental Nordeste, para vazão constante de 3 m ³ /h, nos Estados da Paraíba e Rio Grande do Norte.....	56
2.7	Propriedades hidráulicas de rochas reservatório em campos de petróleo e gás em diversas partes do mundo (Streltsova-Adams, 1978).....	66
2.8	Frequência de permeabilidade de fraturas em Torpa - Suécia (Broch & Kjørholt, 1994).....	66
2.9	Frequência de condutividade hidráulica e de porcentagem de fluxo na área de Kamlunge - Suécia (Tsang et al. 1989).....	69
4.1	Convergência do iterador quadrático com $c = -1$ e $x_0 = 0,5$	101
4.2	Estabilidade do iterador quadrático com $c = -2$ e $x_0 = 2$	102
4.3	Instabilidade do iterador quadrático com $c = -2$ e $x_0 = 1,99$	102
4.4	Duas implementações da equação logística, levando a resultados diferentes, para as mesmas condições iniciais.....	104
4.5	Equações explícitas das transformações de montagem da curva de Koch...	112
6.1	Condições iniciais e fluxo fractal uniforme dos testes de produção realizados em 10 (dez) poços na subprovíncia Escudo Oriental Nordeste, no Estado do Ceará.....	151
6.2	Parâmetros físicos dos condutores hidráulicos testados em 10 (dez) poços na subprovíncia Escudo Oriental Nordeste - Estado do Ceará.....	154

6.3	Condições iniciais e fluxo fractal uniforme dos testes de produção realizados em 13 (treze) poços na subprovincia Escudo Oriental Nordeste, no Estado do Rio Grande do Norte.....	155
6.4	Parâmetros físicos dos condutores hidráulicos testados em 13 (treze) poços na subprovincia Escudo Oriental Nordeste, no Estado do Rio Grande do Norte.....	157
6.5	Condições iniciais e fluxo fractal uniforme dos testes de produção realizados em 20 (vinte) poços na subprovincia Escudo Oriental Nordeste, no Estado da Paraíba.....	158
6.6	Parâmetros físicos dos condutores hidráulicos testados em 20 poços, na subprovincia Escudo Oriental Nordeste, no Estado da Paraíba.....	160
6.7	Condições iniciais dos testes realizados em 8 (oito) poços na subprovincia Escudo Oriental Nordeste (61), no Estado da Bahia, sendo 7 (sete) com fluxo fractal uniforme equivalente e 1 (um) com fluxo não uniforme e não fractal.....	163
6.8	Parâmetros físicos dos condutores hidráulicos testados em 7 (sete) poços com fluxo fractal uniforme equivalente, na subprovincia Escudo Oriental Nordeste (61) no Estado da Bahia.....	163
7.1	Condições iniciais e fluxo fractal uniforme dos testes de produção realizados em 3 (três) poços na subprovincia Coberturas Clásticas São Francisco (51) no Estado da Bahia.....	164
7.2	Parâmetros físicos dos condutores hidráulicos testados em 3 (três) poços na subprovincia Coberturas Clásticas São Francisco (51), no Estado da Bahia.....	165
7.3	Condições iniciais e fluxo fractal uniforme dos testes de produção realizados em 9 (nove) poços na subprovincia Coberturas Carbonáticas (52) São Francisco no Estado da Bahia.....	167
7.4	Parâmetros físicos dos condutores hidráulicos testados em 9 (nove) poços na subprovincia Coberturas Carbonáticas São Francisco (52) no Estado da Bahia.....	168
8.1	Condições iniciais e fluxo fractal uniforme dos testes de produção realizados em 3 (três) poços na Ilha de Fernando de Noronha - Estadode Pernambuco.....	170
8.2	Parâmetros físicos dos condutores hidráulicos testados em 3 (três) poços na Ilha de Fernando de Noronha - Estado de Pernambuco.....	170
8.3	Magnitude do fluxo, dimensão fractal e parâmetros estatísticos indicativos da qualidade do ajuste da capacidade específica fractal à capacidade específica observada no teste do poço 99990005 - Spanish Bay - Ilha de	

	Roatán - Honduras.....	173
8.4	Condições iniciais e fluxo fractal uniforme dos testes de produção realizados em 6 (seis) poços na Ilha de Roatán - República de Honduras...	174
8.5	Parâmetros físicos dos condutores hidráulicos testados em 6 (seis) poços na Ilha de Roatán - República de Honduras.....	174

Lista de quadros

2.1	Caracterização geotectônica e litológica da Província Hidrogeológica São Francisco.....	24
2.2	Caracterização geotectônica e litológica da Província Hidrogeológica Escudo Oriental Nordeste.....	29
II - 1	Distribuição dos poços e dos testes de bombeamento nos quais foi aplicado o método da capacidade específica fractal.....	139

RESUMO

O método da capacidade específica fractal foi desenvolvido pelo autor para análise de testes de produção realizados com vazão variável. Isto porque, em geral, os dados de bombeamento de poços perfurados em meio fissural e/ou cárstico, que são tipicamente heterogêneos, costumam apresentar, entre outras coisas, variações na vazão bombeada. Essas variações afetam as curvas de rebaixamento e recuperação com o tempo, complicando a interpretação dos testes pelos métodos convencionais, todos eles, como se sabe, desenvolvidos para vazão constante.

Admite-se que a evolução da capacidade específica do poço, observada nas condições de campo, $y(Q_t, s_t) = Q_t / s_t$, (com o rebaixamento), pode ser aproximada por uma lei de potência do tipo $y(Q_t, s_t) \cong y^* = Q^* / s_t^D$, onde Q^* é a descarga fractal uniforme e D a dimensão do fluxo fractal para o poço. Os conceitos de dimensão de fluxo e de fluxo fractal uniforme equivalente, introduzidos no presente trabalho, são fundamentais na avaliação dos parâmetros do meio fissural e podem ser considerados como a principal contribuição da tese para a hidráulica de poços em meio fissural.

Somente as propriedades hidráulicas de transmissão (*transmissividade, abertura média das fraturas, condutividade hidráulica, permeabilidade*) e de armazenamento (*porosidade*) do condutor hidráulico representado pelo conjunto *poço-fendas-blocos associados*, podem ser calculadas, já que o modelo se aplica apenas no poço bombeado. Parâmetros de resposta elástica e de difusão (*coeficiente de armazenamento, difusividade*), bem como de filtração vertical, do manto de cobertura indiferenciada para as fendas subjacentes, somente podem ser identificados por um modelo que também estude o fluxo fora do poço, isto é, no plano (r, z) . No caso, o modelo escolhido como mais apropriado para isso foi o de Boulton & Streltsova (1977), com o qual todos os parâmetros do meio fissural podem ser identificados, mediante substituição do rebaixamento específico s/Q , pelo inverso da capacidade específica fractal $1/y^*$.

O modelo foi aplicado na interpretação de 86 etapas de rebaixamento e 75 medições de recuperação, correspondentes a 86 testes de produção realizados em 72 poços, distribuídos por diversas subprovíncias hidrogeológicas brasileiras e nas Ilhas Oceânicas de Fernando de Noronha - Pernambuco e Roatán, na República de Honduras. Essas aplicações forneceram as primeiras estimativas de propriedades hidráulicas obtidas pelo autor, em meio fraturado e cárstico. As ordens de grandeza das aberturas de fissuras são compatíveis com resultados de estudos recentes, desenvolvidos na Alemanha em zona de falhas de alta permeabilidade (Himmelsbach et al., 1994). As porosidades estimadas são compatíveis com resultados considerados típicos para fraturas em poços de 60 m (Snow 1968).

ABSTRACT

The fractal specific capacity approach has been developed by the author for analysing single well production test data under variable discharge rate conditions. Pumping test data from wells drilled in a typical heterogeneous fractured and/or karstic medium usually present, among other things, discharge rate variations. Such variations affect time drawdown and time recovery curves thus complicating the well test analysis by conventional methods, which are only valid for constant discharge conditions. The observed well specific capacity, under field conditions, $y(Q_t, s_t) = Q_t / s_t$, (with drawdown), may be approximated by a power law of the type $y(Q_t, s_t) \cong y^* = Q^* / s_t^D$, where Q^* is a uniforme fractal discharge and D a fractal flow dimention. The flow dimension and equivalent uniform fractal flow concepts, , are basic tools for fractured media parameter evaluation and in that respect they are supposed to be the dissertation's main contribution to well hydraulics in fissured rocks.

Parameter identification through the proposed method is only provided in the pumped well for hydraulic transmissive parameters (*fracture transmissivity and fracture aperture, hydraulic conductivity and permeability*) and storage parameters (*porosity*) for the hydraulic conductor, namely for the well-block-fracture system. Physical properties for diffusion and elastic response (*diffusivity and storavity coefficients*) as well as for delayed yield from the weathered zone to the lower fractured rock domain may only be evaluated by using a flow model in the (r,z) plane. This can be done through Boulton and Streltsova (1977) block-fracture model, by replacing the specific drawdown s/Q , for the inverse of the fractal specific capacity, $1/y^*$.

The model has been applied for analysing 86 drawdown curves and 75 recovery curves from pumping tests performed in 72 wells distributed over several groundwater brasilian subprovinces and in two oceanic islands, namely Fernando de Noronha in Pernambuco and Roatán in Honduras. Preliminary estimations of hydraulic properties were obtainde by the author in karstic and fissured media. The order of magnitude for fracture apertures is in agreement with recent studies carried out in Germany in a highly permeable fault zone (Himmelsbach et al., 1994). The order of magnitude for porosity estimates are also in agreement with tipical results for fractures in 60 m deep wells, which are on the order of 0,0050% (Snow, 1968).

1. INTRODUÇÃO

1.1 - OBJETIVOS

São dois, os objetivos da tese ora apresentada:

O primeiro, é desenvolver um método de análise de testes de bombeamento, realizados sob condições de fluxo não uniforme, em poços perfurados em rochas fraturadas, que permita identificar as propriedades hidráulicas do meio aquífero cristalino fissural.

O segundo, é resgatar a confiança na possibilidade de análise de muitos dados de bombeamento de poços em meio fissural, hoje qualificados como de "testes mal conduzidos" e/ou com observações "não confiáveis". Aí se incluem os testes realizados, em aquíferos heterogêneos (fissurais e cársticos), com bomba pistão, de vazão muito variável, e os testes realizados com compressor, mesmo em condições pouco recomendáveis de vazão inicial muito forte.

O autor espera que o método proposto, pela sua simplicidade de execução (uma única etapa) e facilidade de interpretação, venha de fato a ser adotado pela comunidade técnico-científica envolvida com problemas de avaliação de parâmetros hidráulicos de meio aquífero fissural, e que possa representar uma contribuição à hidráulica de poços em meios fraturados. Sentir-se-á, por conseguinte, plenamente recompensado se isto acontecer.

1.2 - DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

A nível global, a ênfase dada nos últimos anos às pesquisas sobre hidráulica de poços em rochas cristalinas, tem sido justificada para avaliar a possibilidade de utilização de reservatórios subterrâneos fraturados como locais de armazenamento de resíduos perigosos para o meio ambiente, principalmente os de natureza radioativa.

Já nas regiões áridas ou semi-áridas do planeta, como por exemplo no Nordeste do Brasil, outras razões justificam o interesse das pesquisas nesse campo. Segundo estimativas feitas há 10 anos por Costa (1986), existiam naquela época, cerca de 50.000 poços perfurados no que denominou de *aquífero fissural* da região nordestina. Tipicamente esses poços apresentam diâmetro entre 5 a 6 polegadas e profundidades de 50 a 60 m.

De um levantamento mais recente (Costa, 1994), obtém-se um total de 20.610 poços perfurados no cristalino do Nordeste (Província do Escudo Oriental), dos quais 17.810 seriam aproveitáveis, conforme se indica na tabela 1.1.

Tabela 1.1 - Número de poços perfurados na Província Escudo Oriental - região cristalina

Subprovíncia	Código	UF	Número de poços	Secos	Abandonados	Aproveitáveis
Nordeste	61	CE	2800		1200	2800
		RN	1000			1000
		PB	4660	980		2480
		PE	1300	270		1030
		AL	500			500
		SE	1120	350		770
		BA	1630			1630
Sudeste	62	BA	7600			7600
TOTAIS			20610	1600	1200	17810

Segundo Costa (1994 op.cit), as informações relativas a esse levantamento do número de poços, são precárias; sobretudo pela falta de cadastros completos nas instituições públicas e, ao que parece, pela completa falta de cadastros nas empresas privadas que atuam na perfuração de poços.

A qualidade da água, com exceção dos poços localizados em zonas de microclimas, é quase sempre restritiva para consumo humano, mas se presta muito bem, em mais de 95% dos casos, para o consumo animal.

A rigor a importância da água subterrânea das rochas cristalinas pode variar muito de um lugar para outro. Ela depende principalmente da existência ou não de outras fontes alternativas de suprimento hídrico e da magnitude dessas fontes em relação à demanda.

Em muitas regiões semi-áridas do mundo o poço perfurado em rochas cristalinas se constitui às vezes, na única fonte de suprimento hídrico disponível e nessa condição assume importância decisiva para a sobrevivência dos rebanhos nos períodos de estiagens prolongadas. Por isso a sua capacidade de produção precisa ser criteriosamente avaliada, em primeiro lugar, para se conhecer a efetiva disponibilidade de água em regime de exploração e, em segundo, para que os equipamentos de bombeamento sejam dimensionados e instalados de acordo com essa capacidade levando em conta sobretudo a profundidade da *fenda produtora mais profunda*. Além de reduzir os custos de instalação e de operação dos poços, isso deverá contribuir, no caso dos cataventos, que são os equipamentos de bombeamento mais comumente instalados, para uma redução do alto índice de quebra e abandono de poços que se verifica no Nordeste do Brasil (Manoel Filho, 1995).

Em regiões úmidas e temperadas por exemplo, que se caracterizam por uma relativa abundância de água, quase sempre se dispensou o uso da água subterrânea das rochas cristalinas. Nos últimos 20 anos porém, ocorreram grandes progressos na hidrogeologia do cristalino de regiões temperadas. Isso por conta do crescimento da demanda em muitas áreas e devido ao aprimoramento da tecnologia de perfuração, que tornou bastante fácil e pouco onerosa a construção de poços de pequeno diâmetro para captação de água em rochas cristalinas (Karrenberg 1981, Krásný 1990, in Gustafson e Krásný 1994), isto principalmente para pequenos abastecimentos a nível individual.

No Brasil, foi somente a partir da década de 60 que a execução de testes de produção em poços perfurados em rochas fraturadas, passou a ser conduzida obedecendo a uma metodologia universal. Particularmente no Nordeste do Brasil, num período de 25 anos, decorrido entre 1960 e 1985, inúmeros programas de perfuração intensiva de poços em rochas fraturadas, resultaram na construção de milhares de unidades. Esse trabalho foi realizado principalmente pela SUDENE, através da CONESP, Companhia Nordestina de Sondagens e Perfurações, e pelos Governos

Estaduais, através das suas respectivas Companhias de Perfuração de Poços, notadamente CERB (Companhia de Engenharia Rural da Bahia), na Bahia; CISAGRO (Companhia Integrada de Serviços Agro-Pecuários) em Pernambuco; SOEC (Secretaria de Obras do Estado do Ceará) hoje SOHIDRA, no Ceará; CASOL (Companhia de Águas e Solos), depois CDM (Companhia de Desenvolvimento Mineral), no Rio Grande do Norte e CDRM (Companhia de Desenvolvimento de Recursos Minerais), na Paraíba. Nos últimos 10 anos, por conta das dificuldades econômicas que afetaram o país, o ritmo dos programas de perfuração de poços na região semi-árida nordestina sofreu uma certa desaceleração. Em nenhum momento, porém, chegou a sofrer uma completa solução de continuidade e muitos poços foram e ainda continuam sendo perfurados no cristalino.

A descontinuidade do trabalho da SUDENE e dos órgãos estaduais ligados ao desenvolvimento das águas subterrâneas é responsável pela precariedade de conhecimentos que ainda caracteriza a hidrogeologia do cristalino no Nordeste do Brasil. A falta de uma instituição estruturada para estabelecer e difundir, junto aos órgãos que atuam na perfuração de poços, normas e procedimentos técnicos uniformes de execução de testes, de coleta e arquivamento de dados de bombeamento, em caráter permanente, é uma consequência da falta de prioridade dos governos com o setor hídrico regional. Prova disso é que, até hoje, ainda não existem políticas claras de desenvolvimento e de gerenciamento de águas subterrâneas no Nordeste, embora ninguém ignore que os insumos necessários para isso sejam os estudos hidrogeológicos e as informações de boa qualidade sobre os recursos hídricos regionais. Nos últimos anos todavia, com os Planos Estaduais de Recursos Hídricos que estão sendo concebidos e implantados em diversos Estados da Federação, renascem mais uma vez as esperanças de novos progressos na hidrogeologia do cristalino, tanto em termos de métodos exploratórios como em termos de métodos de exploração e de gerenciamento das águas subterrâneas.

1.3 - METODOLOGIA

Os métodos e procedimentos adotados envolveram as seguintes etapas:

1.3.1 - Planejamento e execução de testes de bombeamento

A fase inicial da pesquisa teve lugar no período de março a outubro de 1992, quando foram realizados os trabalhos de campo. Esses trabalhos se fizeram no âmbito de estudos hidrogeológicos orientados para o abastecimento d'água de três pequenas comunidades (Jordão, Palestina e Sto. Antonio dos Camilos), localizadas na Serra da Meruoca, município de Sobral - CE, a partir de água subterrânea de poços perfurados no granito Meruoca. Nessa fase, os estudos, desenvolvidos com a supervisão do autor, envolveram fotogeologia, prospecção geofísica por eletro-resistividade, locação de poços e finalmente planejamento e execução de testes de bombeamento.

Uma das preocupações centrais no planejamento dos testes foi a de realizá-los com vazão constante. Isto porque os dados de bombeamento de poços do cristalino, encontrados nos arquivos das companhias perfuradoras no nordeste do Brasil, revelam, na sua maior parte, que as vazões bombeadas não são constantes, mas chegam a apresentar, numa mesma etapa de teste, diferenças muito grandes entre a descarga inicial e a final do bombeamento. Essas diferenças, como acreditam muitos hidrogeólogos experientes nesse tipo de trabalho, se explicam pelo fato dos bombeamentos serem feitos usando compressor.

Como os testes foram planejados em três etapas independentes de bombeamento a serem feitas com vazão constante, e diferente em cada uma das etapas¹, decidiu-se utilizar bomba submersa em substituição ao compressor.

Na prática, malgrado os esforços desenvolvidos no sentido de controlar a uniformidade do fluxo, não houve condição de manter a vazão constante como se desejava. Para garantir a maior precisão possível nas medições, foram instalados hidrômetros através dos quais foram feitas as leituras de descarga bombeada.

Em 8 (oito) poços perfurados no granito Meruoca, foram executados 5 (cinco) testes em três etapas e 3 (tres) testes em duas etapas de bombeamento. Esses testes foram fundamentais para mostrar as influências da variabilidade da vazão no comportamento do rebaixamento.

¹Para definir as perdas laminares e singulares dos poços e avaliar a evolução do rebaixamento em função da descarga.

1.3.2. - Utilização de dados de testes executados por terceiros

Os testes realizados no âmbito do trabalho, em número de apenas 8 (oito), ficaram restritos ao granito Meruoca. Para avaliar a aplicabilidade do método proposto, na análise de testes conduzidos em outros tipos de rochas cristalinas, foram coletados dados de testes realizados por empresas perfuradoras: i) do Rio Grande do Norte (13 testes) e Paraíba (20 testes), em granitos, gnaisses, migmatitos, micaxistos e filitos; ii) de Pernambuco (3 testes) em basalto na Ilha de Fernando de Noronha; iii) da Bahia (9 testes) em pegmatitos, quartzitos e calcários cristalinos; iv) da Ilha de Roatán, em Honduras (7 testes) em micaxistos e gnaisses.

1.3.3.- Organização dos dados dos testes

Os dados dos testes realizados foram arquivados em planilha eletrônica, LOTUS123(5.0), com um registro por etapa, e cada registro contendo as informações sumarizadas na tabela 1.2.

Codificação dos dados

Na **regionalização de informações** sobre recursos hídricos subterrâneos, é importante adotar procedimentos que possam contribuir para a identificação de unidades hidrogeológicas. Essa distinção, tanto quanto possível, deve se fazer através de critérios objetivos e uniformes, ou seja, critérios de avaliação de: i) *quantidade* (por ex., *potencialidade* em m^3/km^2 .ano e/ou *produtividade* de aquífero, em termos de capacidade específica temporal de poços); ii) *qualidade* (por exemplo, concentrações de elementos químicos constituintes maiores da água).

Em geral, a delimitação de unidades hidrogeológicas é determinada, subjetivamente, por fatores ambientais (fisiográficos, geológicos, climáticos, etc), mas quase nunca se sabe qual é o grau de influência relativa de cada um desses fatores na magnitude dos recursos disponíveis. Em outras palavras, a identificação de *variáveis hidrogeológicas principais*, determinantes da recarga e do escoamento subterrâneo das águas, não é tão simples quanto parece. Ela exige um trabalho sistemático de monitoramento, análise e interpretação de informações, particularmente no domínio das rochas cristalinas.

Dados de monitoramentos sistemáticos no cristalino, inexistem no Brasil e são raros, mesmo em nações desenvolvidas, como a Suécia, por exemplo, que talvez seja um dos países onde mais se conhece hidrogeologia do cristalino. Mesmo assim, Olofsson (1994), reportando-se a trabalhos de muitos estudiosos do assunto, na Suécia, assevera que o conhecimento dos processos hidráulicos e dos vários fatores geológicos e

topográficos, que controlam o fluxo de água do solo para o subsolo, é insatisfatório. Conclui-se então que, no cristalino, o número de fatores influentes nas condições hidráulicas pode ser muito grande, resultando numa variabilidade que deve ser estudada estatisticamente.

Tabela 1.2 - Estrutura do arquivo de dados dos testes de bombeamento em planilha Lotus

COLUNA	DADOS
A	Código do poço testado
B	Aquífero
C	Formação ou Grupo
D	Nome do poço
E	Local
F-G	Município, Estado
H	Entidade
I-K	Latitude, Longitude, Altitude
L	Data de início
M	Data de conclusão
N	Firma executora
O	Equipamento
P	Duração do teste (horas)
Q	Profundidade do poço (m)
R	Diâmetro (m)
S	Profundidade do crivo da bomba (m)
T	Profundidade do nível estático (m)
U-Y	Profundidade das entradas de água (até 5) (m)
Z	Número ou código da entidade
AA-BZ	Tempo (minutos) - 52 colunas
CA-DZ	Rebaixamento (m) - 52 colunas
EA-FZ	Vazão bombeada (m ³ /h) - 52 colunas
GA	Código do poço de observação
GB-GD	Latitude, Longitude, Altitude
GE	Profundidade
GF	Nível estático (m)
GG	Distância ao poço bombeado (m)
GH	Vazão fractal uniforme [$L^{D+2}T^{-1}$]
GI-HO	Tempo (minutos) - 33 colunas
HP-IV	Rebaixamento (m) - 33 colunas

Essas considerações apontam para a conveniência de se adotarem procedimentos que, se forem aplicados de maneira sistemática, possam facilitar, no futuro, a identificação de unidades hidrogeológicas e seus principais fatores influentes (variáveis principais). É o caso, por exemplo, de procurar associar as propriedades hidráulicas

avaliadas em meio fissural, ou a produtividade dos condutores hidráulicos testados, com outros fatores ambientais.

Sistema georeferencial

As subdivisões do território Nacional em Regiões Hidrográficas e em Províncias Hidrogeológicas, podem ser consideradas como unidades representativas de verdadeiros "reservatórios aquíferos regionais", superficiais e subterrâneos, que podem refletir, em um dado momento, o nível de conhecimento dos recursos hídricos do país. Por isso, julga-se conveniente, e procura-se aqui adotar, para os dados de testes de bombeamento, uma codificação que leve em conta essas subdivisões.

Conforme mostra a figura 1.1, o sistema georeferencial definido pelo DNAEE/DCRH², divide o território nacional em 8 (oito) bacias ou regiões hidrográficas e cada uma delas subdividida em 10 (dez) sub-bacias. Por extensão, a denominação de bacia 9 é atribuída à área de drenagem de qualquer bacia hidrográfica da América do Sul que não interfira na rede potamográfica brasileira.

Quanto às províncias hidrogeológicas, já foram feitas proposições neste sentido por alguns autores. Hausman (1963), por exemplo, talvez como pioneiro no Brasil, apresentou um mapa de Províncias Hidrogeológicas do Rio Grande do Sul. Posteriormente, Brito Neves & Manoel Filho (1972), dando seqüência a idéias de Meinzer (1923), nos Estados Unidos, aperfeiçoadas por Thomas (1952), propõem para a Bahia, a título experimental, 7 (sete) províncias hidrogeológicas, admitindo, em essência, como fatores ambientais influentes: fisiografia, geologia, qualidade físico-química das águas, e estágio de conhecimento.

A primeira divisão do Brasil em províncias hidrogeológicas, foi proposta por Pessoa et al. (1980), no Mapa Hidrogeológico do Brasil, na escala 1: 2.500.000, no qual apresentam uma divisão do país em 10 (dez) províncias e 15 (quinze) subprovíncias (figura 1.2). Admitem como fatores influentes, ou determinantes, combinações de tectônica, morfologia, fisiografia e litologia. Ressaltam porém o caráter dinâmico dessa subdivisão e afirmam que uma certa província pode "ser subdividida, quando surgirem novas informações técnicas indicadoras".

²Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica - Divisão de Controle de Recursos Hídricos.

Fig. 1.1 - Divisão do território Nacional em Bacias Hidrográficas - modificado de DNAEE - DCRH (1981)

Fig. 1.2 -Divisão do Território Nacional em Províncias Hidrogeológicas (modificado de Pessoa et al. 1980)

Por fim, Mente & Mont'Alverne (1982), como contribuição ao Mapa Hidrogeológico da América do Sul, adaptaram o trabalho de Pessoa et al. (op.cit.), para a escala 1:5 000 000.

Para permitir, no futuro, a possibilidade de expansão do número de subprovíncias, com o estágio de conhecimento, conforme sugere o código numérico adotado pelo Departamento Nacional de Águas e Energia / Divisão de Controle de Recursos Hídricos (DNAEE/DCRH, 1981), para as estações fluviométricas do Brasil, a codificação aqui proposta, para os poços testados, é formada por 10 (dez) dígitos, a saber:

Os quatro primeiros dígitos se referem, às unidades onde se encontra o poço, ou seja: à bacia e sub-bacia hidrográfica, província e subprovíncia hidrogeológica, respectivamente. Os quatro dígitos seguintes (5º ao 8º), estão reservados para o número de ordem do poço e os dois últimos (9º e 10º) para o número de ordem da etapa de teste.

Vale notar, que essa codificação permite (na medida do avanço dos conhecimentos), subdividir cada província em até 10 (dez) subprovíncias (4º dígito), numeradas de 0 a 9. Neste sentido, respeitando a numeração original, proposta por Pessoa et al. (1980), o avanço dos conhecimentos nos leva hoje, a introduzir, na província São Francisco (5), as subprovíncias: *Coberturas Clásticas* (51) e *Coberturas Carbonáticas* (52), e na província Paraná (7), as subprovíncias: *Serra Geral* (71) e *Guaraní* (72). As justificativas para isso, serão apresentadas adiante, quando tratarmos dessas províncias.

1.3.4.- Tratamento dos dados de bombeamento

O tratamento ou interpretação dos dados de bombeamento em meio fraturado pelo método da **capacidade específica fractal** pode ser feito usando qualquer programa de análise matemática que inclua gráficos, polinômios, funções de estatística e probabilidade e métodos de ajuste de curvas. No caso utilizou-se o sistema científico ASYST (2.01) e o GRAPHER (1.0).

Esse tratamento foi feito em duas etapas: a primeira, de transformação da descarga bombeada, geralmente variável com o tempo, em descarga fractal uniforme equivalente e a segunda, de cálculo das propriedades físicas do meio fissural, de modo a prever a evolução do seu comportamento sob condições de exploração.

1.4.- ESTRUTURA DA TESE

A estrutura do trabalho está dividida em duas partes: a primeira, envolve os capítulos 2 a 5, a segunda os capítulo 6 a 8. Além dessas partes, 3 capítulos finais encerram o documento: 9- conclusões e recomendações; 10 - bibliografia; 11- apêndice.

A Parte I, "CONCEITOS E FUNDAMENTOS BÁSICOS", descreve aspectos teóricos e elementos que alicerçam a formulação e o desenvolvimento do modelo proposto.

Capítulo 2, "OS AQUÍFEROS DAS ROCHAS CRISTALINAS": Começa com uma revisão bibliográfica; aborda a ocorrência e importância das águas subterrâneas das rochas cristalinas e descreve a ocorrência em algumas províncias hidrogeológicas do Brasil; introduz os conceitos de aquífero heterogêneo, condutor hidráulico e condutor hidráulico fractal; descreve ainda os métodos de investigação utilizados na caracterização da geometria de domínios fraturados bidimensionais e por fim, os tipos de testes hidráulicos, regimes de fluxo e parâmetros físicos dos condutores hidráulicos fraturados.

Capítulo 3, "MODELOS CONCEITUAIS DE FLUXO PARA POÇOS EM MEIO FRATURADO": Descreve o método do modelo conceitual e apresenta as três principais classes de modelos conceituais empregados em ambientes fraturados (caixa preta, de meio contínuo equivalente e de meio descontínuo). Dentro de cada uma dessas categorias, aborda os modelos mais conhecidos apresentando as suas equações e métodos de interpretação para determinação dos parâmetros do meio fraturado.

Capítulo 4 , "FRACTAIS E GEOMETRIA FRACTAL": Introduz o conceito de fractais e o conceito de processo iterativo determinístico (que pode ser visto como um processo gerador de um conjunto fractal). Discute ainda, e ilustra, a presença do caos em processos iterativos determinísticos, a geração de fractais clássicos (triângulo de Sierpinsky, conjunto de Cantor, curva de Koch), dimensão fractal, auto-similaridade e auto-afinidade de conjuntos fractais.

Capítulo 5 , "O MODELO FRACTAL PROPOSTO": Trata da formulação e do desenvolvimento das equações do modelo de capacidade específica fractal. Apresenta a conceituação dos parâmetros do condutor hidráulico (conjunto poço-fendas-blocos associados) e discute a evolução temporal da vazão, do rebaixamento e da capacidade específica.

A parte II, "APLICAÇÕES DO MODELO AO ESTUDO DE CASOS": apresenta exemplos de casos envolvendo condutores hidráulicos situados na Província Escudo Oriental, subprovíncia Nordeste, Província São Francisco (subprovíncias Coberturas Clásticas e Coberturas Carbonáticas) e ilhas oceânicas de Fernando de Noronha e Roatán, na República de Honduras. Apresenta e discute os resultados em termos da magnitude e da dimensão do fluxo fractal, bem como dos parâmetros físicos dos condutores hidráulicos testados.

Capítulo 6, "PROVÍNCIA ESCUDO ORIENTAL": Trata de aplicações feitas na subprovíncia Escudo Oriental Nordeste, em 51 poços distribuídos pelos Estados do Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba e Bahia.

Capítulo 7, "PROVÍNCIA SÃO FRANCISCO": Estuda 12 (doze) casos, sendo 3 (três) na subprovíncia Coberturas Clásticas São Francisco e 9 (nove) na subprovíncia Coberturas Carbonáticas.

Capítulo 8, "ILHAS OCEÂNICAS": Apresenta 9 (nove) casos, sendo 3 (três) em basaltos na Ilha de Fernando de Noronha, Pernambuco e 6 (seis) na Ilha de Roatán, na República de Honduras.

Os três capítulos finais, desvinculados das duas partes principais em que foi dividido o texto, são os seguintes:

Capítulo 9, "SUMÁRIO E CONCLUSÕES": sintetiza os resultados e conclusões ligadas ao método proposto, enfatizando a sua originalidade e vantagens em relação aos métodos conhecidos e/ou em uso. Sugere metodologia para a execução e interpretação de testes de bombeamento em condutores hidráulicos de dupla porosidade, bem como para a definição das condições de exploração (vazão e regimes de bombeamento).

Capítulo 10, "REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS"

Capítulo 11, "APÊNDICE": dedução das fórmulas de cálculo dos parâmetros B, C, n , da clássica equação de Rorabaugh, 1953 [$s_w = BQ + CQ^n$] que implica na execução de três etapas de bombeamento com vazões diferentes, para que se possa estabelecer uma relação de rebaixamento em função da vazão.

1.5 - NOTAÇÃO

a	$a = \left[T_f \frac{12\nu}{g} \right]^{1/3}$ abertura das fraturas	[L]
B_f	$B_f = \sqrt{T_f \alpha_f S_m}$ parâmetro de drenagem retardada das fissuras	[L]
C	coeficiente de armazenamento do poço definido pelas equações: $C = \pi r_c^2$ e $C = V c_w \rho_w g$	[L ²]
C_A	coeficiente de armazenamento adimensional do poço definido pela equação $C_A = \frac{C}{2\pi r_w^2 S}$	
c_t	compressibilidade isotérmica total do sistema água-rocha	[LT ² /M]
c_w	compressibilidade isotérmica da água	[LT ² /M]
D	dimensão fractal do fluxo	
FMP	profundidade da fenda produtora mais profunda ou base do condutor hidráulico	[L]
g	aceleração da gravidade	[L/T ²]
$2H$	espessura saturada do condutor hidráulico ou espessura do bloco, no modelo bloco-fratura de Boulton & Streltsova, 1977 (equivalente a espessura de aquitard)	[L]
h_0	carga piezométrica extrema (máxima, ao fim da injeção, ou mínima, ao fim do bombeamento)	[L]
h_c	submergência estática do crivo da bomba	[L]
h_i	carga piezométrica inicial (nível hidrostático)	[L]
h_{wA}	carga piezométrica normalizada no poço $h_{wA} = \frac{h_i - h_w(t)}{h_i - h_0}$	
$I_n(x)$	função modificada de Bessel de primeira espécie e ordem n	
$J_n(x)$	função de Bessel de primeira espécie e ordem n	
$K_n(x)$	função modificada de Bessel de segunda espécie e ordem n	
K	condutividade hidráulica da formação	[L / T]
K_f	condutividade hidráulica das fraturas	[L / T]
k	permeabilidade (intrínseca) da formação	[L ²]

k_f	$k_f = K_f \frac{\mu}{\rho g} = K_f \frac{\nu}{g}$ permeabilidade (intrínseca) das fraturas	[L ²]
n	$n = \frac{V_v}{V_t}$ porosidade (total) do meio	
Q_A	$Q_A = C_A \left[\frac{1 - h_{wA}(t^*)}{t^*} \right]$ vazão constante, expressa em termos adimensionais, e que, por hipótese, ocorre durante um tempo t^* , no período de fluxo	
Q	vazão constante de bombeamento ou injeção	[L ³ / T]
Q^*	vazão fractal constante	[L ^{2+D} / T]
$Q(t)$	vazão variável com o tempo	[L ³ / T]
r_A	raio adimensional $r_A = \frac{r}{r_w}$	
r_c	raio do revestimento do poço na zona em que se encontra a superfície livre da água	[L]
r_{pe}	raio da pele	[L]
r_w	raio do poço bombeado	[L]
S	coeficiente de armazenamento da formação	
S_f	$S_f = \frac{4T_f t}{r^2 \theta}$ coeficiente de armazenamento das fraturas	
S_m	$S_m = S_f (\eta - 1)$ coeficiente de armazenamento da matriz rochosa (blocos). No caso de rochas ígneas e metamórficas esse coeficiente é aqui considerado desprezível e o seu valor é interpretado como sendo um armazenamento no manto eluvial.	
S_{pe}	coeficiente de armazenamento da pele	
T_{pe}	transmissividade da pele	[L ² / T]
s_A	rebaixamento adimensional	
s_{fA}	rebaixamento adimensional nas fraturas	
s_{mA}	rebaixamento adimensional na matriz rochosa (blocos)	
s_w	rebaixamento no poço bombeado	[L]
T	transmissividade da formação	[L ² / T]
T_f	$T_f = \frac{y^*}{4\pi} W_\theta$ transmissividade das fraturas	[L ² / T]
T_m	transmissividade da matriz rochosa (blocos)	[L ² / T]

t_A	tempo adimensional dado pela equação $t_A = \frac{Tt}{Sr_w^2}$	[T]
t_t	tempo de fechamento da válvula (Karasaki, 1990)	
V	volume do trecho isolado	[L ³]
V_v	volume de vazios	[L ³]
V_t	volume total	[L ³]
y	capacidade específica do poço	[L ³ / T L]
y^*	capacidade específica fractal	[L ³ / T L]
$Y_n(x)$	função de Bessel de segunda espécie e ordem n	
α, β	argumentos das funções usadas nas curvas-padrão	
α_f	$\alpha_f = \frac{\pi^2 T_m'}{4H^2 S_m}$ parâmetro de fluxo vertical bloco-fissura	[1/T]
δ	$\delta = \frac{T_f}{S_f}$ difusividade das fraturas	[L ² / T]
γ	parâmetro adimensional $\gamma = \frac{\lambda}{1-\omega}$	
λ	fluxo interporosidade (parâmetro adimensional)	
ι	fator de forma	[L ⁻²]
μ	viscosidade dinâmica do fluido	[M/LT]
ν	viscosidade cinemática do fluido ($= 9 \times 10^{-7} \text{ m}^2 / \text{s}$ a 25°C)	[L ² / T]
ρ	densidade do fluido	[M / L ³]
ρ_w	densidade da água	[M / L ³]
σ	fator de pele (perda de carga adimensional devida ao "cake" ou "reboco" produzido pela lama de perfuração principalmente em poços de petróleo) $\sigma = \frac{K}{K_{pe}} \ln \left(\frac{r_{pe}}{r_w} \right)$	
θ	parâmetro adimensional $\theta = \frac{4T_f t}{r^2 S_f}$	
ω	parâmetro adimensional $\omega = \frac{S_f}{S_f + S_m}$	

1.6 - AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Aldo da Cunha Rebouças pelo apoio e ajuda dispensados com o fornecimento de bibliografia, leitura dos originais, críticas e ótimas sugestões.

A Benjamim Bley de Brito Neves, pela ajuda, incentivo, cuidadosa leitura dos originais, sugestões e críticas construtivas sobre os aquíferos das rochas cristalinas.

A Waldir Duarte, pelo fornecimento de material bibliográfico.

A Wilton Rocha, da Companhia Integrada de Serviços Agropecuários do Estado de Pernambuco (CISAGRO), por ter gentilmente cedido os dados de testes que executou em poços perfurados no basalto de Fernando de Noronha.

A José do Patrocínio Tomaz Albuquerque, da Universidade Federal da Paraíba e Milton José Mafra, da Companhia de Desenvolvimento de Recursos Minerais da Paraíba (CDRM), pelo empenho dispensado na aquisição de dados de testes de produção de poços perfurados na Paraíba.

A Helmo Marinho e José Braz Diniz Filho, da Companhia de Desenvolvimento Mineral do Rio Grande do Norte (CDM) pelo fornecimento de dados de testes de bombeamento de poços perfurados em rochas cristalinas.

A Mário Fracalossi e Luiz Alberto da Companhia de Águas e Esgotos do Ceará (CAGECE), pela colaboração e simpática acolhida durante as investigações hidrogeológicas desenvolvidas no âmbito do projeto CAGECE-KFW de saneamento rural de pequenas comunidades na região de Sobral.

A Fernando Feitosa, da Fundação Cearense de Meteorologia (FUNCEME), pelos excelentes testes de produção que planejou e executou durante a inesquecível fase de trabalho de campo de que juntos participamos na região de Sobral em 1992 e que serviram de inspiração para essa tese de doutorado.

A José Carlos Oliveira, chefe do Departamento de Engenharia de Minas e Alcides Nóbrega Sial, coordenador do Curso de Mestrado em Geociências, ambos da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), pelo apoio e confiança em min depositados.

PARTE I

CONCEITOS E FUNDAMENTOS BÁSICOS

2 - OS AQUÍFEROS DAS ROCHAS CRISTALINAS

Nas rochas cristalinas as fraturas e/ou fissuras são os condutos através dos quais a água subterrânea se movimenta, uma vez que o esqueleto sólido ou matriz da rocha é considerado praticamente impermeável. De um modo geral pode-se dizer que os aquíferos das rochas cristalinas são importantes pelas grandes extensões territoriais que ocupam na superfície terrestre e pela pouca profundidade (inferior a 10 m) em que a água quase sempre se encontra. De fato as rochas ígneas e metamórficas Pré-Cambrianas dominam amplamente nas grandes plataformas continentais (Atlântica, Canadense, da Africana, Siberiana, etc) que cobrem 30 milhões de km² (quase 20%) da superfície da Terra.

2.1 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As investigações sobre fluxo em meio fraturado envolvem dois tipos de experimentos: ensaios de laboratório e testes de campo. Os primeiros geralmente são feitos em regime permanente. Exemplos neste sentido, apresentados por Witherspoon et al. (1980), são os clássicos estudos de Lomize (1951), que desenvolveu diversas leis semi-empíricas de fluxo para levar em conta os efeitos de rugosidade e turbulência em fraturas abertas. Esses efeitos foram igualmente estudados por Baker (1955), Huitt (1956), Parrish (1963), Maini (1971), Rayneau (1972), Rissler (1978) entre outros. Louis (1969) também levou a cabo experimentos similares aos de Lomize e chegou às mesmas conclusões, enquanto Romm (1966) demonstrou a validade da lei cúbica (equação 2.1) para fluxo laminar em fraturas finas (1.0×10^{-2} a $1.0 \times 10^{-1} mm$) e superfina (2.5×10^{-4} a $4.0 \times 10^{-3} mm$).

$$\frac{Q}{\Delta h} = C\alpha^3 \quad (2.1)$$

onde:

- Q é a taxa de fluxo [L^3 / T]
- Δh é a diferença de carga hidráulica [L]
- α é a abertura da fratura [L]
- C é uma constante que depende da geometria das fraturas e das propriedades do fluido [$1 / LT$]

Sharp (1970) e Sharp & Maini (1972) testaram em laboratório o fluxo em fraturas abertas e concluíram que o expoente na equação (2.1) deveria ser 2 e não 3. Gale (1975) e Witherspoon et al. (1980), no entanto, também em laboratório, comprovaram a

validade da lei cúbica para o fluxo em fraturas, sob tensão artificialmente induzida, em amostras homogêneas de granito, basalto e mármore.

Outros pesquisadores, como, por exemplo, Polubarinova-Kochina (1962), Snow (1965), Louis (1969) e Bear (1972) são alguns dentre os muitos que também deduziram equações para descrever o fluxo através de uma fratura. Esses autores demonstraram, para fluxo laminar, que se as paredes da fratura forem simuladas como placas paralelas a condutividade hidráulica de uma fratura com abertura a é dada por

$$K_f = a^2 \frac{g}{12\nu} \quad (2.2)$$

onde:

- g é a aceleração da gravidade [L / T^2]
- ν é a viscosidade cinemática [L^2 / T] ($= 9 \times 10^{-7} m^2 / s$ a $25^\circ C$)

As fraturas isoladas são descritas por parâmetros tais como, tamanho da abertura, rugosidade, coeficiente de fricção e raio hidráulico. O fluxo pode ser laminar ou turbulento, de acordo com o número de Reynolds e a influência das condições de pressão também é considerada. Exemplos, citados por Streltsova-Adams (1978), são os trabalhos de Lomize (1947, 1951), Huitt (1956), Romm (1966), Snow (1968, 1969, 1972), Wilson (1970), Wilson e Witherspoon (1970, 1974).

É claro que os estudos de laboratório são importantes e sempre podem trazer alguma luz sobre os problemas de fluxo em fraturas. Não obstante, comparados com aqueles obtidos em estudos desenvolvidos diretamente em campo, os resultados dos experimentos de laboratório são de pouca valia na compreensão dos meios fraturados de extensão regional. Como razões para isso podem ser apontadas:

- o efeito de escala e a heterogeneidade, que não permitem obter um Elemento de Volume Representativo (EVR) de dimensão razoável.
- a dificuldade de obter amostras de rocha com juntas não perturbadas ou indeformadas, já que o comportamento das fraturas fora de *situ* é totalmente modificado.

Estudos de campo constituem, portanto, o primeiro passo para uma avaliação de maciços rochosos e devem ser orientados no sentido de identificar: i) uma forma de

modelagem do meio e de interpretação dos testes; ii) o comportamento qualitativo e quantitativo do referido meio.

Modelos de fluxo transiente em meio fraturado baseados em investigações de campo, são descritos em diversas revisões bibliográficas apresentadas nos últimos 20 anos. Citam-se por exemplo, Streltsova-Adams (1978) , Sauveplane (1984), Daviau (1986), Streltsova (1988), Chen (1989), Boehmer (1993), Jouanna (1993) e Camargos (1994). A maioria dos modelos, desenvolvida na área da engenharia de petróleo, adota como fundamentos as hipóteses do modelo conceitual proposto por Theis (1935) para os meios homogêneos. A forte descontinuidade hidráulica existente entre as fraturas e a matriz dos blocos rochosos, não justifica a hipótese de um meio fraturado homogêneo único. Por isso, alguns autores (Barenblatt et al., 1960) seguindo idéias de Muskat (1937) desenvolveram os modelos de dupla porosidade, envolvendo dois meios contínuos superpostos: um com porosidade de fraturas e outro com porosidade matricial.

Seguindo as idéias de Barenblatt et. al. (1960), e introduzindo modificações na geometria do meio, Warren & Root (1963) admitem uma rede uniforme de fraturas paralelas às três direções principais do tensor de condutividade hidráulica. Boulton & Streltsova (1977) admitem um padrão regular de estratos horizontais no qual os elementos representando os blocos de rocha (onde o fluxo é vertical) possuem espessura (H) e os elementos representando as fraturas (onde o fluxo é horizontal) possuem espessura ($h=a$ =abertura). Gringarten & Witherspoon (1972) e Gringarten & Ramey (1973,1974), simularam um meio homogêneo, anisotrópico, no qual uma única fratura horizontal ou vertical de extensão finita e fluxo uniforme é interceptada pelo poço de bombeamento. Todos esses modelos consideram o poço de raio desprezível e fluxo uniforme.

Nos meios fraturados de baixa permeabilidade, por ocasião das primeiras pesquisas associadas com a deposição de resíduos nucleares, surgiu a necessidade de levar em conta o armazenamento no poço e efeitos produzidos pela perfuração nas paredes do mesmo. Foram então desenvolvidos modelos para fluxo uniforme¹ que consideram o efeito do *raio finito* do poço e o efeito "*pele*"². Entre outros, citam-se Cooper et al. (1967), que introduziram o poço de raio finito; e Ramey & Agarwal (1972), que introduziram o efeito reboco, na solução de Cooper et al. (1967).

¹No âmbito da hidráulica dos meios pouco permeáveis, para análise de testes de injeção/extração que aqui preferimos denominar de testes de variação instantânea de carga.

²Perda de carga produzida pelo reboco ou "cake" da lama de perfuração nas paredes laterais do poço.

Ramey (1976) e Moench & Hsieh (1985), desenvolveram curvas-padrão para analisar testes em poço de raio finito com efeito pele. Peres et al. (1989) inclui a transformação de dados de testes de variação instantânea de carga em dados equivalentes de testes de bombeamento. Karasaki (1990, apud Camargos 1994), introduz um novo método de análise de testes de variação instantânea de carga, em duas fases: de fluxo, com válvula aberta e de recuperação, com válvula fechada.

No Nordeste do Brasil, a contribuição científica existente sobre a hidráulica de poços em rochas cristalinas, é realmente muito pequena ou quase nula, em comparação com o acervo de dados representado pelos milhares de poços perfurados na região. Os principais trabalhos foram publicados nas décadas de 1960 e 1970, através de artigos de caráter regional sobre a hidrogeologia do cristalino, nos periódicos interrompidos, *Série Hidrogeologia* da SUDENE e *Boletim Técnico* da CONESP. Dentre as contribuições verificadas nos anos 1980 destacam-se aquelas que buscaram caracterizar parâmetros influentes na produtividade dos poços.

Honik (1980), usando dados (transientes) de capacidade específica³ de 119 poços perfurados na folha nº 19 (Aracaju-NE) do Inventário Hidrogeológico Básico do Nordeste, propõe uma nova unidade de produção para poços no cristalino que depende da vazão específica, da profundidade do nível estático e da espessura estática saturada. Através de uma análise de regressão, propõe fórmulas empíricas para o cálculo da *produção potencial* de poços em diferentes tipos de rochas estudados. Os baixíssimos coeficientes de determinação dos ajustes ($0.012 \leq R^2 \leq 0.469$) evidentemente não sugerem influência da profundidade do nível estático e da espessura estática saturada na produtividade dos poços.

Ainda da década de 1980 citam-se como trabalhos acadêmicos importantes, a dissertação de mestrado de Albuquerque (1984) sobre os recursos de água do trópico semi-árido da Paraíba, com excelente revisão bibliográfica da hidrogeologia do cristalino do Nordeste e a tese de doutoramento de Costa (1986), que tenta analisar a influência de diversos fatores (hidroclimáticos e hidrogeológicos) na produtividade de poços perfurados no cristalino dos Estados da Paraíba e Rio Grande do Norte.

Restaram finalmente, como Bancos de Dados informatizados, o Sistema de Águas Subterrâneas da SUDENE (hoje desatualizado e incompleto) e o Sistema de Cadastro de Poços Tubulares do Estado da Bahia, implantado pela CERB.

³Presumivelmente de 12 horas, por se tratarem de poços perfurados pela CONESP - Companhia Nordestina de Sondagens e Perfurações - cujos testes de bombeamento no cristalino costumam ter essa duração.

A julgar por esta revisão bibliográfica, o tema da presente tese, envolvendo a análise de testes de bombeamento em regime de fluxo não uniforme (transformado em regime fractal uniforme equivalente, para o cálculo das propriedades hidráulicas) ainda não foi objeto de estudo por nenhum pesquisador.

2.2- OCORRÊNCIA E IMPORTÂNCIA

Conforme já foi mencionado, a importância da água subterrânea das rochas cristalinas pode variar muito de um lugar para outro. Ela depende principalmente da existência ou não de outras fontes alternativas de suprimento hídrico e do seu confronto com a demanda. No Brasil, as águas subterrâneas das regiões de rochas cristalinas ocorrem nas províncias hidrogeológicas, correspondentes aos grandes escudos (figura 1.2), formados pelos complexos de rochas ígneas e metamórficas de todos os graus, e ainda pelas coberturas e embasamento do craton do São Francisco.

2.2.1- Região semi-árida

Nas regiões semi-áridas, como por exemplo no Nordeste do Brasil, onde cerca de 500.000 km² são ocupados por rochas cristalinas, o aproveitamento de água subterrânea dessas rochas sempre foi uma alternativa que se levou em consideração, notadamente em virtude da carência de outros recursos hídricos. Nos períodos de estiagens prolongadas, essa é, muitas vezes, a única alternativa com que se pode contar para a sobrevivência dos rebanhos. O mesmo acontece em grandes regiões da África, Índia, Austrália e Sibéria, conforme indicam muitos dos estudos hidrogeológicos regionais que tem contribuído para um melhor entendimento das propriedades hidrogeológicas do cristalino (Biscaldi 1968, IAH 1975, Wright e Burges 1992).

Do ponto de vista da ocorrência, as águas subterrâneas do cristalino semi-árido Nordestino se encontram na porção setentrional da Província São Francisco (5) e na subprovíncia Escudo Oriental Nordeste (61), conforme mostrado na figura 2.1. O clima dessas regiões é tipicamente marcado por precipitações mal distribuídas, tanto no tempo como no espaço.

A Província São Francisco compreende rochas sedimentares (Formação Urucuia) e cristalinas (meta-sedimentos de cobertura do Craton São Francisco). As características essenciais da porção cristalina dessa Província, em termos de elementos geotectônicos, grupos geológicos e seqüências lito-estratigráficas, (segundo Brito Neves, 1978), estão sumarizadas no quadro 2.1, que revela litologias e porosidades de natureza distinta.

ELEMENTOS GEOTECTÔNICOS

PROVÍNCIAS E SUBPROVÍNCIAS
HIDROGEOLÓGICAS

- Cobertura fanerozoica indiferenciada
- Antefossas e intrafossas molássicas
- Faixas de dobramento
- Zonas geanticlinais e altos tectônicos re trabalhados no brasiliano
- Embasamento

- 0 - COSTEIRA
 - 03 - Recôncavo, Tucano, Jatobá
 - 04 - Sergipe, Alagoas
 - 05 - Pernambuco, Paraíba, R. G. Norte
 - 06 - Potiguar
 - 07 - Ceará, Piauí
- 4 - PARNAIBA
- 5 - SÃO FRANCISCO
 - 51 - Coberturas clásticas
 - 52 - Coberturas carbonáticas
- 6 - ESCUDO ORIENTAL
 - 61 - Escudo Oriental Nordeste

Fig. 2.1 - Esboço geotectônico e subprovíncias hidrogeológicas do Pré-Cambriano Nordeste.
Fontes: Brito Neves & Manoel Filho (1972); Brito Neves (1978).

Quadro 2.1 - Caracterização geotectônica e litológica da Província Hidrogeológica São Francisco

ELEMENTOS GEOTECTÔNICOS	GRUPOS	LITOLOGIAS
Coberturas do Craton São Francisco		
Super Grupo São Francisco	Salitre(Bambui) Bebedouro	Calcários, dolomitos, margas Diamictitos, quartzitos
Super Grupo Espinhaço	Ch.Diamantina Paraguassu Rio dos Remédios	Arenitos, orto-quartzitos, argilitos Arenitos, argilitos Vulcanitos, conglomerados, tufos

Do quadro 2.1, fica claro que, além de diferenças litológicas, existe informação hidrogeológica (tipo de porosidade), suficiente para justificar uma sub-divisão dessa Província (5) em duas sub-províncias, para as quais propõe-se, usando elementos geotectônicos, as denominações de: *Coberturas Clásticas São Francisco*(51) e *Coberturas Carbonáticas São Francisco* (52).

Subprovíncia Coberturas Clásticas São Francisco: (51)

Corresponde às áreas de exposição de metaclásticos **fissurados** dos Super Grupos: i) Espinhaço (arenitos e argilitos do Grupo Paraguassu; arenitos, orto-quartzitos e argilitos do Grupo Chapada Diamantina); ii) São Francisco (diamictitos e quartzitos do Grupo Bebedouro). Admite-se que os clásticos mais grosseiros, apresentam **dupla porosidade**, devido a um metamorfismo parcial, que leva a crer numa coexistência de porosidades intersticial e de juntas (Brito Neves & Manoel Filho, 1972).

As águas são de boa qualidade para consumo, com teores de sólidos totais dissolvidos geralmente inferiores a 500 mg/L, podendo por conseguinte serem utilizadas para os mais diversos fins.

Subprovíncia Coberturas Carbonáticas São Francisco: (52)

É constituída de metacarbonatos [calcários, dolomitos e margas do Grupo Salitre (Bambuí)], de idade proterozóica superior. Embora também apresente porosidade de fissuras, o sistema de vazios é fundamentalmente resultante de **dissolução cárstica**.

As condições hidrogeológicas refletem as influências climáticas, que são caracterizadas por chuvas médias anuais variando 1300 a 500 mm, e recarga de 5 a 12% da precipitação (Brito Neves, 1970).

A qualidade das águas subterrâneas, também está subordinada ao clima, distribuindo-se em 3 (três) faixas: de resíduos secos inferiores a 500 mg/L, nas zonas mais úmidas; de valores compreendidos entre 500 e 1000 mg/L, nas zonas de chuvas mais próximas da média regional, e finalmente, valores entre 1000 e 2000 mg/L, nas zonas mais áridas. Os resíduos secos abaixo de 1000 mg/L, mais frequentes, são indicadores de águas subterrâneas de uso irrestrito (Cruz & Melo, 1968).

A análise estatística dos dados de 33 poços, perfurados na subprovincia das Coberturas Carbonáticas, cadastrados pela Companhia de Engenharia Rural da Bahia (1974; 1975), forneceu os parâmetros condensados na tabela 2.1. As águas subterrâneas são pouco profundas com níveis estáticos inferiores a 15 m de profundidade em 75% dos poços; os níveis dinâmicos ficam a menos de 42 m em 75% dos casos.

Tabela 2.1 - Parâmetros estatísticos de algumas características de 33 de poços perfurados na subprovincia Coberturas Carbonáticas São Francisco, no Estado da Bahia (Fonte dos dados: Companhia de Engenharia Rural da Bahia, 1974;1975)

Parâmetro	NE m	ND m	Q m³/h
N. Total de poços	33	33	33
Poços usados	33	33	33
Média	11,57	31,41	14,18
Variância	61,75	364,02	146,08
Desvio Padrão.	7,85	19,07	12,08
CV (%)	67,92	60,73	85,20
Assimetria	1,10	0,55	1,14
Curtose	3,40	2,25	3,45
Mínimo	1,30	7,42	0,40
25% ≤	6,27	13,77	4,54
Mediana	9,00	28,50	9,97
75% ≤	14,19	41,87	19,87
Máximo	32,00	72,00	46,50

NE = nível estático; ND = nível dinâmico; Q = vazão;

Vazões dos poços

Os valores de vazão, para uma amostra de 33 poços, se encontram, em 78,8% dos casos (isto é, 26/33) na faixa de 2,5 a 25 m³/h, indicativa de uma produtividade de aquífero de *fraca a média*, pela classificação aqui considerada

(tabela 2.2), adiante apresentada. Isso pode ser igualmente verificado pela distribuição de frequência, mostrada no histograma da figura 2.2.

Fig. 2.2 - Histograma de frequência de vazão de poços, baseado em amostra de 33 poços, na subprovíncia Coberturas Carbonáticas São Francisco, no Estado da Bahia.

Produtividade de aquífero

A denominação, *produtividade de aquífero*, foi introduzida por Monte & Mont'Alverne (1982), no mapa hidrogeológico do Brasil, na escala de 1:5.000.000, como um indicador da "importância hidrogeológica relativa" dos diferentes aquíferos do país. Corresponde à capacidade específica ($\text{m}^3/\text{h.m}$) de poços, para rebaixamento de cerca de 25 m (tabela 2.2).

É, sem dúvida, um indicador interessante, mas, para que seja realmente significativo, é necessário referi-lo ao tempo, pois a capacidade específica de poços, como se sabe, é um parâmetro temporal. Na verdade, nos cadastros de poços, quase nunca é feita qualquer referência ao tempo, para os dados de capacidade específica. Acredita-se, porém, que se tratem de capacidades específicas de 12 horas, que são os tempos mais comumente adotados nos testes de produção de poços, pelas empresas de perfuração que atuam no Nordeste do Brasil.

Tabela 2.2 - Classificação de produtividade de aquífero no Brasil (Mente & Mont'Alverne, 1982)

Produtividade de aquífero	Faixa de capacidade específica para rebaixamento de 25 m [m ³ /h.m]	Faixa de vazão [m ³ /h]
Muito elevada	$y > 4$	$Q > 100$
Média a elevada	$1 < y \leq 4$	$25 < Q \leq 100$
Fraca a média	$0.1 < y \leq 1$	$2.5 < Q \leq 25$
Muito fraca	$y < 0.1$	$Q < 2.5$

Na subprovíncia Coberturas Carbonáticas, a produtividade de aquífero mais frequente (75,8%) se classifica como *fraca a média*, ou seja, as capacidades específicas permanecem no intervalo de 0,1 a 1 m³/h.m. Abaixo e acima dessa faixa, existem 9,1% de poços com produtividade *muito fraca* e 15,1% com produtividade *média a elevada*. Esses resultados são ilustrados na fig. 2.3.

Fig. 2.3 - **Produtividade de aquífero**, baseada em amostra de 33 poços, na subprovíncia Coberturas Carbonáticas São Francisco, no Estado da Bahia

Subprovíncia Escudo Oriental Nordeste:(61)

Corresponde à parte setentrional da Província Escudo Oriental, constituída de rochas antigas, com porosidade de fissuras, e caracterizada pelo domínio de um clima semi-árido. Os seus elementos geotectônicos, grupos geológicos e lito-estratigrafia,

segundo Brito Neves (op.cit.), estão condensados no quadro 2.2 e ilustrados na figura 2.1, página 24.

Quadro 2.2 - Caracterização geotectônica e litológica da subprovincia Escudo Oriental Nordeste

ELEMENTOS GEOTECTÔNICOS	GRUPOS	LITOLOGIAS
Sistemas de dobramentos marginais: Rio Preto (norte Bahia, sul Piauí) Sergipano (Sergipe e Alagoas) Médio Coreau (noroeste Ceará)	Bambuí Vaza Barris Ubajara	Sequências meta-sedimentares QPC: Quartzitos, Pelitos (filitos, xistos verdes) e rochas Carbonáticas (meta-calcários e meta-dolomitos).
Sistemas de dobramentos distais (ou interiores)		gnaisses, paragneisses e ortogneisses com intercalações de anfibolitos e calcários. Filitos e micaxistos de diferentes graus de metamorfismo. Ocorrência de stocks, plutões e batólitos graníticos e granodioríticos.
Rio Curu - Independência	Ceará	gnaisses e migmatitos complexos do embasamento
Jaguaribano		quartzitos, xistos
Seridó	Cruzeta Seridó Equador Jucurutu	filitos micaxistos quartzitos gnaisses
Piancó - Alto Brígida	Cachoeirinha / Salgueiro	filitos, xistos verdes, micaxistos
Pajeú - Paraíba	Sertânia Surubim	xistos, gnaisses micaxistos
Riacho do Pontal	Monte Orebe Afrânio Rajada	meta-básicas micaxistos, quartzitos micáceos gnaisses
Maciços (interpostos às faixas de dobramento) Tróia, Sta. Quitéria, Rio Piranhas, Caldas Brandão, Pernambuco-Alagoas	Ceará	complexos gnáissico-migmatíticos e graníticos e rochas antigas de alto grau.
Craton do São Francisco	Embasamento	gnaisses, migmatitos e granulitos de alto grau. Plutões graníticos e sieníticos

O clima semi-árido predominante nessa subprovincia, apresenta distribuições muito irregulares de chuvas, resultando daí condições de recarga e descarga, igualmente irregulares. A espessura do manto de cobertura indiferenciada (MCI) das rochas cristalinas (incluindo alúvios, colúvios e elúvios) é geralmente inferior a 5 m, culminando com uma produtividade de aquífero, em geral, muito fraca e com águas de alto grau de mineralização.

Estatísticas, baseadas em dados de 814 poços cadastrados por Costa (1986), nos Estados da Paraíba e Rio Grande do Norte, estão sumarizadas na tabela 2.3 e são descritas, a seguir, com maiores detalhes

Tabela 2.3 - Parâmetros estatísticos de algumas características de 814 poços perfurados na subprovíncia Escudo Oriental Nordeste, nos Estados do Rio Grande do Norte e Paraíba (Fonte dos dados: Costa, 1986)

Parâmetro	RS mg/L	MCI m	NE m	ND m	Q m ³ /h	FMP m
N. Total de poços	814	814	814	814	814	814
Poços usados	760	799	814	814	814	814
Média	3161	3,18	4,94	19,73	3,13	26,49
Variância	15351	7,24	16,43	95,27	13,19	180,71
Desvio Padrão.	3918	2,69	4,05	9,76	3,63	13,44
CV (%)	123950	84,46	82,00	49,47	115,94	50,73
Assimetria	2548	2,24	1,95	0,73	3,48	0,76
Curtose	11169	11,91	8,25	3,26	22,31	3,52
Mínimo	125	0	0	1,80	0,05	0
25% ≤	690	1,27	2,27	11,88	0,90	15,20
Mediana	1500	3,00	3,72	18,08	2,00	24,45
75% ≤	3960	4,00	6,33	25,97	3,78	35,00
Máximo	31125	23,70	31,00	64,00	36,00	98,00

RS = resíduo seco; MCI = manto de cobertura indiferenciado; NE = nível estático; ND = nível dinâmico;

Q = vazão; FMP = fenda mais profunda.

Espessura do manto indiferenciado e profundidade do nível estático

A espessura do manto de cobertura indiferenciado, não passa de 5 m, em 81,6% dos poços, enquanto que a profundidade das águas subterrâneas é menor ou igual a 5 m em 65,1% dos casos. A análise comparativa dos valores medianos da espessura do manto de cobertura indiferenciada (mediana de 3,00m) contra os valores da profundidade do nível estático (mediana de 3,72 m), revela que o nível de água dos poços, com pelo menos 50% de probabilidade, se posiciona dentro das fendas do substrato cristalino. Uma melhor idéia da relação entre a espessura do MCI e a profundidade do NE, é dada pelo coeficiente de carga estática, conforme veremos adiante.

As distribuições de frequência de NE e MCI são muito semelhantes, com coeficientes de variação da ordem de 80% e assimetrias próximas de 2, conforme se observa na tabela 2.3. Esta semelhança também se nota nos histogramas de frequência, mostrados nas figuras 2.4a e 2.4b.

Fig. 2.4a - Histogramas de frequência da espessura do manto de cobertura indiferenciada, para 799 poços, na subprovíncia Escudo Oriental Nordeste, nos Estados da Paraíba e Rio Grande do Norte.

Fig. 2.4b - Histograma de frequência de profundidade do nível estático, para 814 poços, na subprovíncia Escudo Oriental Nordeste, nos Estados da Paraíba e Rio Grande do Norte.

Coefficiente de carga estática do manto de cobertura indiferenciada

Para dar uma melhor idéia da posição do nível estático, em relação ao plano de contato do manto de cobertura com o domínio fraturado subjacente, considera-se aqui o *coeficiente de carga estática* do manto de cobertura indiferenciada, expresso pela equação:

$$C_e = \frac{MCI - NE}{MCI} \quad (2.1)$$

Quando o nível de saturação se encontra no manto de cobertura, ou seja, acima do contato do manto com o meio fissural, $0 < C_e \leq 1$. O limite superior $C_e = 1$, desse coeficiente, corresponde à situação em que o manto se acha totalmente saturado, ou seja, em que o nível estático se encontra na superfície do terreno. Pode assumir valores negativos, $C_e < 0$, quando o nível estático se encontrar, dentro do domínio fissurado.

Fig. 2.5 - Variação do coeficiente de carga estática do manto de cobertura indiferenciada, para 799 poços, na subprovíncia Escudo Oriental Nordeste, nos Estados da Paraíba e Rio Grande do Norte.

Apesar da pequena espessura do manto de cobertura indiferenciado (menor ou igual a 4 m em 75% dos casos), ele abriga o nível de saturação das águas subterrâneas com 38,8% de frequência. Isso corresponde a valores de C_e no intervalo fechado $[0,1]$ e não deixa de ser surpreendente, numa subprovíncia de clima semiárido. Admite-se que isso acontece porque os dados talvez incluam valores medidos nas épocas chuvosas (figura 2.5). Por isso, apenas 61,2% dos valores revelam níveis estáticos dentro do meio fissural, ou seja, $C_e < 0$.

Níveis dinâmicos e entradas de água mais profundas

Uma semelhança ainda maior do que a observada entre as distribuições de frequência de NE e MCI é notada entre as distribuições de frequência de ND e FMP, que possuem coeficientes de variação da ordem de 50% e ainda assimetria e curtose de mesma ordem de grandeza (tabela 2.3 e figuras 2.6a e 2.6b).

Fig. 2.6a - Histograma de frequência de profundidade do nível dinâmico, para uma amostra de 814 poços, na subprovíncia Escudo Oriental Nordeste, nos Estados da Paraíba e Rio Grande do Norte

Fig. 2.6b - Histograma de frequência de profundidade da fenda produtora mais profunda, para uma amostra de 814 poços, na subprovíncia Escudo Oriental Nordeste, nos Estados da Paraíba e Rio Grande do Norte.

Coefficiente de carga dinâmica da fenda mais profunda

A exemplo do que foi feito para o contato manto de cobertura-rocha fissurada, define-se também aqui um coeficiente C_d , de carga hidráulica dinâmica igual a $(FMP-ND)/FMP$, com o objetivo de caracterizar a posição do nível dinâmico em relação à chamada fenda produtora mais profunda (FMP). Esse coeficiente tem as mesmas características do coeficiente de carga estática anteriormente definido.

Fig. 2.7a- Distribuição do coeficiente de carga dinâmica, na fenda produtora mais profunda, em amostra de 814 poços, na subprovincia Escudo Oriental Nordeste, nos Estados da Paraíba e Rio Grande do Norte.

Os resultados ilustrados na figura 2.7a, mostram um certo número de valores negativos do coeficiente de carga hidráulica dinâmica. Esses valores, representam 21,6% do total da amostra de 759 poços, e se explicam porque os crivos dos equipamentos de bombeamento, nesses casos, foram instalados abaixo da fenda produtora mais profunda, o que não é certamente recomendável. A maior frequência, porém, conforme se observa, corresponde a coeficientes de carga dinâmica positiva. Os dados revelam que essa frequência é de 78,4%.

Uma outra maneira de representar a carga hidráulica em relação à FMP, seria usando a própria carga, no lugar do coeficiente C_d , conforme mostrado na figura 2.7b. Como se pode notar, essa figura sugere uma correlação entre a profundidade da fenda produtora mais profunda e a carga hidráulica dinâmica (FMP-ND). Essa carga é geralmente positiva (78,4% de frequência) e mostra que o nível dinâmico fica acima da FMP com essa frequência. Esse nível porém, assume valores negativos (ND abaixo da FMP) em 21,6% dos poços considerados

Fig. 2.7b- Distribuição da carga dinâmica, na fenda produtora mais profunda, para uma amostra de 814 poços, na subprovincia Nordeste. As cargas negativas correspondem a 21,6% dos poços da amostra estudada.

A correlação sugerida pode ser enganosa, pois aparentemente não existe razão para que a carga dinâmica (na FMP), dependa da profundidade. Já uma tendência que indicasse uma correlação entre profundidade dos níveis dinâmicos no cristalino e profundidade das fendas produtoras mais profundas, seria explicável, na medida em que os níveis dinâmicos ora ficam acima, ora abaixo da FMP, na dependência da posição em que se instala o crivo do

equipamento de bombeamento. Isto não significa que exista uma correlação entre os níveis dinâmicos e as profundidades das fendas produtoras mais profundas, conforme revela a figura 2.8.

Fig. 2.8 - Gráfico ilustrativo da falta de correlação entre nível dinâmico e profundidade da fenda produtora mais profunda, em amostra de 814 poços, na subprovíncia Escudo Oriental Nordeste, nos Estados da Paraíba e Rio Grande do Norte.

Os níveis dinâmicos, são inferiores ou iguais a 25 m, em 73% dos poços, enquanto que as fendas produtoras mais profundas, em 51,5% dos casos, se encontram a profundidades inferiores ou iguais a 25 m.

Vazões bombeadas e resíduo seco das águas subterrâneas

As vazões bombeadas possuem média igual a 3,13 m³/h e mediana (frequência de 50%), igual a 2 m³/h. A máxima registrada foi de 36 m³/h, porém 75% das vazões são inferiores ou iguais a 3,78 m³/h. O coeficiente de variação é de 116%. Os resíduos secos apresentam valor médio de 3161 mg/L, porém a mediana (frequência ≤50%), é de apenas 1500 mg/L. O coeficiente de

variação é da ordem de 124%. O máximo resíduo seco encontrado foi de 31125 mg/L, mas 75% dos valores são menores ou iguais a 3960 mg/L.

As distribuições de frequência das vazões bombeadas e dos resíduos secos das águas subterrâneas, são do mesmo tipo; exibem histogramas muito semelhantes (figs. 2.9a e 2.9b), assimetrias e coeficientes de variação da mesma ordem de grandeza (tabela 2.3).

Fig. 2.9a - Histograma de frequência da vazão bombeada, baseado em amostra de 814 poços, na subprovíncia Escudo Oriental Nordeste, nos Estados da Paraíba e Rio Grande do Norte.

Fig. 2.9b - Histogramas de frequência de resíduo seco das águas subterrâneas, em 814 poços da subprovíncia Escudo Oriental Nordeste, nos Estados da Paraíba e Rio Grande do Norte.

Produtividade de aquífero

Na subprovíncia Escudo Oriental Nordeste a produtividade de aquífero, ilustrada na figura 2.10, varia em duas faixas: *muito fraca* (inferior a $2,5 \text{ m}^3/\text{h}$), em 57% dos poços, e *fraca a média* (entre $2,5$ e $25 \text{ m}^3/\text{h}$) em 43% dos poços.

Fig. 2.10 - Produtividade de aquífero, baseada em amostra de 814 poços, na subprovíncia Escudo Oriental Nordeste, nos Estados da Paraíba e Rio Grande do Norte.

2.2.2 - Região úmida

Em regiões desse tipo, que se caracterizam por uma relativa abundância de água, quase sempre se dispensou o uso da água subterrânea das rochas cristalinas. Nos últimos 20 anos, porém, ocorreram grandes progressos na hidrogeologia do cristalino de regiões temperadas, por conta do crescimento da demanda de água em muitas áreas e devido ao aprimoramento da tecnologia de perfuração, o que tornou bastante fácil e pouco onerosa a construção de poços de pequeno diâmetro para captação de água em rochas cristalinas (Karrenberg 1981, Krásný 1990, in Gustafson e Krásný 1994). Isto principalmente para pequenos abastecimentos, a nível familiar. Nas zonas úmidas, uma das características mais importantes da água subterrânea reside na possibilidade de seu uso para os mais diversos fins, já que a qualidade físico-química costuma ser excelente e a produtividade dos poços frequentemente maior do que nas zonas semi-áridas.

Do ponto de vista da ocorrência da água subterrânea, seja devido a uma pluviosidade mais abundante, seja por conta de sua melhor distribuição no tempo, o fato é que o domínio das rochas cristalinas é, geralmente, recoberto por um manto de intemperismo ou cobertura eluvial. Esse manto e a zona fissurada subjacente, formam o que se pode denominar de um sistema livre, cujo nível de saturação ora se encontra no elúvio, ora no meio fissurado subjacente. Esse nível costuma ser pouco profundo e a sua *recarga* é assegurada pelos excessos de água de chuva. A magnitude dessa recarga (que se realiza por infiltrações a partir do solo), depende, entre outros fatores, da natureza do solo e do tempo de permanência dos excedentes do balanço hídrico. Esse tempo, por sua vez, depende da declividade do solo, da cobertura vegetal, e de outros fatores. Na verdade, são inúmeros os fatores ambientais passíveis de influir nesse processo.

Também, em áreas úmidas, pode ocorrer uma *descarga natural* de água subterrânea das zonas fissuradas para o solo ou para cursos de água superficial. Em muitos casos, podem até mesmo surgir *fontes perenes*, cuja descarga tem magnitude que depende, entre outros fatores, das dimensões do reservatório fissural, das condições topográficas, da permeabilidade das fraturas.

No sistema aquífero "elúvio-fissuras", tanto a recarga quanto a descarga natural de água subterrânea, são indicativas de conexões hidráulicas entre os dois meios. No entanto, o conhecimento dos processos hidráulicos envolvidos e dos vários fatores, geológicos e topográficos, que controlam o fluxo, num sentido ou no outro, ou seja, das *variáveis hidrogeológicas*, ainda é considerado precário. Isso foi comprovado por observações de nível d'água, sistemáticas e de longa duração, no manto de intemperismo de uma região de rochas cristalinas, sob o qual, no domínio rochoso fissurado, foi escavado um túnel, com 80 km de extensão, no sul da Suécia (Olofsson, 1994).

O estudo das variações do nível da água subterrânea no manto eluvial, acima do túnel, envolveu nada menos que 18 anos (1969-1987) de medições sistemáticas mensais, numa rede de quase 400 poços amazonas e tubulares, distribuídos ao longo da linha em que foi construído o túnel. Foram selecionadas 10 (dez) variáveis geológicas e topográficas, medidas na área, num raio de até 1 km do túnel; 13 (treze) variáveis geológicas no túnel; 7 (sete) outras variáveis, descrevendo elementos do túnel e dos poços observados. Mapas topográficos e geológicos detalhados foram elaborados para condensar as diversas informações levantadas, numa tentativa de avaliação dos fatores geológicos e topográficos influentes no "declínio" esperado para o nível d'água no elúvio. Esse declínio, é óbvio, deveria ocorrer, por conta das filtrações verticais descendentes, do manto eluvial para o túnel, supostamente em conexão hidráulica.

A julgar pelo relato de Olofsson (1994 op. cit.), pode-se dizer que o resultado do estudo estatístico⁴ foi decepcionante, na medida em que apenas 15% do declínio poderia ser explicado através das variáveis selecionadas. Em suma, depois de trabalhar com 30 (trinta) diferentes variáveis, Olofsson (1991) afirma que uma das mais importantes explicações, para o que qualifica de "resultado insatisfatório", é a falta de informações no contato elúvio-rocha mãe, cujas variáveis não puderam ser incluídas no modelo de regressão. Conclui, finalmente (Olofsson, 1994), que o fluxo de água subterrânea do solo para a rocha só ocorre em *pontos específicos*, onde existe uma combinação favorável de condições hidrogeológicas.

A exemplo do que foi feito para região semi-árida, a descrição das condições de ocorrência da água subterrânea em zona úmida, no Brasil, será também apresentada a nível de subprovíncia. Neste sentido serão analisados resultados obtidos em poços perfurados na subprovíncia Escudo Oriental Sudeste, no Estado de São Paulo, e na Província Paraná. Ainda não se conhece nenhuma subdivisão dessa Província em subprovíncias e por isso o assunto é agora motivo de consideração, através da proposição que será formulada em seguida.

A Província Paraná (7), figura 1.2, corresponde à bacia do Paraná. É constituída a de sedimentos, sobretudo clásticos, que vão do Siluriano ao Cretáceo Superior, extensivamente recobertos pelos derrames basálticos da Formação Serra Geral. Com *porosidade intergranular*, o principal aquífero da bacia é o sistema Botucatu, de grande potencialidade. Secundariamente, destacam-se os aquíferos Furnas, Guatá, Aquidauana, Bauru e Caiuá. Com *porosidade fissural*, o basalto Serra Geral parece comportar-se como aquífero singular, armazenando águas em fissuras, nos contatos "intertrapps" e em ocorrências de sedimentos inter e intra trapianos. Segundo relatos de alguns autores (Manoel Filho, 1973; Manoel Filho & Bezerra, 1976; Fraga, 1986), parâmetros obtidos em testes de bombeamento sugerem que os sedimentos inter trapianos e as zonas de contato entre derrames basálticos, representam meios aquíferos bem mais promissores do que os basaltos fissurados, nos quais o comportamento do fluxo para poços se assemelha ao das demais rochas ígneas fraturadas do contexto regional.

A nível da Província Hidrogeológica Paraná, face às diferenças de litologia e também de condições de armazenamento e circulação das águas subterrâneas, é

⁴ Análise de regressão linear múltipla (ARLM) das variáveis selecionadas, através de análise de variância (ANOVA) e regressão linear simples (RLS).

conveniente estabelecer, para fins descritivos e comparativos, uma subdivisão em, pelo menos, duas subprovíncias hidrogeológicas: i) *Serra Geral*, correspondente à Formação Serra Geral, com porosidade fissural; ii) *Guaraní*, com porosidade intergranular, englobando o sistema Pirambóia-Botucatu e ainda os aquíferos Furnas, Guatá, Aquidauana, Bauru e Caiuá. A denominação "Guaraní", aqui proposta como subprovíncia hidrogeológica, na bacia do Paraná, se inspira na combinação "aquífero Guaraní", sugerida por Rocha (1996), para o sistema Pirambóia (Buena Vista, no Uruguai) - Botucatu (Misiones no Paraguai; Tacuarembó no Uruguai e Argentina).

Subprovíncia Escudo Oriental Sudeste: (62)

A subprovíncia Escudo Oriental Sudeste é constituída de rochas cristalinas do embasamento e, neste sentido, não difere da subprovíncia Escudo Oriental Nordeste. Mas, ao contrário desta última, é caracterizada por um clima mais úmido, com precipitações mais regulares e mais elevadas, que favorecem melhores possibilidades hídricas, tanto em termos de quantidade quanto de qualidade das águas subterrâneas. Aqui, o manto de cobertura eluvial pode atingir dezenas de metros de espessura e se constitui numa fonte potencial de recarga para as fendas subjacentes.

As características dessa subprovíncia são bem conhecidas no Estado de São Paulo, onde foram desenvolvidos estudos hidrogeológicos baseados em cadastramento de poços tubulares. Cavalcante (1990), cadastrou 79 poços tubulares (dos quais apenas 44 com dados completos de vazão e rebaixamento), 157 poços escavados e 12 fontes, na região de Atibaia. Menegasse (1991), apresenta um cadastro de 51 poços tubulares, perfurados a noroeste da Grande São Paulo, dos quais apenas 41 com dados completos de vazão e rebaixamento.

Dos mencionados cadastros, foi possível selecionar 85 poços, com dados completos de vazão e rebaixamento, a partir dos quais é feita a descrição a seguir, contemplando: a profundidade dos poços e a espessura do manto de intemperismo; os níveis estático e dinâmico; as vazões e as profundidades das fendas produtoras mais profundas; a produtividade de aquífero. A análise estatística univariada das informações disponíveis é condensada na tabela (2.4).

Profundidade dos poços

A profundidades dos poços (amostra de 84 valores), varia de 10 a 240 m. A distribuição de frequência (figura 2.11a), tem mediana de 150 m e 75% dos valores são menores ou iguais a 160 m, que também representa o valor modal. Existem ainda 25% de valores de profundidade menores ou iguais a 100 m.

Tabela 2.4 - Parâmetros estatísticos de algumas características de 85 poços perfurados na subprovincia Escudo Oriental Sudeste, no Estado São Paulo (Fontes dos dados: Cavalcante, 1990; Menegasse, 1991)

Parâmetro	PROF m	MCE m	NE m	ND m	Q m ³ /h	FMP m
N. Total de poços	85	85	85	85	85	85
Poços usados	84	75	85	85	85	35
Média	133,88	37,38	12,23	72,95	19,47	106,51
Variância	2753,52	347,56	161,96	1665,06	1006,71	2679,90
Desvio Padrão.	52,47	18,64	12,72	40,80	31,72	51,76
CV (%)	39,19	49,86	104,05	55,93	162,96	48,60
Assimetria	-0,36	1,61	1,42	0,32	2,48	0,40
Curtose	2,79	7,00	4,45	2,63	8,41	2,51
Mínimo	10,00	8,00	0	5,30	0,10	16,00
25% ≤	100,00	22,00	2,65	35,25	3,22	70,00
Mediana	150,00	33,00	6,50	74,00	6,70	96,00
75% ≤	160,00	45,00	17,37	10,6	16,00	144,25
Máximo	240,00	120,00	55,00	200,00	150,00	220,00

PROF = profundidade; MCE = manto de cobertura eluvial; NE = nível estático; ND = nível dinâmico;

Q = vazão; FMP = fenda mais profunda.

Fig. 2.11a - Histograma de frequência da profundidade de poços, baseado em amostra de 84 poços, na subprovincia Escudo Oriental Sudeste, no Estado de São Paulo.

Espessura do manto eluvial

A espessura do manto de intemperismo varia numa faixa muito ampla, entre 8 e 120 m (3ª coluna da tabela 2.4). Mas, 75% dos valores são menores ou iguais a 45 m.

Fig. 2.11b - Histograma de frequência da espessura do manto eluvial, baseado em amostra de 75 poços, na subprovíncia Escudo Oriental Sudeste, no Estado de São Paulo.

A distribuição de frequência (figura.2.11b), é assimétrica, tem coeficiente de variação próximo de 50% e revela uma espessura mediana de 33 m, que corresponde a um valor 11 vezes superior à espessura mediana do manto de cobertura indiferenciada na região cristalina semi-árida (subprovíncia Escudo Oriental Nordeste). É, pois, uma diferença marcante. A comparação, todavia, só não é mais interessante porque as amostras possuem tamanhos muito diferentes (apenas 75 poços na zona úmida, contra 799 poços na zona semi-árida, conforme se pode ver nas tabelas 2.4 e 2.3, respectivamente.

Nível estático

A profundidade do nível de saturação das águas subterrâneas, varia entre 0 e 55 m, porém 75% dos valores são menores ou iguais a cerca de 17 m.

Fig. 2.12a - Histograma de frequência de profundidade do nível estático, baseado em amostra de 85 poços, na subprovincia Escudo Oriental Sudeste, no Estado de São Paulo.

A distribuição de frequência, ilustrada no histograma da figura 2.12a, exibe forte assimetria, e coeficiente de variação de 104%. A profundidade mediana do nível estático é de 6,5 m enquanto que a moda é igual a 5 m, o que indica níveis de água relativamente rasos.

Coeficiente de carga estática do manto eluvial

Na subprovincia Escudo Oriental Sudeste, o nível das águas subterrâneas se encontra, em 94,7% dos casos, no manto eluvial, havendo apenas 5,3% de coeficientes negativos, mostrando níveis no domínio fissural (fig. 2.12b).

Fig. 2.12b - Distribuição do coeficiente de carga estática no manto de intemperismo, para uma amostra de 75 poços, da subprovincia Escudo Oriental Sudeste.

Níveis dinâmicos e fendas mais profundas

Os níveis dinâmicos dos poços oscilam entre 5,3 e 200 m; a distribuição de frequência (figura 2.13a), é quase normal, com mediana de 74 m e média aproximada de 73 m; 75% dos valores são menores ou iguais a 105,6 m.

Fig. 2.13a - Histograma de frequência de profundidade do nível dinâmico, baseado em amostra de 85 poços, na subprovíncia Escudo Oriental Sudeste, no Estado de São Paulo.

As fendas mais profundas situam-se entre profundidades de 16 e 220m; a distribuição de frequência (figura 2.13b), é pouco assimétrica, com coeficiente de variação de 48,6%, mediana de 96 m e média igual a 106,5 m. Numa amostra de apenas 35 poços com informações, 75% dos valores são menores ou iguais a 144,2 m.

Fig. 2.13b- Histograma de frequência de profundidade da fenda produtora mais profunda, baseada em amostra de 75 poços, na subprovíncia Escudo Oriental Sudeste, no Estado de São Paulo.

Coefficiente de carga dinâmica da fenda produtora mais profunda

A posição dos níveis dinâmicos, em relação à FMP, é mostrada na figura 2.14, onde se observa que 17,1% dos valores (ou 6/35) correspondem a cargas dinâmicas negativas.

Fig. 2.14 - Distribuição do **coeficiente de carga dinâmica**, na fenda mais profunda, para uma amostra de 75 poços, na subprovíncia Escudo Oriental Sudeste, no Estado de São Paulo.

Vazões dos poços

A distribuição de frequência de vazão dos poços (fig. 2.15) nessa subprovíncia úmida, segue o mesmo padrão assimétrico, verificado em outras regiões do país e do mundo, típico dos meios fissurais, a saber: forte assimetria e forte coeficiente de variação (162,9%). No caso, os valores observados oscilam entre 0,1 e 150 m³/h. Todavia, 84,9% das vazões são menores ou iguais a 25 m³/h. A moda não passa de 10 m³/h.

Fig. 2.15 - Histograma de frequência de **vazão dos poços**, em amostra de 85 poços, na subprovíncia Escudo Oriental Sudeste, no Estado de São Paulo.

Produtividade de aquífero

A produtividade de aquífero na subprovíncia Escudo Oriental Sudeste (62), com base em amostra de 85 poços, é muito variável. As vazões mais frequentes (65,1% dos poços), ocorrem na faixa de 2,5 a 25 m³/h, ou seja, de produtividade *fraca a média*. Em ordem decrescente de frequência, aparecem valores nas faixas de produtividade *muito fraca* (18,6%), *média a elevada* (12,8%) e *muito elevada* (3,5%).

Fig. 2.16 - **Produtividade de aquífero**, baseada em amostra de 85 poços, na subprovíncia Escudo Oriental Sudeste, no Estado de São Paulo

Subprovíncia Serra Geral (71)

Baseado na análise de uma amostra de 225 poços tubulares, perfurados na Formação Serra Geral, Fraga (1986) propõe, a nível regional, no Estado do Paraná, um zoneamento do sistema aquífero Serra Geral (aqui denominado subprovíncia Serra Geral), em: *Serra Geral Norte*, mais promissor, e *Serra Geral Sul*, de menor produtividade. Esse autor porém, não destaca no seu cadastro, os poços pertencentes a cada uma das unidades por ele propostas. Assim sendo, a análise feita a seguir (baseada em 198 poços, com dados completos de vazão e rebaixamento) da qual resultaram os parâmetros estatísticos mostrados na tabela 2.5, não obedece ao referido zoneamento, mas se aplica à subprovíncia, em sua totalidade.

Tabela 2.5 - Parâmetros estatísticos das características de poços perfurados na subprovincia Serra Geral, no Estado do Paraná (dados de Fraga, 1986)

Parâmetro	PROF m	DIAM mm	Q m ³ /h	REB m	y m ³ /h.m	FMP m
N. Total de poços	198	198	198	198	198	198
Poços usados	197	198	198	198	198	187
Média	123,23	191,91	26,61	36,69	1,55	71,40
Variância	935,84	391,22	978,87	589,73	4,10	1125,33
Desvio Padrão.	30,54	19,77	31,28	24,28	2,02	33,54
CV (%)	24,78	10,30	105,63	66,18	130,24	46,98
Assimetria	0,17	-1,33	2,66	0,99	2,09	0,52
Curtose	2,89	4,28	13,68	3,65	7,95	2,59
Mínimo	47,00	150,00	0,20	2,00	0	10,00
25% ≤	100,00	200,00	8,75	17,84	0,22	43,00
Mediana	121,00	200,00	20,00	33,11	0,65	67,00
75% ≤	150,00	200,00	40,00	52,55	1,99	90,00
Máximo	234,00	250,00	221,00	120,00	11,47	165,00

PROF = profundidade; DIAM = diâmetro; Q = vazão; REB= rebaixamento; y= capacidade específica;

FMP = fenda mais profunda.

Profundidade dos poços

Varia de 47 a 234, porém a mediana é de 121m e o valor modal é de 150 m, conforme se pode observar na distribuição de frequência ilustrada pelo histograma da figura 2.17.

Fig. 2.17 - Histograma de frequência da profundidade de poços, baseado em amostra de 197 poços, na subprovincia Serra Geral, no Estado do Paraná.

Diâmetro dos poços

O diâmetro padrão dos poços é de 200 mm (82%), havendo ainda 17% de poços com diâmetro de 150 mm e apenas 1% com diâmetro de 250 mm (figura 2.18).

Fig. 2.18 - Histograma de frequência do diâmetro de poços, baseado em amostra de 198 poços, na subprovincia Serra Geral, no Estado do Paraná.

Fendas produtoras mais profundas

A distribuição de frequência da profundidade da fenda produtora mais profunda dos poços (figura 2.19), é bastante próxima da normal, com média e mediana da mesma ordem de grandeza (próximas de 70 m).

Fig. 2.19 - Histograma de frequência da profundidade da fenda produtora mais profunda, baseado em amostra de 187 poços, na subprovincia Serra Geral, no Estado do Paraná.

Vazões dos poços

Mais da metade dos poços (51%) apresenta vazões inferiores a 25 m³/h. A distribuição de frequência (figura 2.20), é assimétrica, com mediana de 20 m³/h e coeficiente de variação de 105,6%.

Fig. 2.20 - Histograma de frequência da vazão de poços, baseado em amostra de 198 poços, na subprovíncia Serra Geral, no Estado do Paraná.

Produtividade de aquífero

É mostrada na figura 2.21, onde se observa que as produtividades mais frequentes se encontram nas faixas de 2,5 a 25 m³/h e de 25 a 100 m³/h

Fig. 2.21 - Produtividade de aquífero, baseada em amostra de 198 poços, na subprovíncia Serra Geral, no Estado do Paraná

A distribuição da produtividade de aquífero na subprovincia Serra Geral (71) em ordem decrescente de frequência, é a seguinte: *fraca a média* (51%); *média a elevada* (34,9%); *muito fraca* (7,1%); *muito elevada* (2,5%).

2.3 - AQUÍFERO COM POROSIDADE SECUNDÁRIA E CONDUTOR HIDRÁULICO

Gustafson e Krásný (1994) parecem ter razão ao questionar a aplicação ou extensão do termo **aquífero** (definido por Meinzer, 1942, para as formações geológicas granulares ou meios porosos homogêneos), no caso dos reservatórios de água subterrânea existentes em formações heterogêneas, como por exemplo, nas rochas cristalinas ígneas e metamórficas fraturadas e em ambientes cársticos, para os quais consideram ser mais apropriada a denominação **condutor hidráulico**.

Do ponto de vista da ocorrência da água subterrânea nas formações geológicas, o termo **aquífero** (do latim "portador de água") está consagrado como designação para um reservatório subterrâneo capaz de "armazenar" e "transmitir" água, independente das suas dimensões, porosidade e/ou continuidade.

2.3.1 - Conceito de aquífero com porosidade secundária

Do ponto de vista da hidráulica de poços, pode-se admitir a existência de pelo menos três tipos de reservatórios subterrâneos:

- *primário* - com porosidade primária, devida aos interstícios intergranulares criados durante o processo que originou a própria rocha e no qual é sempre possível admitir, na matriz que forma o esqueleto sólido da rocha, uma velocidade macroscópica média representativa de um meio poroso contínuo.
- *secundário* - com porosidade exclusivamente secundária produzida por fraturas ou por processos de dissolução em rochas com porosidade primária desprezível. Neste caso o meio poroso (criado depois da origem da rocha) é marcado por forte descontinuidade hidráulica e nele não se pode definir uma velocidade macroscópica média, representativa de um meio fraturado contínuo.
- *misto* - com dupla porosidade, ou seja, com porosidade primária e secundária, constituindo dois meios contínuos superpostos, em cada um dos quais é possível definir uma velocidade média macroscópica. Neste caso, estudam-se dois sistemas de fluxos fictícios, um no domínio dos poros e outro no domínio das fraturas.

Nos reservatórios subterrâneos com porosidade secundária de fraturas, como é o caso das rochas ígneas e metamórficas, ou com porosidade secundária de dissolução, como acontece nas zonas cársticas, o meio poroso assume um comportamento errático. Assim sendo, a aplicação do termo **aquífero** é aqui considerada imprópria na análise de fluxo para poços perfurados em reservatórios subterrâneos cujas propriedades hidráulicas primárias se afigurem como desprezíveis em relação às secundárias.

Em um aquífero de porosidade primária, a capacidade de armazenar e transmitir a água está ligada à matriz de uma formação geológica, que possui dimensões e limites perfeitamente previsíveis e propriedades hidráulicas homogêneas, que podem ser definidas a partir de um Elemento de Volume Representativo (EVR) de um meio poroso contínuo (BEAR, 1972).

No caso das rochas cristalinas fraturadas, a capacidade de armazenar e transmitir a água está ligada a estruturas secundárias de quebraimento da rocha e não à própria rocha. As propriedades hidrogeológicas dessas estruturas, no tocante a dimensões e limites, são consideradas imprevisíveis e, no que se refere aos parâmetros hidráulicos, se caracterizam por notável variabilidade de um ponto para outro dentro de uma mesma unidade litológica. A condutividade hidráulica, por exemplo, determinada através de testes clássicos de permeabilidade, pode apresentar diferenças de várias ordens de magnitude entre pontos situados a distâncias relativamente pequenas.

2.3.2 - Conceito de condutor hidráulico

Pelas profundas diferenças de características geológicas e geométricas existentes entre as formações sedimentares e as rochas cristalinas fraturadas, Gustafson e Krásný (1994) consideram que muitos termos e conceitos normalmente empregados na hidrogeologia deveriam ser revisados ou modificados, no caso dos meios muito heterogêneos e descontínuos. O termo **aquífero**, por exemplo, no caso das rochas cristalinas fraturadas, deveria ser substituído pela denominação **condutor hidráulico**. Já o conceito de EVR, em termos gerais, talvez nem devesse ser formulado para as rochas cristalinas fraturadas, posto que seriam necessários volumes da ordem de milhares de m³ para produzir um valor estável da condutividade hidráulica efetiva [Gustafson (1986, apud Gustafson & Krásný 1994)].

A denominação **condutor hidráulico**, é aqui aplicada para o sistema "poço-blocos-fendas associadas" formado: pelo poço; pelos blocos (a priori não porosos), os quais são delimitados pelas fendas direta ou indiretamente conectadas com o poço; pelas

próprias fendas conectadas com o poço. Admite-se que essa denominação é mais apropriada do que o termo **aquífero**, para descrever o reservatório subterrâneo conectado com o poço através da **superfície de controle** (parede do poço) criada pela perfuração do maciço rochoso fraturado ou cárstico. A **transmissividade** do referido sistema pode ser identificada através de testes de bombeamento, independente de ser este condutor constituído por uma única fratura ou por uma rede de fraturas ou de canais de dissolução. As propriedades hidráulicas deduzidas dos testes se aplicam, portanto, ao condutor hidráulico e não ao reservatório subterrâneo ou aquífero, cujo domínio, por hipótese, é desconhecido.

Aqui, a combinação **aquífero fraturado** ou **aquífero fissural**, de Costa (1986), se aplica globalmente, a nível regional, ao reservatório de água subterrânea existente em uma formação de rochas ígneas ou de metamórficas do embasamento, a exemplo do que acontece com a combinação **aquífero cárstico**, que se aplica sem contestação aos reservatórios de água subterrânea encontrados nas rochas carbonáticas. Este sistema tem extensão lateral infinita, espessura infinita, é marcadamente heterogêneo e descontínuo e tem geometria desconhecida. Visto por esse ângulo, fica difícil caracterizar o domínio 3D de fluxo desse aquífero e portanto os seus parâmetros hidráulicos não podem ser identificados.

Quando um poço perfurado nesse aquífero não intercepta qualquer fenda produtora, ou quando nenhuma entrada de água acontece no evento perfuração, pode-se dizer que os parâmetros do condutor hidráulico são nulos. Nem por isso o aquífero deixa de existir e nem se pode dizer que sejam nulas as suas propriedades hidráulicas no ponto, na medida em que o simples aprofundamento do poço pode produzir um condutor hidráulico com parâmetros diferentes de zero. Ou seja, ocorrendo uma ou mais fendas produtoras de água, o conjunto poço-fendas passa a constituir um condutor hidráulico. O poço, que por hipótese nunca poderá penetrar totalmente o aquífero, define uma **superfície elementar de controle**, considerada como representativa do domínio em relação ao qual as análises dos testes dos condutores hidráulicos (conjunto poço-blocos - fendas) podem ser feitas e os correspondentes parâmetros hidráulicos identificados.

Entende-se, dessa forma, que a capacidade de transmissão de água deduzida de um teste de bombeamento em um poço, **não pode ser considerada como uma característica do aquífero fissural, mas tão somente do sistema de fendas (ou condutor hidráulico) direta ou indiretamente conectadas com o poço testado**. Isto porque, não se admite a hipótese de poço totalmente penetrante no aquífero fissural. Os parâmetros do condutor hidráulico, deduzidos do teste, como, por exemplo, a

transmissividade, a condutividade hidráulica, a porosidade e a abertura média das fendas, têm, portanto, um significado que se restringe ao próprio poço.

2.3.3 - Conceito de condutor hidráulico fractal

Aceitando-se, a partir das considerações anteriores, que o conjunto poço-blocos-fendas associadas, representa um condutor hidráulico, a capacidade específica de poços em meio heterogêneo pode ser encarada como uma função $y = Q/s_w$ do condutor hidráulico, onde:

- Q é uma descarga bombeada, geralmente variável (embora possa ser constante).
- s_w é o rebaixamento do nível d'água no poço.

O conceito de fractais, criado por Mandelbrot (1967), vem tendo, a cada dia, mais e mais aplicações nas ciências em geral, englobando conceitos que vão desde a matemática pura até os aspectos práticos da engenharia. Deixando os detalhes para o capítulo 4, e seguindo Turcotte (1992), denominamos de **conjunto fractal**, a um conjunto dado pela equação:

$$N_n = \frac{C}{r_n^D} \quad (2.2)$$

onde :

N_n = número de objetos, ou fragmentos

r_n = dimensão linear característica do objeto

C = constante de proporcionalidade

D = dimensão fractal

A dimensão fractal pode ser inteira e, quando isto acontece, tem o mesmo significado da dimensão Euclidiana. Em geral, porém, a dimensão fractal não é inteira, mas fracionária, sendo esta a origem do termo fractal, segundo Turcotte (op.cit)

A capacidade específica, conforme foi comprovado a partir de testes de produção, realizados sob condições de fluxo variável em poços perfurados no granito Meruoca, município de Sobral, Ceará, pode ser aproximada por uma lei de potência, do tipo:

$$y^* = \frac{Q^*}{s_w^D} \quad (2.3)$$

onde:

- y^* = capacidade específica ajustada, do condutor hidráulico [$L^2 T^{-1}$]
 Q^* = vazão fractal uniforme ($\equiv$ constante) [$L^{2+D} T^{-1}$]
 D = dimensão fractal do fluxo

Inspirados no conceito expresso pela equação (2.2), matematicamente idêntica à equação (2.3), e sendo os meios heterogêneos essencialmente fragmentados, diremos que **um condutor hidráulico é fractal**, se a capacidade específica do poço por ele representado constituir um conjunto fractal, isto é, um conjunto de dimensão D , definido pela expressão:

$$D = \frac{\log\left(\frac{Q^*}{y}\right)}{\log s_w} \quad (2.3)$$

A representação gráfica da equação (2.3), em um gráfico dílog, é uma família de retas paralelas, com declividade $-D$ e vazão fractal constante Q^* , cujo valor se pode ler no ponto de intersecção das retas com a linha ordenada, na abcissa de rebaixamento unitário. Isso é ilustrado na figura 2.22, na qual foram plotados os dados de capacidade específica de 814 poços perfurados na subprovincia Escudo Oriental Nordeste e que apresentaram vazões variáveis de 0,056 a 36 m³/h.

Fig. 2.22 - Capacidade específica de poços perfurados na subprovincia Escudo Oriental Nordeste, nos Estados da Paraíba e Rio Grande do Norte.

A lei de potência (2.3), ajustada para as vazões de 0.5, 1, 2, 3, 4.5, 9, 18 e 24 m³/h, é representada pelas retas mostradas na figura 2.22. As linhas retas representam a capacidade específica fractal, ajustada à capacidade específica observada nos poços de vazão constante. Para explicitar mais detalhadamente o assunto, os dados utilizados no ajuste correspondente à linha de vazão constante $Q^* = 3 \text{ m}^3/\text{h}$, são mostrados na tabela 2.6.

Tabela 2.6 - Capacidade específica de poços da subprovincia Escudo Oriental Nordeste, com vazão constante de 3 m³/h.

Cadastro*	PROF. m	NE m	ND m	Q m ³ /h	Y = Q/(ND-NE) m ³ /h.m	Litologia
2223	40	3.63	18.53	3.000	0.201	filito
2231	50	1.58	17.53	3.000	0.188	gnaisse
1223	60	3.43	18.86	3.000	0.194	gnaisse
2355	40	2.34	16.52	3.000	0.211	gnaisse
2067	40	2.13	24.00	3.000	0.137	gnaisse
1113	58	14.00	18.08	3.000	0.735	micaxisto
1153	60	3.20	8.27	3.000	0.591	gnaisse
2289	40	2.15	8.18	3.000	0.497	gnaisse
1080	60	5.50	10.50	3.000	0.600	gnaisse
1029	60	10.00	35.80	3.000	0.116	gnaisse
1336	60	17.00	27.55	3.000	0.284	granito
1420	58	2.00	16.94	3.000	0.200	gnaisse
2296	50	4.22	13.14	3.000	0.336	filito
1105	60	1.70	36.00	3.000	0.087	gnaisse
1026	60	8.00	22.09	3.000	0.213	gnaisse
1033	60	2.56	4.60	3.000	1.428	granito
1415	48.6	22.80	26.90	3.000	0.731	gnaisse
1248	60	12.00	17.10	3.000	0.588	granito
1367	63.5	4.70	15.88	3.000	0.268	gnaisse
1252	58	9.00	19.41	3.000	0.288	migmatito
2068	40	3.30	10.00	3.000	0.448	gnaisse
1243	45.4	4.70	8.30	3.000	0.833	gnaisse
1047	52	2.60	7.07	3.000	0.671	gnaisse
1239	60	15.30	41.55	3.000	0.114	gnaisse
1347	60	5.55	24.65	3.000	0.156	gnaisse
1306	72	11.72	23.86	3.000	0.247	quartzito
1255	58	20.10	24.16	3.000	0.721	gnaisse
1179	60	12.85	17.74	3.000	0.613	gnaisse
1303	54.5	6.50	10.23	3.000	0.804	micaxisto
1343	60	0.30	13.29	3.000	0.231	gnaisse
1278	52	9.50	11.25	3.000	1.734	migmatito
1259	60	10.50	23.81	3.000	0.225	gnaisse
1411	45	3.25	23.02	3.000	0.143	gnaisse
1086	66	3.00	21.49	3.000	0.162	gnaisse

● O número de cadastro é de Costa, 1986.

Em termos gerais, o valor de D reflete as variações da vazão bombeada com o tempo e caracteriza a dimensão do fluxo. Quando a vazão bombeada varia de forma crescente, $D < 1$; quando é constante, $D = 1$ e quando varia de forma decrescente, $D > 1$. Os ajustes foram feitos apenas para os valores de vazão constante, dando como resultado $Q^*=C$ e $D=1$, ou seja, mostrando que o fluxo uniforme tem dimensão igual à unidade. A capacidade específica, obedece à lei de potência (2.3), e por isso é aqui chamada de capacidade específica *fractal*, mesmo quando a dimensão D assume um valor *integral*.

Conforme se observa, foram incluídas na tabela 2.6, a profundidade (na 2ª coluna) e a litologia dos poços (na última coluna), com o objetivo de verificar se, por acaso, essas variáveis poderiam influir. Os níveis, estático e dinâmico dos poços, também estão presentes porque definem o rebaixamento $ND-NE$.

O ajuste correspondente à linha de vazão constante $Q = 3 \text{ m}^3/\text{h}$, que aparece na figura 2.22, é mostrado, em destaque, na figura 2.23. Além de permitirem a comprovação da validade da lei (2.3) esses dados revelam que, no domínio cristalino, e numa mesma subprovíncia hidrogeológica, poços de uma determinada vazão podem ocorrer em todas as litologias e profundidades. Em outras palavras, nem a profundidade dos poços, nem a litologia, neste caso, podem ser consideradas como "variáveis hidrogeológicas", ou como "fatores influentes" na produtividade do poço.

Figura 2.23 - Lei de potência (característica da capacidade específica fractal), ajustada aos dados de 34 poços de vazão constante e igual a $3 \text{ m}^3/\text{h}$, na subprovíncia Escudo Oriental Nordeste, nos Estados da Paraíba e Rio Grande do Norte.

2.4 - GEOMETRIA E HIDRÁULICA DOS RESERVATÓRIOS SUBTERRÂNEOS FRATURADOS

Do ponto de vista hidrogeológico é preciso avançar na compreensão da resposta dos meios fraturados aos diversos tipos de intervenções que geralmente se fazem sobre eles na busca de soluções para problemas práticos. São, por exemplo, questões ligadas à geotécnica (barragens, túneis, minas), à produção de energia (engenharia de petróleo, geotermia), à segurança ambiental (disposição de resíduos nucleares, injeção de resíduos perigosos em geral), à produção e conservação de recursos hídricos (exploração de água subterrânea, recarga artificial) etc. Na solução desses tipos de problemas a caracterização do domínio 3D do aquífero fissural, ainda continua desafiando os pesquisadores. Isto porque a variedade de padrões de fraturamento em um maciço rochoso pode tornar o domínio hidrogeológico tridimensional tão complexo que qualquer tentativa de descrevê-lo em detalhe pode ser uma tarefa muito difícil.

As rochas cristalinas apresentam-se como um meio ou sistema descontínuo, heterogêneo, formado por blocos rochosos de tamanhos irregulares, separados por fraturas cuja magnitude pode variar, em escala macroscópica, de poucos centímetros até quilômetros de extensão. Essas fraturas ou fissuras (incluindo juntas e falhas), nas rochas ígneas e metamórficas e até mesmo zonas de dissolução, nas rochas carbonáticas, cortam os maciços rochosos segundo as mais diversas orientações espaciais, formando blocos tridimensionais de dimensões e formas simplesmente imprevisíveis. Elas constituem os espaços vazios onde a água subterrânea fica armazenada e através dos quais eventualmente circula.

As aberturas desses espaços vazios variam muito, não apenas de uma fenda para outra mas também dentro de uma mesma fratura, a qual pode exibir pontos de contato entre blocos adjacentes. A presença desses pontos aumenta a tortuosidade dos espaços vazios e cria perdas de carga localizadas durante o escoamento da água através das fraturas.

A nível meso e macroscópico, a *análise geométrica* ou estrutural, é representada por um conjunto de métodos, usados em estudos de campo, para estabelecer, além da forma, extensão e arranjo ou *estilo* de estruturas em uma área mapeada, a sequência temporal em que tais estruturas se desenvolveram. A interpretação é feita com base na hipótese de que todas as estruturas, de um dado estilo tectônico, pertencem à mesma sequência de eventos de deformação (geração). Mas, em áreas muito complexas, como acontece no domínio cristalino, nem sempre é possível relacionar, univocamente, estilo

e geração. Não obstante, na falta de melhores critérios, o estilo tectônico ainda continua sendo a melhor base para o agrupamento de estruturas (Hobbs, et al. 1979).

2.4.1 - Métodos de análise geométrica em domínios 2D

De um modo geral, segundo Hobbs et al. (op.cit.), distinguem-se três escalas de investigação: *macroscópica*, envolvendo corpos rochosos que não podem ser observados em toda a sua extensão e cuja estrutura somente pode ser reconstituída a partir de dados levantados em diferentes pontos; *mesoscópica*, aplicável a massas rochosas que podem ser observadas, em toda a sua extensão a olho desarmado, incluindo, portanto, corpos cujo tamanho pode variar desde uma amostra de rocha até um afloramento; *microscópica*, que analisa estruturas ao microscópio, examinando, por exemplo, deformações de grãos.

Em uma das mais recentes e completas revisões dos conhecimentos sobre as rochas fraturadas, Jouanna (1993) apresenta um sumário dos métodos e técnicas de investigação de fraturas, envolvendo domínios bidimensionais (2D) e tridimensionais (3D). Aqui, trataremos apenas dos métodos 2D, que analisam informações obtidas numa *superfície de controle* do maciço rochoso (figura 2.24)

Figura 2.24- Possíveis domínios de investigação 2D de rochas fraturadas. A geometria do domínio Γ (3D), do aquífero fissural é suposta desconhecida. Modificado de Jouanna (1993)

São exemplos de domínios 2D: superfícies naturais de afloramentos de rochas (Σ 1); superfícies de maciços rochosos expostos em taludes naturais ou em cortes de estradas (Σ 2); superfícies de maciços expostos em trincheiras (Σ 3), em túneis ou minas

($\Sigma 4$). Todos esses tipos de superfícies podem ser observados diretamente em campo ou através de sensoriamento remoto, utilizando reflexão e refração de ondas eletromagnéticas, ou seja, através dos chamados métodos de teledetecção.

Um outro tipo de superfície fraturada é aquele que ocorre em poços ($\Sigma 5$), cuja observação pode ser feita de duas maneiras: i) exame de testemunhos da rocha; ii) através de perfilagens usando sensores sísmicos, ultrassônicos, ou elétricos, com interpretação de registros gráficos ou diretamente através de imagens de TV. O mapeamento de superfícies ($\Sigma 1$) e ($\Sigma 2$) costuma ser utilizado em praticamente todos os tipos de pesquisa de meios fraturados, devido à facilidade de acesso às mesmas. Na locação de poços, por exemplo, é prática usual investigar-se, tão somente, esses dois tipos de superfícies fraturadas.

Os mapeamentos de superfícies fraturadas, dos demais tipos, geralmente são usados para outras finalidades, principalmente em estudos de detalhe associados com problemas de transporte de solutos, para diversos fins (por exemplo, identificação e controle de plumas de poluição; identificação de locais apropriados para armazenamento de resíduos perigosos, etc).

Mapeamento de fraturas em campo

As exposições naturais de rochas ($\Sigma 1$) são superfícies nas quais a visibilidade das fraturas pode, muitas vezes, ser afetada pela cobertura vegetal ou pelo manto de intemperismo. Por isso, as melhores observações são sempre feitas em taludes ($\Sigma 2$), trincheiras ($\Sigma 3$), túneis, galerias ou shafts de minas ($\Sigma 4$).

A observação de campo, no mapeamento geológico, ainda é a mais fácil e menos onerosa forma de obter informações importantes sobre os maciços fraturados em afloramentos desprovidos de manto de intemperismo ou em superfícies criadas artificialmente. Em tais sítios o geólogo pode observar, tanto a olho desarmado quanto com o auxílio de lupa, as aberturas e os comprimentos das fraturas bem como as suas direções e mergulhos. Mas, com o desenvolvimento tecnológico, estão surgindo métodos topográficos que, com a ajuda de taqueômetros computadorizados, se constituem em meios cada vez mais rápidos para caracterização de redes de fraturas.

Mapeamento de fraturas por sensoriamento remoto

Nos últimos anos grandes progressos foram alcançados nas técnicas 2D de observação da superfície da terra, através de métodos de emissão e reflexão eletromagnética, cuja capacidade de resolução tem produzido resultados

surpreendentes no mapeamento de regiões fraturadas (Jouanna, 1993). Os procedimentos mais usuais nesse tipo de mapeamento todavia, utilizam imagens de satélite, imagens de radar e aerofotos convencionais.

Mapeamento de fraturas em poços

A perfuração de um poço permite acessar facilmente o ambiente fraturado, na medida em que dá origem, em profundidade, a uma superfície de controle (Σ) do maciço rochoso.

Nas observações de interesse para o estudo do fluxo de água subterrânea, as técnicas usadas procuram evidenciar, sobretudo, as discontinuidades (juntas, falhas, etc), muito mais do que a própria rocha ou os preenchimentos das suas fraturas. Essas técnicas, usadas principalmente na pesquisa de petróleo, além das clássicas *perfilagens geofísicas*, costumam envolver:

Testemunhagens:

A testemunhagem litológica permite detectar, visualizar e medir as discontinuidades que interceptam a parede do poço. Em alguns estudos especiais chega a ser feita de forma contínua.

Imagens:

Representam hoje uma outra alternativa de visualização das paredes do poço, permitindo medir a orientação e abertura das fendas. São utilizadas sobretudo em estudos específicos, para detectar, por exemplo, problemas construtivos de poços e auxiliar na recuperação dos mesmos. Entre os tipos usados incluem-se:

- i) **BHTV** "borehole televiewer" (Zemanek et al., 1970; Rambow, 1984; Dreesen, 1986). A análise das imagens é feita através de programas de computador que reproduzem a geometria 3D do poço e medem a orientação e abertura das fraturas.
- ii) **FMS**, "formation microscanner" ou microvarredura da formação, baseada em medidas de condutância da formação (Lloyd et al., 1986; Cull, 1988; Burke, 1989;
- iii) **MFP**, máquinas fotográficas de poço, cujas imagens de alta resolução, permitem até mesmo observar a dilatação de uma fratura durante e após um teste hidráulico.

2.4.2 - Métodos hidráulicos

Os testes ou ensaios hidráulicos são realizados em poços, para determinar as propriedades hidráulicas (T , S , K , S_s) de uma formação geológica ou de um condutor hidráulico. Esses testes apresentam características diferentes, de acordo com a área de conhecimento ou de interesse do problema.

Por exemplo, em domínios fraturados (notadamente na pesquisa de petróleo e nos estudos geotécnicos), geralmente são feitos em um intervalo, da ordem de 3m. Esse intervalo é isolado por obturadores e por uma válvula de controle, entre dois pontos quaisquer, da formação atravessada pelo poço, na zona de entrada de água que se deseja testar. Na hidrogeologia, são feitos em toda a extensão penetrada pelo poço. Pode-se utilizar um só poço de teste ou usar um poço de teste associado a um ou mais poços de observação. Os ensaios consistem na injeção ou bombeamento de uma certa vazão ou fluxo Q , de modo a produzir uma variação da pressão P , (ou da carga hidráulica h). Na engenharia do petróleo, a interpretação geralmente consiste em analisar a evolução da função $P(t)$ [ou $h(t)$] medida no nível da formação e daí deduzir as propriedades hidráulicas do condutor hidráulico testado.

Tipos de testes

De acordo com revisões bibliográficas recentes sobre testes hidráulicos em meios fraturados (Jouanna, 1993) e em meios pouco permeáveis (Camargos, 1994), os tipos de testes mais utilizados são:

- a) "**slug-test**" (ST) ou teste de variação instantânea [com aumento, por injeção (STI) ou redução, por extração (STE)] da carga piezométrica dentro do poço, em trecho aberto.
- b) "**teste de impulso**", também chamado "**teste pulso**" (TP) ou teste de variação instantânea [com aumento, por injeção (TPI) ou redução, por extração (TPE)] de carga piezométrica em trecho sob pressão (Bredehoeft e Papadopoulos, 1980).
- c) "**drill stem test**" (DST), teste de formação ou teste misto [Karasaki (1990, apud Camargos 1994)], realizado em um ciclo de duas fases: a primeira é chamada *fase de fluxo* (equivalente a um slug test de extração ou STE) e a segunda, *fase de recuperação*.

d) *teste de bombeamento*, no qual se extrai do poço uma certa vazão e se mede a evolução do rebaixamento do nível da água (variação da carga hidráulica) com o tempo. É o mais frequentemente usado na pesquisa de água subterrânea e o que foi utilizado nos trabalhos de campo (item 1.3).

e) *teste harmônico* (Jouanna & Fras, 1979), no qual se injeta água na formação e em seguida se bombeia de volta, de modo a criar um fluxo senoidal, com uma certa frequência, e daí gerar uma variação alternada de pressão que depende dos parâmetros da formação no trecho em teste. O processo pode ser repetido com diferentes frequências.

Regimes de fluxo

O regime de fluxo imposto ao sistema poço-blocos-fraturas (condutor hidráulico) pode ser:

- ♦ *estacionário* (a vazão não varia com o tempo);
- ♦ *transiente arbitrário* (vazão variável segundo uma lei arbitrária);
- ♦ *transiente escalonado* (vazão variável segundo patamares ou degraus de valor constante durante um dado intervalo de tempo);
- ♦ *transiente impulsivo* (em um intervalo isolado e sob pressão de um poço, a válvula de controle é aberta e, após um incremento de tempo muito pequeno, é fechada. Cria-se dessa maneira e conforme se deseje, em uma ou mais etapas sucessivas, um fluxo *impulsivo* no sistema);
- ♦ *transiente harmônico* (no qual a vazão varia segundo uma lei senoidal).

Testes em regime estacionário ou quase-estacionário

Foram empregados nos primórdios da pesquisa de água subterrânea, principalmente nos chamados meios porosos homogêneos. A partir dos anos 1970, passaram a ser também aplicados às rochas fraturadas com diversos aperfeiçoamentos, tanto na execução quanto na interpretação (Louis, 1977).

Testes em regime transiente

São usados na engenharia de petróleo e na hidrogeologia desde o início dos anos 1950, época em que o teste básico era o transiente-escalonado e a análise se fazia à luz do modelo de Theis (1935), proposto para os meios homogêneos e isotrópicos. A partir da década de 1970 o emprego desse modelo passou a ser questionado para os meios fraturados (Papadopoulos et al. 1973). Nas décadas seguintes, tecnologias mais sofisticadas foram desenvolvidas visando avaliar especificamente as propriedades hidráulicas

desse tipo de meio sobretudo em condições de baixa permeabilidade. É o caso dos testes de impulso, ou de injeção instantânea sob pressão (Bredehoeft & Papadopoulos, 1980) e dos testes de injeção instantânea em poço aberto, com encerramento prematuro [Karasaki (1990, apud Camargos, 1994).

Na hidrogeologia dos meios fraturados, os testes transientes de bombeamento são os mais usados e ao invés de pressões, medem-se as variações da carga hidráulica. Os métodos de interpretação ainda são em grande parte influenciados pelos modelos conceituais dos meios homogêneos.

2.4.3-O problema da locação de poços no cristalino

A perspectiva de uso das técnicas de mapeamento de fraturas, com os recursos tecnológicos mais modernos, de análise e processamento de imagens, está trazendo, para muitos especialistas envolvidos com o problema, a esperança de redução dos chamados "índices de insucesso", na locação de poços no cristalino. Mas, por enquanto, isso continua parecendo difícil. A grande incógnita continua sendo a identificação de relações *objetivas* - determinísticas ou probabilísticas - entre propriedades *geométricas* e propriedades *hidráulicas* do meio fissural, sem o que, provavelmente, o estabelecimento de uma metodologia eficiente de locação de poços, dificilmente será logrado. Isto não significa que se trate de encontrar uma metodologia capaz de garantir uma efetiva melhoria dos padrões conhecidos de produtividade (se é que isto é possível), nas regiões de rochas cristalinas, mas tão somente de uma metodologia que "justifique" ou "explique", os resultados obtidos.

Estudos recentes (Banks et al. 1994) parecem indicar que o sucesso de um poço em aquíferos de rochas cristalinas ainda continua sendo, em grande parte, uma questão de chance. Não é sem razão que os estudos de conectividade geométrica de fraturas e de variabilidade dos coeficientes de permeabilidade e porosidade (ex., Guerin & Billaux, 1993) usam como ferramenta a análise estatística, na busca de relações entre propriedades geométricas e propriedades hidráulicas dos sistemas fissurados. De fato, as distribuições de permeabilidade, no domínio subterrâneo fraturado, parecem assumir um comportamento aleatório, conforme veremos adiante.

Parâmetros geométricos

A caracterização de sistemas de fraturas, para locação de poços em meios fraturados, como não pode deixar de ser, tem ficado até hoje restrita à análise de

elementos geométricos, na qual se determinam: orientação, frequência (densidade do fraturamento) e tamanho das fraturas. As condições de fluxo, todavia, dependem da magnitude e do grau de conectividade dos espaços vazios, coisa que não se pode detectar através da análise geométrica.

Em inúmeros trabalhos clássicos, ligados à hidrogeologia dos meios heterogêneos, existem classificações de fraturas a partir da origem e dos aspectos geológicos dos fraturamentos. Merecem referência Archie (1952), Smechov (1962, 1965), Romm (1966), Levorsen (1967), Davis (1969), Currie & Nwachukwu (1974). Resumindo resultados de numerosas investigações desenvolvidas em meios fraturados, Snow (1972) conclui que a descrição de fraturas "jamais pode ser completa", não se podendo dizer que sejam paralelas, uniformes, planas, lisas, regularmente-espaçadas ou ininterruptas.

Estudos mais recentes, de fluxo e de transporte de traçadores em rochas fraturadas e cársticas, estão mudando a antiga concepção de que cada fratura mapeada poderia ser idealizada como um canal representado por duas placas paralelas, separadas por uma distância constante, denominada abertura da fissura. De fato, já foi demonstrado (Neuzil & Tracy, 1981), que numa mesma fratura pode existir uma ampla faixa de valores de abertura e que disso resulta um sistema bidimensional heterogêneo, no qual o fluxo de fluido tende a concentrar-se nos caminhos que oferecem menor resistência, ou seja, de maior permeabilidade.

Evidências de que a análise estrutural, por si só, não é suficiente para identificar *zonas preferenciais de fluxo*, para uma fratura, foram detectadas em campo por vários autores [Abelin et al. 1983; Bourke (1987, apud Tsang et al. 1989)].

Parâmetros hidráulicos

As propriedades físicas dos condutores hidráulicos, associados com reservatórios subterrâneos de porosidade secundária, apresentam variações muito grandes de um local para outro e dentro de uma mesma unidade litológica. Determinações feitas em rochas reservatório de petróleo e gás, em diversas partes do mundo (Streltsova-Adams, 1978), revelam que a permeabilidade de fraturas, por exemplo, pode variar de 10^0 a 10^{-5} darcies, o que equivale a uma faixa de variação de condutividade hidráulica da ordem de 10^{-5} a 10^{-10} m/s (tabela 2.7). A porosidade por sua vez é geralmente inferior a 1% (Snow, 1968).

Tabela 2.7 - Propriedades hidráulicas de rochas reservatório em campos de petróleo e gás em diversas partes do mundo (Streltsova-Adams 1978)

Litologia	Permeabilidade (darcy)	Permeabilidade m^2	Condutividade hidráulica (m/s)	Porosidade (%)	Aberturas (mm)	Local - fonte
Rocha densa Fratura	1×10^{-9} a 5×10^{-7}	$9,87 \times 10^{-22}$ a $4,94 \times 10^{-19}$	$9,6 \times 10^{-15}$ a $4,8 \times 10^{-12}$	2 a 27 0,1 a 0,4		
Arenito (fratura)					max 0,330 med 0,051	Spraberry - Texas Elkins (1953)
Calcário (matriz)	5×10^{-8} a 5×10^{-4}	$4,94 \times 10^{-20}$ a $4,94 \times 10^{-16}$	$4,8 \times 10^{-13}$ a $4,8 \times 10^{-9}$	2 a 15		Masjid-Sulamain e Haft-Kel - Iran Gibson (1948)
Calcário (matriz)	$< 1 \times 10^{-3}$	$< 9,87 \times 10^{-16}$	$< 9,6 \times 10^{-9}$	2 a 3		Maracaibo - Venezuela Smith (1951)
Arenito (fratura) Arenito (matriz)	1×10^{-3} a $1,5 \times 10^0$	$9,87 \times 10^{-16}$ a $1,48 \times 10^{-12}$	$9,6 \times 10^{-9}$ a $1,4 \times 10^{-5}$	15 a 26		Lowland - Sibéria Dickey (1972)
Calcário (fratura)	65% $< 1 \times 10^{-4}$ 34% $< 1 \times 10^{-5}$	65% $< 9,87 \times 10^{-17}$ 34% $< 9,87 \times 10^{-18}$	65% $< 9,6 \times 10^{-10}$ 34% $< 9,6 \times 10^{-11}$	1 a 4		Orenburg - Russia Varenicheva et al (1973)
Arenito (fratura) Arenito (matriz)	1×10^{-1} a 1×10^0	$9,87 \times 10^{-14}$ a $9,87 \times 10^{-13}$	$9,6 \times 10^{-7}$ a $9,6 \times 10^{-6}$	0,3 a 0,4 5 a 27	0,08 a 0,1	Shnebelinsky - Russia Smechov (1965)
Fraturas em poços				0,05 0,005 a 60m	0,101 a 15m 0,051 a 60 m	Valores típicos Snow (1968)

Do ponto de vista hidrogeológico, uma observação importante que se pode fazer sobre essas variações, com base em resultados de estudos experimentais, é que a distribuição de frequência dos valores de permeabilidade é tipicamente assimétrica concentrando baixos valores à esquerda. Por isso, não se pode dizer que os poços de baixa vazão (que são os mais frequentes no cristalino), sejam necessariamente "mal locados" ou "mal construídos". Ou seja, a maior frequência ($\equiv$ predomínio) de valores de baixa vazão de poços perfurados no cristalino, pode ser explicada pela maior frequência de zonas de baixa permeabilidade, que caracteriza os maciços rochosos em geral. Isso já foi demonstrado por diversos estudos hidrodinâmicos desenvolvidos, sobretudo, na Suécia, alguns dos quais são descritos a seguir.

Na tabela 2.8 estão condensados os resultados de um estudo geotécnico realizado na hidro-elétrica de Torpa, Suécia, envolvendo nada menos que 380 testes de perda d'água (Broch & Kjørholt, 1994).

Tabela 2.8 - Frequência de permeabilidade de fraturas em Torpa - Suécia (Broch & Kjørholt, 1994)

Permeabilidade $\times 10^{-15} m^2$	Número de valores
< 0,2	181
< 0,5	31
< 1	29
< 2	53
< 5	40
< 10	13
< 20	20
< 50	13

Analisando a distribuição de frequência, em função do tamanho da amostra, os autores do estudo assinalam que os valores médios de permeabilidade variam bastante, na dependência do número de medições. Verificaram, por exemplo, que a média geométrica e a mediana dos valores, ficam praticamente constantes, em torno de $0.75 \times 10^{-15} m^2$, para um número compreendido entre 30 e 140 medições.

Daí em diante, a permeabilidade cai para uma média geométrica de $0.50 \times 10^{-15} m^2$ e para uma mediana de $0.20 \times 10^{-15} m^2$. Essa variação, segundo Broch & Kjørholt (op. cit.), indica que as últimas 240 medições foram feitas numa

massa rochosa de permeabilidade muito menor do que a das primeiras 140 medições. Revela também, que a permeabilidade do maciço rochoso varia muito, para distâncias da ordem de 100 m, ou seja, para uma pequena distância. Por isso, concluem que, para se obter um valor confiável, da permeabilidade de um maciço rochoso, é preciso distribuir os pontos de medida por toda a área de interesse.

O histograma da figura 2.25, que ilustra os dados da tabela 2.8, mostra que a distribuição de frequência dos valores de permeabilidade é assimétrica e que os valores mais baixos são os mais frequentes.

Fig. 2.25 - Histograma de frequência de permeabilidade em rocha cristalina, para 380 valores, na localidade de Torpa - Suécia (dados de Broch & Kjørholt, 1994).

Outros exemplos de estudos experimentais muito detalhados, também conduzidos na Suécia, reforçam a convicção da maior frequência das zonas de baixa permeabilidade, como condicionante das distribuições do fluxo das águas subterrâneas no meio fissural. Três deles, particularmente, valem ser descritos:

- i. Numa galeria de 75 m, com duas ramificações de 12,5 m, escavada numa formação granítica, a 360 m de profundidade, foi desenvolvido, durante dois anos, um trabalho de monitoramento de fluxo subterrâneo nas fendas [Neretnieks (1987, apud Tsang et al. 1989)]. Para coletar o fluxo, as paredes laterais e o teto da galeria (superfície de controle) foram cobertos com 375 pedaços de plástico de 2 m² de área cada um. Ao final do experimento, verificou-se que 70 % da área fissurada da superfície de controle, comportou-

- se como praticamente seca, com taxas de fluxo inferiores a 0,1 ml/h, e que 50% de todo o fluxo registrado ocorreu em apenas 3% da área coberta.
- ii. Numa área de 14.000 m² de túneis escavados em granito, Bolvede & Christiansson (1987, apud Tsang et al. 1989), mediram um fluxo total de 53 l/min, dos quais 30 l/min emergiam em 164 fissuras molhadas, de tamanho, quase sempre, inferior a 1 m. Nessas fissuras, a metade do fluxo, isto é, cerca de 15 l/min, era proveniente de apenas 18 fendas.
 - iii. Ainda segundo Tsang et al. (op.cit.), avaliações de condutividade hidráulica, a partir de testes de perda de água, foram feitas em 92 secções (de 2 , 5 e 25 m), isoladas por obturadores, em 15 furos profundos (200 a 700 m), em Kamlunge-Suécia. O resultado mostrou que 48,7% do fluxo total, ocorreu em apenas uma das 92 secções de fendas testadas, conforme tabela 2.9. As figuras 2.26 e 2.27 exibem histogramas com as mesmas características de assimetria já comentadas na figura 2.25, e que também comprovam o predomínio das baixas permeabilidades nos meios fissurados.

Tabela 2.9 - Frequências de condutividade hidráulica e de porcentagem de fluxo na área de Kamlunge - Suécia (Tsang et al. 1989)

Faixas de condutividade hidráulica ($\times 10^{-9} m/s$)	Número de secções testadas	Fração do fluxo total (%)
0.01	34	0.5
0.03	27	1.3
0.1	12	1.7
0.3	10	4.8
1	4	5.7
3	2	9.6
10	2	28.6
30	1	48.7

Em suma, o que ainda se continua desconhecendo, é como identificar aqueles **pontos específicos**, ou **zonas preferenciais** de fluxo em meio fraturado, posto que, até hoje, não foi possível relacionar, em escala mesoscópica, estilos estruturais com permeabilidades. Isso é comprovado pelas dispersões que se verificam nos resultados

Fig. 2.26 - Histograma de frequência da porcentagem do fluxo total medido em 92 testes feitos em fraturas, na área de Kamlunge- Suécia (dados de Tsang et al. 1989)

Fig. 2.27 - Histograma de frequência dos valores de condutividade hidráulica, determinados em 92 testes, na área de Kamlunge- Suécia (dados de Tsang et al. 1989)

de produtividade de poços, obtidos em meios fraturados, tanto em zonas áridas, quanto em zonas úmidas. Tais resultados, como os apresentados no presente capítulo, para diversas subprovíncias hidrogeológicas brasileiras, tendem a seguir uma distribuição de frequência do tipo log normal, semelhante à que geralmente se admite para a condutividade hidráulica e/ou para a permeabilidade das rochas fissuradas. (Gustafson & Krásný, 1986).

Conclui-se, portanto, que somente os testes hidráulicos podem levar ao conhecimento das aberturas, interconectividade e grau de canalização das fraturas.

3 - OS MODELOS CONCEITUAIS DE FLUXO PARA POÇOS EM MEIO HETEROGÊNEO

Os conceitos básicos mais importantes da mecânica dos fluidos [por exemplo, Comolet, (1963), Neves, (1979), Roberson e Crowe, (1985)] mencionados neste trabalho, são os seguintes:

Volume de controle é uma região que se define no espaço para ajudar na solução de problemas de fluxo.

Superfície de controle é definida como a superfície envolvente do volume de controle.

Fluxo de entrada e fluxo de saída de um volume de controle. Define-se o fluxo através de uma área $A = |\mathbf{A}|$ como o produto escalar $Q = \mathbf{V} \cdot \mathbf{A}$, onde $\mathbf{V}$ é o vetor velocidade do fluxo e $\mathbf{A}$ é o vetor área, dirigido normal à área em questão. Por convenção, o vetor área sempre aponta para fora do volume de controle.

A equação geral da continuidade, aplicada ao volume de controle, tem como expressão:

$$\frac{d(\text{massa})}{dt} = \frac{d}{dt} \int_{vc} \rho dU + \int_{sc} \rho \mathbf{V} \cdot d\mathbf{A} \quad (3.1)$$

Por definição a massa de um sistema é constante. Daí resulta que a soma dos fluxos (- entrada + saída) através de toda a superfície de controle é igual ao decréscimo de massa dentro do volume de controle, conforme se observa na equação:

$$\int_{sc} \rho \mathbf{V} \cdot d\mathbf{A} = - \frac{d}{dt} \int_{vc} \rho dU \quad (3.2)$$

Modelo conceitual é um conjunto de hipóteses que descreve, de maneira ideal, as principais feições do meio hidrogeológico real. O método do modelo conceitual, é considerado como uma das ferramentas mais poderosas de que se dispõe para investigar fenômenos físicos (sistemas) complicados, assim entendidos aqueles sistemas cujo tratamento matemático se afigura praticamente impossível. De acordo com esse método, o sistema real, ou fenômeno, é substituído por um sistema mais simples, *fictício* ou *ideal*, passível de tratamento matemático. É o caso do fluxo de água subterrânea para um poço em meio fraturado, onde a complexidade do domínio (geometria indefinida, descontinuidade, heterogeneidade, anisotropia, etc.) tem levado os pesquisadores a utilizarem esse método.

Da análise do fenômeno, ou sistema ideal, são obtidos resultados na forma de leis ou relações matemáticas entre os diversos parâmetros do sistema estudado. O modelo conceitual é portanto uma forma simplificada de encarar um fenômeno que não pode ser

observado diretamente a nível macroscópico ou microscópico, mas no qual é possível criar perturbações mesoscópicas e observar e medir as respostas. Uma vez definido o modelo, o segundo passo é a sua análise por meio de formulações teóricas conhecidas - analíticas ou numéricas - com vistas à obtenção de relações matemáticas que descrevam o fenômeno investigado. Essas relações permitem caracterizar, não apenas o grau de dependência entre as variáveis ativas do problema, mas também os fatores que, de acordo com o modelo, não exercem influência no sistema. Finalmente, é preciso verificar experimentalmente, através de testes de laboratório ou de campo, a validade do modelo, isto é, a validade das relações entre as variáveis e coeficientes que aparecem nas equações e que devem ser, todas elas, quantidades mensuráveis.

As soluções analíticas conhecidas, dos testes de injeção e ou de bombeamento, em meios fraturados, baseiam-se em três tipos principais de modelos conceituais:

3.1 - MODELO CAIXA-PRETA

O domínio considerado, é o meio natural, de geometria desconhecida. A análise consiste na busca de relações entre pressão (ou carga hidráulica) e fluxo. Nos casos de meios fraturados muito heterogêneos e em ambientes cársticos, este parece constituir o único modelo possível. Em geral, os vetores vazão Q_i e pressão P_j (ou carga h_j) são funções do tempo. Como o modelo matemático neste caso, geralmente, não tem bases físicas, diz-se que ele é um modelo de simulação, que pode ser interpretado em função do tempo ou em função da frequência.

3.1.1 - Simulação em função do tempo

Consiste em avaliar expressões matemáticas representando relações experimentais entre os vetores Q_i e P_j (ou h_j). Em geral, empregam-se, em primeira aproximação, relações lineares, supondo que o fluxo é laminar e que o sistema fraturado é invariante. Define-se uma matriz C_{ij} de ligação dos vetores Q_i e h_j , através da relação $Q_i = [C_{ij}]h_j$. Como relações lineares entre Q_i e h_j são raras, devido à turbulência do fluxo, principalmente nas proximidades do poço bombeado, muitas vezes empregam-se relações quadráticas do tipo $(Q_i)^2 = [C_{ij}]h_j$.

3.1.2 - Simulação em função da frequência

Como forma de linearizar a relação entre fluxo e carga hidráulica (ou pressão) as quantidades Q_i e h_j são relacionadas por um produto de convolução. A linearização é feita por meio de uma transformada de Laplace ou de Fourier, expressa na forma $Q_i^* = [C_{ij}^*]h_j^*$ e na qual as quantidades transformadas são variáveis complexas dependentes da frequência.

O domínio de validade dos modelos de simulação, além de ficar restrito a sistemas similares ao protótipo, no qual as medições foram feitas, também se restringe aos limites dos experimentos realizados.

3.2 - MODELO DE MEIO CONTÍNUO EQUIVALENTE

Em meios heterogêneos, quando se usa a homogeneização estocástica, isto é, quando a porosidade de fraturas é considerada estatisticamente distribuída no espaço, ela passa a constituir um meio poroso fictício equivalente. Esse meio, tanto pode ser considerado isoladamente, isto é, como um *modelo de porosidade única*, quanto pode ser superposto ao meio poroso da matriz, dando lugar, neste caso, a um *meio de dupla porosidade*.

Em ambos os tipos de modelo conceitual a interpretação dos testes pode ser feita em função do tempo ou em função da frequência.

De modo geral, para a interpretação em função do tempo, com algum treinamento, a identificação dos parâmetros desconhecidos, quando em pequeno número, torna-se relativamente fácil, se existirem soluções analíticas, usando o método de superposição das curvas experimentais às "curvas padrão" obtidas da solução analítica.

As equações de resposta dos sistemas idealizados pelos modelos de meio contínuo equivalente, costumam ser bastante complexas, e por isso as soluções, para fluxo transiente, são representadas graficamente, em papel dilog, por famílias de curvas padrão de rebaixamento adimensional (s_D) versus tempo adimensional (t_D). Esses parâmetros são introduzidos por conveniência quando da solução do problema de valor inicial e de contorno que representa o fluxo de água para o poço.

Em modelos mais sofisticados, e com maior número de parâmetros, o processo de identificação pode se tornar muito difícil a ponto de comprometer a unicidade dos parâmetros, especialmente se não existirem soluções analíticas. Para sistemas de dupla porosidade as soluções analíticas mais gerais, obtidas para a pressão adimensional P_A , são dependentes de quatro parâmetros adimensionais. Como não é possível desenhar curvas-padrão com esse número de parâmetros, geralmente são propostas aproximações para tempos intermediários, de modo a tornar possível o traçado das curvas-padrão com apenas dois parâmetros adimensionais. As coordenadas dos pontos de coincidência fornecem os valores das variáveis dimensionais e adimensionais, que substituídos nas expressões apropriadas resultam finalmente nos parâmetros procurados.

No caso dos modelos de dupla porosidade, e quando se fazem testes harmônicos, a interpretação pode ser feita em função da frequência, usando a mesma metodologia de superposição. Neste caso, e quando se usa a transformada de Fourier, os coeficientes são complexos e as curvas-padrão dadas em módulo e fase.

3.2.1 - Modelos de porosidade única

Consideram a rede de fraturas como um “continuum”, onde é possível definir uma velocidade fictícia e caracterizá-la como uma função de valor único em todo o domínio (matriz da rocha e fraturas).

Nos meios porosos granulares a hipótese do “continuum”, se justifica a nível macroscópico pela consideração de um *elemento de volume representativo* (EVR), dentro do qual a distribuição espacial das fases sólida e fluida é suposta *aleatória*. Assim, a configuração do espaço vazio é representada por uma função de distribuição de probabilidade, cujos momentos descrevem a geometria do espaço vazio, nas vizinhanças de um ponto do meio poroso, como funções *não aleatórias* das coordenadas do espaço [Bachmat e Bear (1986) in Bear e Verruijt (1987)]. Justifica-se dessa forma o conceito de um meio estatisticamente homogêneo, no qual a velocidade média de fluxo é uma função de valor único em qualquer ponto desse meio.

Nos meios heterogêneos, o conceito de EVR, para alguns, é tido como válido, quando as fraturas são suficientemente pequenas para serem assimiladas a poros. Essa hipótese é classicamente adotada na engenharia de petróleo, onde as formações de rochas fissuradas são consideradas como camadas isotrópicas de porosidade n_1 , permeabilidade k_1 e espessura h , perpendiculares ao poço e reduzidas a uma linha (modelo de fonte linear). Leis de filtração em um tal meio contínuo, podem ser encontradas experimentalmente. Quando o raio r_w , do poço é considerado finito o efeito da coluna líquida é introduzido por meio de um coeficiente C (armazenamento do poço). O efeito da zona perturbada pela perfuração em torno da parede do poço (efeito pele), que reduz a porosidade e a permeabilidade nas vizinhanças do poço, pode ser levado em conta através de um coeficiente σ . Outros parâmetros físicos são a compressibilidade total c , do sistema rocha-fluido e a viscosidade dinâmica μ do fluido.

Exemplos dos principais métodos, para meios isotrópicos, baseados em soluções analíticas para estimativa de parâmetros por superposição de curvas, são apresentados a seguir. Eles são usados principalmente na interpretação de testes hidráulicos de variação instantânea de carga (ST,TP,DST), realizados em meios de baixa permeabilidade (Camargos, 1994). Dentre estes destacam-se os seguintes:

Poço de raio finito

Considera o poço de raio finito, de modo a incorporar o efeito do armazenamento dentro do poço (Cooper, et al. 1967).

Equação da carga hidráulica:

$$h_{wA}(t_A, C_A) = \frac{4C_A}{\pi^2} \int_0^\infty \frac{\exp(-u^2 t_A)}{uf(u)} du \quad (3.3)$$

$$f(u) = [uC_A J_0(u) - J_1(u)]^2 + [uC_A Y_0(u) - Y_1(u)]^2 \quad (3.4)$$

Curvas padrão: $g(\alpha, \beta)$

$$g = h_{wA} \quad ; \quad \alpha = \frac{t_A}{2C_A} \quad ; \quad \beta = \frac{1}{2C_A} \quad (3.5)$$

Parâmetros:

$$T = \frac{C}{\pi} \frac{\alpha}{t} \quad (3.6)$$

$$S = \frac{C\beta}{\pi r_w^2} \quad (3.7)$$

Poço de raio finito com reboco de espessura infinitesimal

Além de considerar o poço de raio finito, o método incorpora o chamado *efeito pele*, e apresenta três expressões analíticas, para as quais são propostas respectivamente, três classes de curvas-padrão: i) em escala dilog, para tempos curtos; ii) escala monolog, para tempos intermediários; iii) escala dilog, para tempos longos (Ramey 1976).

Equações da carga hidráulica:

$$\text{Para tempos curtos: } h_{wA} = \exp\left(\frac{-t_A}{\sigma C_A}\right) \quad (3.8)$$

Para tempos intermediários:

$$h_{wA}(t_A, C_A, \sigma) = \frac{4C_A}{\pi^2} \int_0^\infty \frac{\exp(-u^2 t_A)}{uf(u)} du \quad (3.9)$$

$$f(u) = [uC_A J_0(u) - (1 - u^2 C_A \sigma) J_1(u)]^2 + [uC_A Y_0(u) - (1 - u^2 C_A \sigma) Y_1(u)]^2 \quad (3.10)$$

Para tempos longos:
$$h_{wA} = \frac{1}{2(t_A/C_A)} \quad (3.11)$$

Curvas-padrão

dilog tempos curtos:

$$g(\alpha) ; g = (1 - h_{wA}) ; \alpha = \frac{t_A}{C_A} \quad (3.12)$$

monolog tempos intermediários:

$$g(\alpha) ; g = h_{wA} ; \alpha = \frac{t_A}{C_A} \quad (3.13)$$

dilog tempos longos: $g(\alpha, \beta)$

$$g = h_{wA} ; \alpha = \frac{t_A}{C_A} ; \beta = C_A \exp(2\sigma) \quad (3.14)$$

Parâmetros:

$$T = \frac{C\alpha}{2\pi t} \quad (3.15)$$

$$\sigma = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{\beta}{C_A} \right) \quad (3.16)$$

$$C_A = \frac{C}{2\pi r_w^2 S} \quad (3.17)$$

Poço com reboco de espessura finita

O modelo considera o meio físico constituído de dois domínios: a formação, com extensão lateral infinita e a pele, com uma espessura finita. A identificação dos parâmetros da solução analítica, pelo método gráfico, se torna muito difícil, com a introdução de uma espessura de pele finita (Moench & Hsieh 1985).

Os autores do método propõem então, uma alternativa de análise gráfica, a partir de uma solução aproximada para tempos curtos, mas que só permite obter o produto $S_{pe} \times T_{pe}$. Mesmo assim, esta solução aproximada (equação 3.18), interessa, porque revela a existência ou não de “pele”. Quando não existe reboco no poço, o parâmetro $\omega = 1$, o que significa que as propriedades hidráulicas do “cake”, são idênticas às propriedades da formação.

Equação da carga hidráulica:

$$h_{wA} = \exp \left[\frac{\omega_1 t_A}{C_A^2} \operatorname{erfc} \left(\frac{(\omega_1 t_A)^{\frac{1}{2}}}{C_A} \right) \right] \quad (3.18)$$

$$\omega_1 = \frac{S_{pe} \times T_{pe}}{S \times T} \quad (3.19)$$

Curvas-padrão:

Curvas padrão semilog: $g(\alpha)$

$$g = h_{wA} ; \quad \alpha = \frac{4\pi^2 r_w^2 S_{pe} T_{pe} t}{C^2} = \frac{\omega_1 t_A}{C_A^2} \quad (3.20)$$

Curvas de campo (ou experimentais): h_{wA} versus t

Parâmetros:

$$S_{pe} T_{pe} = \frac{C^2 \alpha}{4\pi^2 r_w^2} \quad (3.21)$$

Modelo de transformação

Esse método permite transformar dados de testes de variação instantânea de carga, em dados equivalentes de testes de bombeamento (Peres et al. 1989). Os métodos de Bourdet et al. (1983) e de Onur & Reynolds (1988), ambos desenvolvidos para testes de vazão constante, incorporam tanto o efeito “pele”, de espessura infinitesimal, quanto o efeito do armazenamento no poço. Usando esses métodos, Peres et al. (op. cit.) desenvolveram expressões adimensionais que relacionam as soluções analíticas dos testes de variação instantânea de carga, com aquelas dos testes de bombeamento.

A interpretação é feita pelo chamado *método da derivada*. Todavia, para tempos curtos ($t_A/C_A \leq 1$), os métodos de Bourdet et al. (op.cit) e de Onur & Reynolds (op.cit.), apresentam problemas de não unicidade, isto é, exibem a possibilidade de superposição da curva de campo com mais de uma curva-padrão. Para superar esse problema, os referidos autores sugerem o *método da vazão normalizada*, de Ramey (1976), baseado na solução aproximada de Jacob (1947).

Equações da carga hidráulica:

$$h_{wA} = \frac{2\pi T}{C(h_i - h_0)} \int_0^t [h_i - h(t)] dt \quad (3.22)$$

$$\frac{d(h_{wA})}{d(\ln t_A)} = \frac{2\pi T}{C(h_i - h_0)} t [h_i - h(t)] \quad (3.23)$$

Curvas -padrão:

1) Método da derivada: (curvas padrão de Bourdet et al. 1983)

$$g_1(\alpha, \beta) \text{ com } g_1 = h_{wA} \quad (3.24)$$

$$g_2(\alpha, \beta) \text{ com } g_2 = d(h_{wA}) / d(\ln t_A) \quad (3.25)$$

$$\alpha = \frac{t_A}{C_A} \quad \beta = C_A \exp(2\sigma) \quad (3.26)$$

Curvas experimentais ($\equiv$ curvas de campo)

$$f_1 \text{ versus } t \text{ com } f_1 = \int_0^t [h_i - h(t)] dt \quad (3.27)$$

$$f_2 \text{ versus } t \text{ com } f_2 = t [h_i - h(t)] \quad (3.28)$$

Parâmetros:

$$T = \frac{C(h_i - h_0)}{2\pi} \frac{h_{wA}}{f_1} \quad (3.29)$$

$$\sigma = \frac{\pi S r_w^2 \beta}{C} \quad (3.30)$$

2) Método da vazão normalizada (Ramey 1976)

$$\frac{2\pi T}{C} \frac{\int_0^t [h_i - h(t)] dt}{h(t) - h_0} = 1.151 \log \left(\frac{2.246 T t}{S r_w^2} \right) + \sigma \quad (3.31)$$

Curvas de campo monolog (retas com declividade m)

$$f_3 \text{ versus } t \text{ com } f_3 = \frac{\int_0^t [h_i - h(t)] dt}{h(t) - h_0} \quad (3.32)$$

$$m = \frac{1.151 C}{2\pi T} \quad ; \quad u_3 = \frac{2.246 T t}{S r_w^2} \quad (3.33)$$

Parâmetros:

$$T = \frac{1.151 C}{2\pi m} \quad (3.34)$$

$$\sigma = f_3 - m \log(u_3) \quad (3.35)$$

Modelo de recuperação

Esse método se aplica ao teste DST (item 2.4.2) de encerramento prematuro e utiliza dados da fase de recuperação [Karasaki (1990, apud Camargos 1994)].

Equação da carga hidráulica:

$$\frac{h_{wA}}{Q_A} = \frac{2\pi T t_i [h_i - h(t)]}{C [h_i - h(t)]} \quad (3.36)$$

Curvas-padrão:

Curvas experimentais monolog: (retas com declividade m)

$$\frac{t}{t - t_i} \text{ versus } h_i - h(t) \quad (3.37)$$

Parâmetros:

$$K = \frac{1.151 [h_i - h(t)] C}{2\pi m t_i b} \quad (3.38)$$

3.2.2 - Modelos de dupla porosidade

Outros autores, rejeitam a hipótese de velocidade única de fluxo uniforme, em meio estatisticamente homogêneo, e consideram que os modelos uni-porosos não se aplicam aos meios fraturados, devido à forte descontinuidade mecânica representada pelas fraturas. Para ambientes desse tipo, propõem modelos alternativos de fluxo para poços, formulando o problema com as mesmas idéias básicas e os mesmos métodos de solução, através de famílias de curvas-padrão, empregados para os meios porosos granulares. Recorrem, porém, ao conceito de dupla-porosidade para contornar o problema da descontinuidade, admitindo a superposição de dois meios contínuos, cada um dos quais

possuindo condutividades e armazenamentos hidráulicos primários (nos blocos da matriz rochosa) e secundários (nas fraturas).

Exemplos de modelos de dupla porosidade, talvez os mais conhecidos, aplicáveis a uma formação fraturada, segundo Streltsova (1978) e Sauveplane (1984), são descritos a seguir, com os índices: *f*, indicando fratura; *m*, matriz; *A*, adimensional; *w*, poço.

Duplo domínio com drenagem retardada

São definidos dois domínios de fluxo: o primeiro, é formado pela matriz de uma rede de blocos isotrópicos, irregulares e o segundo, constituído pelas fissuras (Barenblatt et al. 1960). O elemento de volume representativo (EVR) do modelo deve ser muito grande, em relação ao tamanho dos blocos, mas precisa permanecer pequeno em relação ao volume total do aquífero. As hipóteses básicas, são:

- A taxa de drenagem retardada dos blocos para as fraturas, por unidade de volume de rocha, é proporcional ao diferencial de pressão entre os dois domínios componentes do modelo.
- O fluxo dos blocos para as fraturas é estacionário, enquanto que o fluxo das fraturas para o poço é transiente.
- A variação de volume do fluido, por conta da compressibilidade das fraturas, é desprezível em relação à variação de volume que ocorre devido ao fluxo oriundo dos blocos para as fraturas.
- Não existe fluxo das fraturas para os blocos.
- A variação de volume dos blocos, devido à perda de líquido para as fraturas, é desprezível em relação à variação de volume produzida pela expansão do líquido.
- Os blocos são isotrópicos e o aquífero é confinado, com extensão lateral infinita, como em Theis (1935).

Equação do rebaixamento

$$s_f = \frac{Q}{4\pi T_f} \int_0^\infty J_0(xr) \left[1 - \exp\left(\frac{-\beta t x^2}{1 + B_f^2 x^2}\right) \right] \frac{dx}{x} \quad (3.39)$$

Curvas -padrão:

mono ou dilog: $W_f(\alpha, \beta)$

$$W_f = \frac{4\pi T s_f}{Q} \quad (3.40)$$

$$\alpha = \frac{4K_f}{S_{sm}} \frac{t}{r^2} ; \quad \beta = \frac{r}{B_f} \quad (3.41)$$

Curvas experimentais mono ou dilog: s_f versus t

Parâmetros:

$$T_f = \frac{Q s_f}{4\pi s_f} \quad (3.42)$$

$$K_f = \frac{T_f}{b} \quad (3.43)$$

$$B_f = \frac{r}{\beta} \quad (3.44)$$

$$\lambda = \frac{K_f}{B_f^2} \frac{\mu}{\rho g} \quad (3.45)$$

$$S_{sm} = \frac{4K_f t}{\alpha r^2} \quad (3.46)$$

Duplo domínio com drenagem instantânea

Boulton (1963) admite, como Barenblatt et al. (1960), que o fluxo, dos blocos porosos para as fissuras, acontece por conta da resposta elástica às diferenças de pressão entre pontos situados dentro e fora dos blocos. No modelo de Barenblatt et al. (op. cit.), esse fluxo acontece após um certo tempo de bombeamento, ou seja, equivale a uma *drenagem retardada* oriunda dos blocos porosos. Mas, Boulton (op.cit.), considera essa "drenagem retardada" (fluxo vertical ilustrado na figura 3.1), em todos os instantes t , a partir do início do bombeamento.

Fig. 3.1 - Unidade bloco-fissura e a solução de Boulton (1963)

Equação do rebaixamento na fissura:

$$s_f = \frac{Q}{4\pi T_f} \int_0^\infty 2J_0\left(\frac{r}{B_f} \frac{x}{v}\right) \times \left[1 - \exp\left[-0.5\alpha_f t \eta (1+x^2)\right] \times \left[\cosh(0.5\alpha_f t q) + \frac{\eta(1+x^2)}{q} \sinh(0.5\alpha_f t q) \right] \right] \frac{dx}{x} \quad (3.47)$$

Curvas-padrão: $W_f(\theta, r/B_f, \eta)$ monolog ou dilog

Parâmetros:

$$B_f^2 = \frac{T_f}{\alpha_f S_m} = \frac{K_f}{K_m} aH = \frac{K_f a}{K_m / H} = \frac{T_f}{T'_m} \quad T_f = K_f a \quad T'_m = K_m / H \quad (3.48)$$

$$q = \sqrt{\eta^2 (1+x^2)^2 - 4\eta x^2} \quad (3.49)$$

$$v = \sqrt{\frac{\eta - 1}{\eta}} \quad (3.50)$$

$$\eta = 1 + \frac{S_m}{S_f} \quad (3.51)$$

$$\theta = \frac{4T_f t}{r^2 S_f} \quad (3.52)$$

$$\alpha_f t = \frac{\theta}{4} \left(\frac{1}{\eta - 1} \right) \left(\frac{r}{B_f} \right) \quad (3.53)$$

Duplo domínio anisotrópico

Partindo das mesmas hipóteses básicas de Barenblatt et al. (1960), Warren & Root (1963) idealizam o meio heterogêneo através de uma rede uniforme de fraturas paralelas às três direções principais do tensor de condutividade hidráulica, delimitando um arranjo sistemático de paralelepípedos retangulares idênticos. Portanto, o aquífero é anisotrópico, em relação à condutividade hidráulica das fraturas. O fluxo dos blocos para as fraturas é estacionário, enquanto que o fluxo das fraturas para o poço é transiente.

Equação do do rebaixamento

$$s_{fA} = \frac{1}{2} \int_0^\infty \frac{J_0(r_A \sqrt{\omega x})}{\Re_1 - \Re_2} \times \left[\left(1 + \frac{\gamma}{\Re_1}\right) (e^{\Re_1 t_A} - 1) - \left(1 + \frac{\gamma}{\Re_2}\right) (e^{\Re_2 t_A} - 1) \right] dx \quad (3.54)$$

$\Re_1$ e $\Re_2$ são as raízes da equação auxiliar:

$$\Re^2 + \left(\frac{\gamma}{\omega + x}\right) \Re + \gamma x = 0 \quad (3.55)$$

γ é um parâmetro adimensional $\gamma = \frac{\lambda}{1 - \omega}$

x é uma variável genérica de integração

$$s_{fA} = \frac{2\pi T_f s_f}{Q} \quad (3.56)$$

$$t_A = \frac{T_f t}{(S_f + S_m) r_w^2} \quad (3.57)$$

$$r_A = \frac{r}{r_w} \quad \omega = \frac{S_f}{S_f + S_m} \quad \lambda = \kappa \frac{T_m}{T_f} r_w^2 \quad (3.58)$$

κ é um fator de forma [L⁻²]

Curvas-padrão:

Não existem curvas padrão. O valor de $s_{fA}(r_A, t_A)$ é obtido calculando numericamente a integral infinita para diferentes pares (λ, ω) . Com os valores de s_{fA} , r_A , t_A , λ , ω , calculam-se os parâmetros procurados

Parâmetros:

$$T_f = \frac{s_{fA} Q}{2\pi s_f} \quad (3.59)$$

$$S_f + S_m = \frac{T_f t}{t_A r_w^2} \quad (3.60)$$

$$S_f = \omega (S_f + S_m) \quad (3.61)$$

$$S_m = (S_f + S_m) - S_f \quad (3.62)$$

$$T_m = \frac{\lambda T_f}{\alpha r_w^2} \quad (3.63)$$

Sistema de blocos e fraturas horizontais

Neste caso, admite-se que a formação rochosa real, constituída de blocos irregulares, de tamanho e forma diferentes, separados por fissuras, é substituída por uma formação ideal, constituída de blocos horizontais, separados por fissuras horizontais (figura 3.1) e com extensão lateral infinita (Boulton-& Streltsova 1977). Os blocos de rocha idealizados, com espessura constante $2H$, representam a espessura média dos blocos verdadeiros, enquanto que as fissuras horizontais idealizadas, com espessura $2a$, representam a espessura média das fissuras reais.

Devido à simetria vertical deste sistema (figura 3.2), conclui-se que não existe componente de fluxo vertical através da linha central de um bloco ou de uma fissura, já que uma dessas linhas centrais representa o topo, e a outra, a base do aquífero. Assim sendo, para fins de análise, Boulton & Streltsova, (op.cit.) consideram o fluxo apenas em uma unidade, bloco-fissura, compreendida entre as linhas centrais de um bloco e da fissura adjacente.

Fig. 3.2 - Idealização de uma formação rochosa fissurada segundo Boulton & Streltsova, 1977

O módulo, bloco-fissura, sombreado na figura 3.2, ampliado e associado a um poço de bombeamento, é ilustrado na figura 3.3 como um elemento representativo de dimensões H e a , no plano vertical de coordenadas (z, r) . Streltsova-Adams, (1978) estuda dois casos: um, mais simples, em que o fluxo no bloco poroso é suposto vertical e outro, incluindo componentes de fluxo horizontal e vertical no bloco poroso. Ambos, são apresentados a seguir.

Fig. 3.3 - Elemento bloco-fissura, de um meio fissurado com fluxo vertical no bloco (Boulton & Streltsova, 1977).

Caso 1: Fluxo vertical no bloco

Para esse caso mais simples (fig. 3.3), restrito a fluxo vertical no bloco poroso, a dedução das equações do rebaixamento se faz com base nas seguintes hipóteses:

- O fluxo na fratura é confinado e obedece à lei de Darcy.
- O bloco rochoso e a fratura são compressíveis.
- O fluxo é vertical no bloco poroso e horizontal na fissura, ou seja, a entrada de água para o poço se faz apenas pela fratura.
- Não existe resistência ao fluxo ao longo do contato bloco-fissura.
- A espessura da fissura (ao longo da qual se considera o rebaixamento), é pequena, em relação à espessura do bloco.
- O raio do poço é desprezível e a descarga bombeada é constante, a partir do instante $t = 0$.

Equações do rebaixamento, na fissura e na matriz dos blocos:

$$s_f = \frac{Q}{2\pi T_f} \int_0^\infty x' J_0 \left(\frac{r}{B_f} x' \right) \left[\sum_{j=1}^\infty \psi_j \right] dx' \quad (3.64)$$

$$s_m = \frac{Q}{2\pi T_f} \int_0^\infty x' J_0 \left(\frac{r}{B_f} x' \right) \left[\sum_{j=1}^\infty \psi_j \varphi_j \right] dx' \quad (3.65)$$

onde

$$\psi_j = \frac{1 - \exp \left[-0.25 \beta_j^2 (S_f / S_m) (r / B_f)^2 \theta \right]}{(S_f / S_m) \beta_j^2 + 0.5 \beta_j (\tan \beta_j + \beta_j \sec^2 \beta_j)} \quad (3.66)$$

$$\varphi_j = \cos(\beta_j z / H) + \tan \beta_j \operatorname{sen}(\beta_j z / H) \quad (3.67)$$

$$c = \frac{T_m}{T_f} \quad (3.68)$$

β_j é uma raiz positiva da equação

$$(S_f / S_m) \beta_j^2 + \beta_j \tan \beta_j = x'^2 \quad (3.69)$$

Curvas-padrão: $W_f(\alpha, \beta, S_f / S_m)$ e $W_m(\alpha, \beta, S_f / S_m)$

$$W_f = \frac{4\pi T s_f}{Q} \quad \text{e} \quad W_m = \frac{4\pi T s_m}{Q} \quad (3.70)$$

$$\alpha = \frac{4T_f t}{r^2 S_f} \quad \text{e} \quad \beta = \frac{r}{B_f} \quad (3.71)$$

$$c = \frac{T_m}{T_f} = \left(\frac{H}{B_f} \right)^2 \quad (3.72)$$

Parâmetros:

$$T_f = \frac{Q}{4\pi s_f} W_f = \frac{Q}{4\pi s_m} W_m \quad (3.73)$$

$$S_f = \frac{4 t T_f}{\alpha r^2} \quad (3.74)$$

$$T_m = cT_f \quad (3.75)$$

$$B_f = \frac{H}{\sqrt{c}} \quad (3.76)$$

Caso 2: O fluxo no bloco possui componente horizontal e vertical

Este caso é ilustrado na figura 3.4 e as hipóteses consideradas, são:

- O fluxo na fratura é confinado e obedece à lei de Darcy.
- O bloco rochoso e a fratura são compressíveis.
- A entrada de água para o poço se faz tanto pela fratura quanto pelo bloco, já que existe componente horizontal de fluxo no bloco.
- Não existe resistência ao fluxo ao longo do contato bloco-fissura.
- A espessura da fissura (ao longo da qual se considera o rebaixamento) é pequena, em relação à espessura do bloco.
- O raio do poço é desprezível e a descarga bombeada é constante, a partir do instante $t = 0$.

Fig. 3.4 - Elemento bloco-fissura de uma formação fraturada, com fluxo horizontal e vertical no bloco (Boulton & Streltsova, 1977).

Equações do rebaixamento, na fissura e na matriz dos blocos:

$$s_f = \frac{-Q}{2\pi (T_f + T_m)} \int_0^\infty x J_0\left(\frac{r}{H}x\right) \left[\sum_{j=1}^\infty \Psi_j \right] dx \quad (3.77)$$

$$s_m = \frac{-Q}{2\pi (T_f + T_m)} \int_0^\infty x J_0\left(\frac{r}{H}x\right) \left[\sum_{j=1}^\infty \Psi_j \Phi_j \right] dx \quad (3.78)$$

$$\Psi_j = \frac{1 - e^{\lambda_j} 2j'}{(\lambda_m)_j H^2 \chi_j} \left[1 + \frac{c_1 \tan(\Re_m)_j}{(\Re_m)_j} \right] \quad (3.79)$$

$$\Phi_j = \frac{\left\{ \cos\left[(\Re_m)_j \left(1 - \frac{z}{H}\right) \right] \right\}}{\cos(\Re_m)_j} \quad (3.80)$$

$$(\lambda_m)_j = -\frac{T_m}{H_m S_m} [x^2 + (\Re_m)_j^2] \quad (3.81)$$

$$\chi_j = \frac{S_f}{T_f} + \frac{c_2}{2} \frac{S_m}{T_m} \left[\frac{\tan(\Re_m)_j}{(\Re_m)_j} + \sec^2(\Re_m)_j \right] \quad (3.82)$$

$$c_1 = \frac{T_m S_f}{T_f S_m} \quad c_2 = \frac{T_m}{T_f} \quad T = T_m + T_f \quad (3.83)$$

$(\Re_m)_j$ é uma raiz positiva da equação

$$(\Re_m)_j [c_1 (\Re_m)_j + c_2 \tan(\Re_m)_j] = (1 - c_1) x^2 \quad (3.84)$$

Curvas-padrão:

$W_f(\alpha, \beta, c)$ e $W_m(\alpha, \beta, c)$

$$W_f = \frac{4\pi T s_f}{Q} \quad W_m = \frac{4\pi T s_m}{Q} \quad (3.85)$$

$$\alpha = \frac{4T_f t}{r^2 S_f} \quad \beta = \frac{r}{H} \quad c = \frac{T_m}{T_f} \quad (3.86)$$

Parâmetros

$$T = \frac{Q}{4\pi s_f} W_f \quad (3.87)$$

$$T = \frac{Q}{4\pi s_m} W_m$$

$$T_f = \frac{T}{1 + c_2} \quad (3.88)$$

$$T_m = c_2 T_f \quad (3.89)$$

$$S_f = \frac{4 t T_f}{\alpha r^2} \quad (3.90)$$

$$S_m = \frac{c_2}{c_1} S_f \quad (3.91)$$

3.3.- MODELO DE MEIO DESCONTÍNUO

Os modelos de meio descontínuo, também chamados de *canais discretos interconectados*, partem da hipótese de que o fluxo através da matriz porosa da rocha (porosidade primária) é desprezível e consideram apenas o fluxo através das fraturas, simuladas como sistemas de tubos ou de placas horizontais paralelas.

Os processos adotados envolvem experimentos de laboratório, análises de testemunhos, perfilagens geofísicas e testes de campo mais ligados à hidráulica de rochas do que propriamente à hidrogeologia convencional. Sauveplane (1984) descreve a hidráulica de rochas como um ramo da hidrogeotécnica que enfoca as condições de pressão ligadas à água em maciços descontínuos de rochas consolidadas e considera que a fronteira dessa disciplina com a hidrogeologia dos aquíferos fraturados não é clara. As técnicas que caracterizam o estágio de conhecimento, até agora, têm sido desenvolvidas separadamente.

De acordo com essa conceituação discreta, considera-se que:

- os modelos resultantes simulam a produtividade de uma fratura isolada, de extensão limitada.
- um aquífero fraturado é encarado como um reservatório marcado por um certo padrão de fraturas ou como o resultado da junção de umas poucas fraturas extensas, cada uma das quais marcada por um comportamento hidráulico específico.
- não existem soluções gráficas, através de famílias de curvas padrão representadas em papel bilogarítmico, com o rebaixamento e o tempo expressos sob a forma de parâmetros adimensionais.

3.4 - VALIDADE DOS MODELOS CONCEITUAIS DE FLUXO EM MEIO HETEROGÊNEO

A existência das três diferentes linhas de idéias conceituais, descritas nos itens anteriores (3.1 a 3.3), por si só já é indicativa de que ainda não existe uma metodologia universalmente aceita, para análise de testes de bombeamento em meio heterogêneo.

Sauveplane (1984), por exemplo, apresenta uma avaliação global de alguns dos principais modelos que podem ser usados para analisar testes de *vazão constante*, para aquíferos fissurados confinados. Referindo-se às equações (3.64), (3.66) e (3.69), de Boulton & Streltsova (1977), que tentou avaliar, afirma que a complexidade das mesmas chega a ser de tal ordem, que, quando se usam diferentes técnicas de avaliação do rebaixamento adimensional no bloco rochoso, os resultados podem ser bastante diferentes. Conclui, por fim, que as condições laterais de contorno dos modelos que descreveu, são na verdade mais complexas do que as idealizadas, e que ainda é preciso mais trabalho para tornar essas condições comparáveis às dos meios porosos granulares. Sugere, neste sentido, inversões do plano de Laplace para o plano real e técnicas de aproximação numérica.

Boehmer (1993), fez aplicações de alguns dos métodos de análise de testes de bombeamento, para *vazão constante*, desenvolvidos nos últimos 20 anos, em aquíferos de rochas fissuradas. Com o método de dupla porosidade de Bourdet & Gringarten (1980, apud Gringarten 1982), encontrou resultados que julgou satisfatórios, para os parâmetros, ao determinar as propriedades hidráulicas de um gnaiss fraturado, intemperizado, em Kenhardt, África do Sul. Todavia, não encontrou nenhum método satisfatório para zonas de falhas de alta permeabilidade e para zonas cársticas de dissolução.

No presente trabalho, as aplicações feitas (parte II), para diversos tipos de rochas fraturadas, e para uns poucos testes efetuados em zonas cársticas, usando o método da capacidade específica fractal (para determinar a condição de fluxo uniforme), associado ao método de Boulton (1963), forneceram resultados que representam as primeiras estimativas de propriedades hidráulicas feitas pelo autor em testes de bombeamento de poços em meio fraturado.

Tratando-se portanto de "primeiras" estimativas de propriedades hidráulicas, fica difícil avaliar, no momento, o significado das ordens de grandeza dos valores encontrados. Por isso, julgou-se conveniente uma comparação com resultados de estudos recentes.

Neste sentido vale relatar que em Lindau, ao sul da Floresta Negra, onde foi projetada uma barragem, um túnel de reconhecimento com sondagens de 2", horizontais e inclinadas, nas vizinhanças de um jazimento mineral, proporcionou, segundo Himmelsbach et al. (1994), condições quase ideais para o estudo de fenômenos de transporte numa zona de falhas e fraturas de alta permeabilidade.

No referido local, através de testes relativamente sofisticados¹, usando traçadores e criando artificialmente gradientes hidráulicos, por meio de bombeamento em um só poço (teste monopolo) ou através de bombeamento em um poço e injeção em um outro (teste dipolo), Himmelsbach et al. (1994) op.cit, fizeram determinações dos parâmetros hidráulicos do meio.

Foi usado um modelo de dupla porosidade com fluxo numa única fratura, denominado de "Single Fissure Dispersion Model" (SFDM), desenvolvido por Maloszewski e Zuber (1985,1990). Os resultados revelaram aberturas médias de fissuras na faixa de 0,1 a 0,3 mm; porosidades matriciais entre 5 e 9%, atribuídas a "fissuras mortas" (não conectadas) e a cavidades de dissolução de alguns constituintes minerais intemperizados por soluções aquosas descendentes. As porosidades das fissuras ficaram na faixa de 0,1 a 0,3%. Não foi mencionado o tipo de rocha e nem os valores de condutividade hidráulica, ressaltando-se tão somente que os testes se fizeram numa zona altamente permeável.

¹Usando sensores eletrônicos para medição de pressão e controle do gradiente hidráulico entre poços e ainda conjuntos especiais de válvulas para manter a vazão constante (monitorada continuamente através de hidrômetros) e garantir um regime de fluxo estacionário em condições de campo.

4. FRACTAIS E GEOMETRIA FRACTAL

4.1 - O CONCEITO DE FRACTAIS

O conceito de fractal foi estabelecido por Mandelbrot (1967) que definiu o termo a partir do equivalente latino *fractus*, verbo *frangere* que significa "quebrar", isto é, criar fragmentos irregulares *invariantes de escala*. A geometria fractal descreve muitos dos padrões da natureza através de uma família de formas denominadas *fractais*. As mais úteis envolvem *chance*, isto é, as suas regularidades (e irregularidades), são estatísticas. Alguns conjuntos fractais são curvas ou superfícies, outros são imagens.

Quando os fractais são vistos como imagens, formas ou estruturas, eles aparecem como objetos estáticos, não se podendo perceber como evoluiu ou foi gerada uma dada estrutura. O mesmo acontece quando se olha para uma montanha ignorando os processos dinâmicos (atividade tectônica e erosiva) que deram lugar à sua geometria. A complexidade de uma estrutura não é necessariamente resultante de um processo complicado. Ao que parece, diante de uma estrutura ou padrão muito complexo - e este é um dos impactos mais surpreendentes da geometria fractal e da *teoria do caos* - existe sempre uma boa chance de que um processo muito simples tenha sido responsável por ele. Nem por isso a simplicidade de um processo significa que será fácil compreender as suas conseqüências (Peitgen, et al. 1992).

Por exemplo, no dizer do filósofo Spinoza, "na natureza, nada é aleatório ... uma coisa somente nos parece aleatória devido às limitações do nosso conhecimento". Para Feder (1988), na natureza, o verdadeiro estado de um sistema, por mais perfeito que seja, é sempre caracterizado pela aleatoriedade. Neste sentido, desenvolve o conceito de *fractais aleatórios*, como uma ferramenta útil na descrição da natureza, baseado na evidência de que muitos fenômenos naturais podem ser descritos como fractais.

De fato, todo sistema material está sujeito a flutuações térmicas. Átomos, moléculas, partículas e outros componentes do mundo natural, se encontram em eterno movimento, com colisões aleatórias produzidas pela energia térmica. Esse fenômeno (físico, e não biológico, como se pensava antes da sua descoberta por Robert Brown, em 1828), é conhecido na física como *movimento Browniano* (Brown, 1828).

Ao microscópio, o movimento Browniano de uma partícula parece consistir de uma série de deslocamentos com direção aleatória e com uma magnitude que possui certo valor característico. O deslocamento ("random walk") da partícula em um certo

intervalo de tempo, é independente do seu deslocamento em outro intervalo de tempo e pode ser descrito, passo a passo, do seguinte modo:

- a. Comece em um ponto do plano e escolha uma direção qualquer.
- b. Caminhe nessa direção, até uma certa distância, e pare.
- c. Escolha uma outra direção, mova-se novamente, até uma certa distância, e pare.

Em princípio, não é de se esperar que um processo como esse, caso repetido por centenas ou milhares de vezes, possa gerar alguma coisa consistente, em termos de imagem, mas o *jogo do caos*, descrito a seguir, demonstra o contrário.

Imagine um dado comum, de seis faces, como se tivesse apenas três, isto é, identifique 1 ou 6, como sendo 1; 2 ou 5, como sendo 2 e 3 ou 4, como sendo 3. Um dado desse tipo é um gerador de uma sequência de números aleatórios 3, 2, 3, 3, 1, 2, 3, 1, 1, ..., que vão aparecendo à medida que se vai jogando.

Antes de mais nada, vamos definir o campo de jogo, aqui representado pelo retângulo da figura 4.1, e estabelecer as condições iniciais com a marcação de três pontos, situados nos vértices de um triângulo equilátero imaginário, e identificados, respectivamente, pelos números 1, 2 e 3. Esses pontos, são chamados *pontos marcados*.

Figura 4.1 - Domínio considerado para o jogo do caos, com os três pontos marcados.

As regras do jogo, são as seguintes:

- Para começar o jogo, escolha um ponto arbitrário ou aleatório inicial z_0 . Este é o "ponto de jogo".
- Efetue o primeiro lançamento do dado, para determinar a direção em que o novo ponto de jogo z_1 (primeiro ponto aleatório gerado pelo processo), deverá ser localizado. Supondo que o resultado seja 2, o ponto z_1 será posicionado na metade da linha que une o ponto inicial z_0 e o "ponto marcado" 2 (figura 4.2).
- Faça agora um novo lançamento do dado, adotando a regra (b).

Repetindo-se a regra (b), tantas vezes quantas se deseje, gera-se uma sequência $z_1, \dots, z_n$ de pontos. Para cada resultado k ($= 1, 2$ ou 3), o novo ponto de jogo z_{n+1} é localizado exatamente na meia distância entre z_n e o ponto marcado k . Para facilitar a identificação da sucessão dos pontos de jogo, eles são conectados por segmentos contínuos de retas e para facilitar a identificação da direção, na qual se processou o deslocamento, os segmentos entre os pontos de jogo e os pontos marcados k , são interrompidos na figura 4.2.

Fig. 4.2 - Primeiros seis passos do jogo do caos. A partir do ponto inicial z_0 ($n=0$), cada ponto z_{n+1} é localizado na metade do segmento de reta que une o ponto z_n e o ponto marcado k ($=1, 2$ ou 3), indicado pelo lançamento do dado.

À primeira vista, a julgar pela disposição dos primeiros seis pontos z_n , no plano da figura 4.2, tudo parece indicar que a repetição desse processo, durante um grande número de vezes, deverá gerar um amontoado de pontos, aleatoriamente distribuídos no plano da mencionada figura. O resultado, no entanto, totalmente diverso do esperado, é mostrado na figura 4.3, na qual os segmentos de retas (usados na figura 4.2 para facilitar o entendimento do processo) foram excluídos, deixando-se tão somente os pontos do jogo.

Fig. 4.3 - Jogo do caos: a) após 100 iterações; b) após 500 iterações; c) após 1000 iterações; d) após 10000 iterações (Peitgen et al. 1992).

Na figura 4.3a, o processo foi repetido 100 vezes; em 4.3b, 500 vezes; em 4.3c, 1000 vezes e finalmente, 10000 vezes, na figura 4.3d. Embora o processo seja aleatório, o padrão, para o qual converge o conjunto de todos os pontos, é uma estrutura de forma perfeitamente determinística, conhecida como **triângulo de Sierpinsky**¹, que nada mais é, do que um fractal clássico. Convém notar que existem, na figura 4.3, alguns pontos anômalos que evidentemente não pertencem ao triângulo de Sierpinsky, mas que possivelmente se explicam pela dificuldade de geração de números realmente aleatórios em um computador².

¹Waclau Sierpinsky, matemático polones (1882-1969).

²Anyone who considers arithmetical methods of producing random digits is, of course, in a state of sin. John von Neuman (1951) in Peitgen et al. (1992).

4.2- PROCESSO DE GERAÇÃO DE UM CONJUNTO FRACTAL

O processo de geração de um conjunto fractal é iterativo. Isto é: i) parte-se de uma imagem do objeto (*iniciador*); ii) aplica-se um *gerador*, isto é, uma *transformação de similaridade* ou *similitude*, como por exemplo, uma regra de redução; iii) repete-se o processo. Essa operação pode ser implementada em uma **máquina**, da forma ilustrada na figura 4.4, isto é, com a *saída* de uma iteração constituindo a *entrada* da próxima.

Fig. 4.4- Esquema básico de uma máquina de processamento iterativo.

Os **processos iterativos**, também chamados de "**feedback**" são fundamentais em todas as ciências exatas. Foram introduzidos por Newton e Leibnitz, há cerca de 300 anos, sob a forma de leis dinâmicas que hoje são usadas na modelagem de fenômenos naturais. Essas *leis dinâmicas* (ou *iterações*) permitem avaliar, por exemplo, a posição e a velocidade de uma partícula, num determinado instante, usando os valores desses parâmetros no instante precedente.

A **máquina iterativa** da figura 4.4, é constituída de quatro unidades, sendo três de armazenamento e uma de processamento, a saber, respectivamente: i) unidade de entrada (UE); ii) unidade de controle (UC); iii) unidade de saída (US); iv) unidade de processamento (UP). O sistema opera com um clock que monitora a ação de cada componente e conta os ciclos. A unidade de controle atua como uma caixa de câmbio, colocando o iterador em um estado particular, antes do funcionamento. O processo é implementado em dois ciclos:

Ciclo preparatório:

- i) introduz dados na UE
- ii) introduz dados na UC
- iii) transmite o conteúdo da UC para a UP.

Ciclo de funcionamento:

- i) transmite o conteúdo da UE para a UP
- ii) processa o conteúdo da UE
- iii) transmite o resultado para a US
- iv) transmite o conteúdo da US para a UP

4.2.1 - Exemplos de processos iterativos determinísticos

Seja inicialmente uma MSCR (**máquina de simples cópias e redução**), com a unidade de controle colocada em um modo fixo, por exemplo, redução, de 50%. A tendência desse processo, como sugere a figura 4.5, é a de transformar qualquer imagem, após um certo número de ciclos iterativos, em um simples ponto.

Fig. 4.5- Ilustração de um processo iterativo de redução de uma imagem numa MSCR. Nota-se que este processo tende a transformar o objeto em um ponto, com o aumento do número de iterações.

Considere-se agora uma MMCR (**máquina de múltiplas cópias e redução**), constituída, por exemplo, de 3 lentes que a cada ciclo iterativo transformam uma dada imagem em 3 cópias reduzidas, digamos 50%, e dispostas segundo um triângulo equilátero.

Com o aumento do número de iterações observa-se, neste caso, que o arranjo das imagens geradas, a cada ciclo iterativo, não tende a ser transformado em um ponto, como se poderia pensar, mas sim em um triângulo de Sierpinsky (figura 4.5). Independente da imagem inicial, o processo tende sempre para a mesma imagem final. Essa imagem é chamada de *atrator* do processo. Além disso, quando o processo se inicia com o atrator, nada acontece, isto é, ele permanece *invariante*.

Fig. 4.6 -Começando com um objeto qualquer e gerando a cada iteração três imagens reduzidas e dispostas segundo um triângulo equilátero, esse processo sempre acaba formando um triângulo de Sierpinsky. Quando o atrator é a imagem inicial, ele se mantém invariante (fonte: Peitgen et al 1992).

A idéia da máquina de múltiplas cópias e redução (MMCR) equivale ao que se conhece hoje em matemática como *sistema determinístico de funções iteradas* ("iterated function systems" ou IFS). A chave do problema é que a máquina funciona iterativamente, realimentando-se, a cada ciclo, da sua própria saída. O resultado pode ser um simples *ponto*, quando a máquina é uma MSCR, (como na figura 4.2) ou pode ser alguma estrutura consistente e poderosa, como é o caso do *triângulo de Sierpinsky*, quando a máquina é uma MMCR (como na figura 4.3).

4.3 - CAOS EM PROCESSOS ITERATIVOS DETERMINÍSTICOS

Grande parte da comunidade científica acredita hoje que o conceito de **caos determinístico** (Li & Yorke 1975), constitui uma verdadeira revolução na mecânica do contínuo (Bergé et al. 1986). Particularmente na mecânica dos fluidos, a solução dos

problemas sempre foi pensada como sendo determinística. Conhecidas as condições iniciais e de contorno, em uma região considerada, a evolução da solução com o tempo, no domínio, é perfeitamente determinada. Isto de fato acontece, por exemplo, na análise de fluxos transientes não turbulentos, quando se usam equações diferenciais lineares análogas da equação do calor e da equação da onda, ou quando se usa a equação de Laplace, nos regimes de fluxos estacionários.

Já os problemas de fluxos turbulentos de fluidos, por exemplo, na atmosfera e nos oceanos, assumem um comportamento que ainda não foi possível descrever através de processos determinísticos, mas sim estatisticamente e ou por meio de análise espectral.

A presença do caos determinístico é observada em equações não lineares. Encontra-se no limiar entre as soluções **estáveis** de um processo (equação ou modelo) determinístico e as soluções que são **instáveis**, a perturbações infinitesimais. Se duas soluções determinísticas, que diferem inicialmente por uma quantidade muito pequena, divergem exponencialmente, quando evoluem no tempo, o processo é definido como **caótico**. Nada pode servir melhor do que os exemplos concretos de caos determinístico apresentados a seguir para ilustrar o conceito.

4.3.1 - Iteração de uma expressão quadrática

Vamos examinar a avaliação da equação não linear $y = x^2 + c$ por meio de um processo iterativo, isto é, como se fosse uma máquina iterativa (figura 4.7). O processo começa com a introdução das condições iniciais, isto é, com a introdução dos valores do parâmetro de controle c , e do parâmetro de entrada x , no nível de iteração $n = 0$. A cada ciclo n o valor y calculado, é usado como entrada no ciclo $n + 1$, ou seja: $x_{n+1} = x_n^2 + c$.

Fig. 4.7 - Representação esquemática do processamento iterativo da equação não linear $y = x^2 + c$

Um processo iterativo é dito **estável** quando ele converge para um ou mais valores fixos, independente das condições iniciais, como por exemplo no caso da MMCR, ilustrado na figura 4.6, onde a imagem final obtida é sempre a mesma, qualquer que seja

a imagem inicial. Essa condição de estabilidade é desejável, na medida em que pode garantir que um dado processo é previsível e os pequenos erros produzidos pela matemática de precisão finita (típicos dos computadores) podem ser considerados desprezíveis.

Implementando-se o iterador quadrático da figura 4.7 com o valor da constante (ou parâmetro de controle) $c = -1$, e valor inicial $x_0 = 0.5$, verifica-se que o processo converge para um ciclo estável de dois pontos, correspondentes aos valores de $x = 0$ e $x = -1$, a partir da 16ª iteração (tabela 4.1).

Tabela 4.1 -Convergência do iterador quadrático com $c = -1$ e $x_0 = 0.5$, para os pontos estáveis $x = 0$ e $x = -1$, a partir da 16ª iteração, mostrada até a 30ª iteração

n	x	$y = x^2 - 1$
0	0.5	
1	0.5	-0.75
2	-0.75	-0.4375
3	-0.4375	-0.80859375
4	-0.80859375	-0.3461761474609375
5	-0.3461761474609375	-0.88016206026077271
6	-0.88016206026077271	-0.22531472146511078
7	-0.22531472146511078	-0.9492332935333252
8	-0.9492332935333252	-0.09895619004964828
9	-0.09895619004964828	-0.99020767211914062
10	-0.99020767211914062	-0.01948876492679119
15	-0.00000115361820008	-1
16	-1	-0
17	-0	-1
20	-1	0
30	-1	0

As implementações do iterador quadrático, mostradas nas tabelas 4.1 e 4.2, para os valores iniciais adotados, são exemplos de soluções estáveis. Conforme já foi ressaltado, a estabilidade de um processo é uma condição essencial, porque significa que o mesmo é previsível. Para $c = -2$ e $x_0 = 2$, o processo se mantém perfeitamente estável em todos os níveis de iteração, no ponto fixo $x = 2$ (tabela 4.2).

Tabela 4.2 - Estabilidade do iterador quadrático com $c = -2$ e $x_0 = 2$ (solução estável no ponto fixo $x = 2$), já a partir da primeira iteração e mostrada até a 20ª iteração

n	x	$y = x^2 - 2$
0	2	
1	2	2
10	2	2
20	2	2

A experiência, no entanto, mostra que as soluções estáveis, longe de constituírem a regra, são exceções. Veja-se, por exemplo, a implementação da tabela 4.3. Para uma condição inicial muito próxima da anterior, isto é, com o mesmo parâmetro de controle $c = -2$ e um valor de $x_0 = 1.99$ (ligeiramente diferente de 2), observa-se um comportamento caótico, totalmente instável, sem qualquer tendência para uma estabilização mesmo depois de 500 iterações.

Tabela 4.3- Comportamento instável do iterador quadrático com $c = -2$ e $x_0 = 1.99$, para uma condição inicial muito próxima de outra que leva a uma solução estável (tabela 4.2)

n	x	$y = x^2 - 1.99$
0	1.990000009536743	
1	1.990000009536743	1.960100054740906
2	1.960100054740906	1.841992139816284
5	-0.059731770306826	-1.996432065963745
10	1.153828620910645	-0.668679535388947
20	0.367434322834015	-1.864992022514343
30	1.522595286369324	0.318296253681183
40	1.977428197860718	1.910222172737122
50	-1.997295379638672	1.989189028739929
100	-1.542588710784912	0.379579812288284
200	1.607672214508057	0.584610104560852
300	-0.884292483329773	-1.218026757240295
400	-0.260920196771622	-1.931920647621155
500	-0.972649276256561	-1.053953289985657

Quais seriam, então, as razões da instabilidade desse processo ? Uma delas, sem dúvida, é a operação quadrática, em consequência da qual o número de casas decimais, necessário para representar com exatidão as sucessivas saídas do processo, praticamente

duplica a cada iteração (ver as quatro primeiras iterações mostradas na tabela 4.1). Na verdade, com o aumento do número de iterações, o número de casas decimais tende para infinito, mas os computadores e máquinas de calcular, trabalham com um número finito de dígitos.

O erro de arredondamento (por exemplo, substituição de $1/3$ por $0.3333...$) tem magnitude controlada pelo número de casas decimais e por isso ele sempre pode ser considerado desprezível nos processos estáveis. Como regra geral, todavia, o truncamento constitui um sério problema (Lorenz, 1963) e responde pelo que se denomina de *caos*, em processos iterativos determinísticos.

4.3.2 - Iteração de um modelo de crescimento populacional.

Um modelo de crescimento populacional é simplesmente uma lei dinâmica que permite prever o desenvolvimento da população de uma dada espécie biológica com o tempo, medido em incrementos $n = 0, 1, 2, 3, \dots$ (horas, dias, meses, etc). Um exemplo clássico é o modelo de Verhulst³, também chamado de modelo **logístico**⁴. Ele supõe que a população P_n , em um instante n se desenvolve em um ambiente constante e que existe, por esse motivo, uma população máxima de saturação N , suportável pelo ambiente. Assim, o modelo utiliza a população normalizada ou população relativa $p_n = P_n / N$, de modo que a taxa de crescimento r , da população no tempo n , é proporcional à fração do ambiente ainda não ocupada pela população no tempo n , ou seja, proporcional a $1 - p_n$. Isto se expressa matematicamente pela equação

$$\frac{P_{n+1} - P_n}{P_n} \propto 1 - p_n \quad (4.1)$$

onde, introduzindo a constante de proporcionalidade r , obtém-se

$$\frac{P_{n+1} - P_n}{P_n} = r(1 - p_n) \quad (4.2)$$

e finalmente o modelo populacional considerado expresso por

$$P_{n+1} = P_n + rP_n(1 - p_n) \quad (4.3)$$

A experiência mostra que para muitos valores de r , não existe solução explícita da equação (4.3) e somente é possível obter uma solução empregando um processo

³Pierre François Verhulst, matemático belga.

⁴do francês *logis* (casa, alojamento, quarto).

iterativo. Mesmo assim, muitas das soluções obtidas são tipicamente instáveis. Veja-se, por exemplo, o resultado de duas implementações dessa equação (tabela 4.4) para $r = 3$ e população normalizada inicial $p_0 = 0,01$, quando ela é expressa de duas formas diferentes, porém matematicamente idênticas, a saber:

$$\begin{cases} p + rp(1 - p) \\ e \\ (1 + r)p - rp^2 \end{cases} \quad (4.4)$$

Tabela 4.4 - Duas implementações da equação logística, para as mesmas condições iniciais, ($p_0 = 0.01$, $r = 3$), levam a resultados diferentes simplesmente por uma mudança de forma da mesma expressão matemática

n	$p + rp(1 - p)$	$(1 + r)p - rp^2$
1	0.039699997752905	0.039699997752905
2	0.154071733355522	0.154071733355522
3	0.545072615146637	0.545072615146637
4	1.288977980613709	1.288977980613709
5	0.171519175171852	0.171519175171852
10	0.722912967205048	0.722912967205048
15	1.270243763923645	1.270243763923645
20	0.597880184650421	0.597880184650421
25	1.324164152145386	1.324164152145386
30	0.289659470319748	0.289659470319748
34	1.321075201034546	1.321075201034546
35	0.048581 <u>529408693</u>	0.048581 <u>61509037</u>
40	0.0249 <u>51700121164</u>	0.0249 <u>49751794338</u>
50	0.75 <u>2005994319916</u>	0.75 <u>9300887584686</u>
60	<u>0.083214849233627</u>	<u>0.795438587665558</u>
70	<u>0.877096712589264</u>	<u>0.954483985900879</u>
80	<u>1.013549566268921</u>	<u>0.65506374835968</u>
90	<u>0.400907576084137</u>	<u>0.321491986513138</u>
100	<u>0.364688813686371</u>	<u>0.887822449207306</u>

Os resultados apresentados na tabela 4.4 mostram que, para 15 casas decimais, os valores obtidos são idênticos até a 34ª iteração. Na 35ª iteração o número de casas decimais idênticas se reduz para seis; diminui para quatro na 40ª iteração e fica restrito a apenas duas na 50ª iteração. Daí em diante os valores são totalmente diferentes. Esse

incrível comportamento da equação logística, discutido por Peitgen et al. (1992), revelando que uma mesma lei partindo das mesmas condições iniciais pode conduzir a resultados diferentes, é uma prova da presença do caos, em um processo iterativo determinístico. Um dos primeiros cientistas a se dar conta disso foi o americano Edward Lorenz, por volta de 1956 quando tentava implementar o seu modelo de previsão de tempo a longo prazo e concluiu que isto não é possível. Na verdade, existe uma dependência muito grande das condições iniciais, e erros de observação, por menores que sejam, acabam sendo amplificados a ponto de se tornarem significativos, gerando o chamado caos determinístico.

4.3.3 - Ilustração gráfica de um processo iterativo

O comportamento convergente ou divergente (isto é, estável ou instável) dos iteradores quadrático e logístico, descritos nos itens 4.3.1 e 4.3.2, anteriores, pode ser ilustrado por meio do gráfico da função

$$\begin{cases} y = ax(1-x) \\ \text{ou} \\ x_{n+1} = ax_n(1-x_n) \end{cases} \quad (4.5)$$

O referido gráfico é uma parábola que passa pelos pontos (0,0) e (1,0) para qualquer valor de a e tem vértice localizado no ponto $x = 1/2$, $y = a/4$. O processo iterativo da equação (4.5) é equivalente ao da equação logística $p_{n+1} = p_n + rp_n(1-p_n)$ ou da equação quadrática $x_{n+1} = x_n^2 + c$.

Para um valor inicial $x = x_0$, situado no intervalo fechado $[0,1]$ a equação (4.5) produz uma seqüência de valores iterados $x_1, x_2, \dots$, que também ficam restritos a esse mesmo intervalo, daí porque essa equação é usada para ilustrar o processo.

A cada ciclo n introduz-se um valor x_n com o qual se calcula um valor de y que é um ponto da parábola. Esse valor y é então usado como o novo x , para processamento do ciclo $n+1$.

Para visualizar esse processo iterativo constrói-se o gráfico (parábola) da equação (4.5) no intervalo fechado $[0,1]$, traçando ainda o bissetor a fim de ilustrar a retro-substituição $y \rightarrow x$. As figuras 4.8 a 4.12 ilustram diferentes situações envolvendo soluções estáveis (convergentes para um ponto fixo e para um ciclo de dois pontos

fixos). As figuras 4.13 a 4.15 ilustram uma solução instável (divergente ou de comportamento caótico).

Fig. 4.8 - Ilustração do processo iterativo de convergência da equação logística (4.5) para uma solução estável no ponto $x = 0$, sob condições iniciais $a = 0.8$ e $x_0 = 0.4$.

Fig. 4.9 - Ilustração do processo iterativo de convergência da equação logística (4.5) para uma solução estável no ponto $x = 1/3$ sob condições iniciais $a = 1.5$ e $x_0 = 0.1$

Fig. 4.10 - Ilustração do processo iterativo de convergência da equação logística (4.5) para uma solução estável no ponto $x = 0.622642$ sob condições iniciais $a = 2.65$ e $x_0 = 0.1$.

Fig. 4.11 - Ilustração do processo iterativo de convergência da equação logística (4.5) para uma solução estável no ponto $x = 0.636364$, sob condições iniciais $a = 2.75$ e $x_0 = 0.4$.

Fig 4.12 - Ilustração do processo iterativo de convergência da equação logística (4.5) para um ciclo estável de dois pontos: $x = 0.533494$ e $x = 0.783966$, sob condições iniciais $a = 3.15$ e $x_0 = 0.1$

Fig. 4.13 - Ilustração do processo iterativo de divergência, instabilidade ou comportamento caótico da equação logística (4.5), para 25 iterações, sob condições iniciais $a = 4.0$ e $x_0 = 0.1$

Fig. 4.14 - Ilustração do processo iterativo de divergência, instabilidade ou comportamento caótico da equação logística (4.5) para 50 iterações, sob condições iniciais $a = 4.0$ e $x_0 = 0.1$

Fig. 4.15 - Ilustração do processo iterativo de divergência, instabilidade ou comportamento caótico da equação logística (4.5) para 100 iterações, sob condições iniciais $a = 4.0$ e $x_0 = 0.1$

4.4 - FRACTAIS CLÁSSICOS

4.4.1 - O conjunto de Cantor⁵

É um dos mais importantes fractais conhecidos e tem influência em sistemas dinâmicos caóticos. Trata-se de um conjunto infinito de pontos, no intervalo unitário fechado $[0,1]$, representado por números como 0, 1, $1/3$, $2/3$, $2/9$, $7/9$, $1/27$, $2/27$

A construção desse conjunto é feita partindo de um segmento normalizado de reta, representando o intervalo $[0,1]$, chamado de *iniciador*. A cada iteração retira-se o terço central do intervalo, mas não os seus pontos extremos. Ou seja, na primeira iteração retira-se o terço central do intervalo $[0,1]$ mas não os números $1/3$ e $2/3$, ficando-se com dois intervalos fechados $[0,1/3]$ e $[2/3, 1]$ de tamanho $1/3$. Na segunda iteração repete-se o processo e ficam quatro intervalos de tamanho $1/9$ (figura 4.16)

n	Objeto inicial	Pedaços N_n	Tamanho τ_n	Escala τ_n / τ_{n+1}
0		1	1	-
1		2	$1/3$	3
2		4	$1/9$	3
3		8	$1/27$	3
...		...	...	...
n		2^n	$\frac{1}{3^n}$	$\frac{1/3^n}{1/3^{n+1}} = 3$

Fig. 4.16 - Ilustração do processo de geração do conjunto de Cantor, onde se observa o número, o tamanho e a escala (invariante) dos fragmentos ou pedaços auto-similares gerados a cada iteração.

⁵George Cantor, matemático alemão (1845-1918).

O processo iterativo gera uma sequência de intervalos fechados, a saber: dois de tamanho $1/3$ na primeira iteração, quatro de tamanho $1/9$ na segunda iteração, oito de tamanho $1/27$ na terceira iteração e 2^n intervalos de tamanho $1/3^n$ na n -ésima iteração.

4.4.2 -A curva de Koch⁶

Trata-se de uma curva de comprimento infinito, sem nenhum trecho retilíneo, totalmente irregular, contínua, e que não admite derivada em nenhum dos seus pontos. É um exemplo de uma curva que não pode ser diferenciada, já que cada um de seus pontos é um vértice e não há como passar por um vértice, uma única tangente. A construção, ilustrada na figura 4.17, começa com um segmento de reta normalizado.

n	Objeto inicial	Pedaços N_n	Tamanho τ_n	Escala τ_n / τ_{n+1}
0	iniciador	1	1	-
1	gerador	4	$1/3$	3
2		4^2	$\frac{1}{3^2}$	3
3		4^3	$\frac{1}{3^3}$	3
4		4^4	$\frac{1}{3^4}$	3
...	...	...	...	...
k		4^n	$\frac{1}{3^n}$	$\frac{1/3^n}{1/3^{n+1}} = 3$

Fig.4.17 - Ilustração do processo de geração da curva de Koch, onde se observa o número, o tamanho e a escala (invariante) dos fragmentos ou pedaços auto-similares gerados a cada iteração

⁶Helge Koch, matemático suíço (1870-1924)

Na primeira iteração o segmento de reta inicial, é dividido em 3 partes de tamanho $1/3$ e o terço central é substituído por um triângulo equilátero sem a base. Obtém-se então uma figura constituída de quatro partes, chamada de *gerador*. A cada nova iteração, a figura obtida na iteração anterior, é reduzida de $1/3$ e colocada em sequência sobre os quatro segmentos de reta do gerador.

Isso é feito por meio de quatro transformações de similaridade, a saber: i) redução de escala $E(1/3, 1/3)$; ii) rotação $R(60^\circ)$ e translação $T(1/3, 0)$; iii) rotação $R(-60^\circ)$ e translação $T(1/2, \sqrt{3}/6)$; iv) translação $T(2/3, 0)$. Em detalhe essas transformações se expressam da forma mostrada na tabela (4.5):

Tabela 4.5- Equações explícitas das transformações de montagem da curva de Koch, levando em conta que $\cos(60^\circ) = \cos(-60^\circ) = 1/2$ e $\sin(60^\circ) = -\sin(-60^\circ) = \sqrt{3}/2$

k	$E(x,y)$	$R(\theta)$	$T(x,y)$	Transformação	Abcissa	Ordenada
1	$(1/3, 1/3)$	0°	$(0, 0)$	$w_1(x,y)$	$\frac{1}{3}x$	$\frac{1}{3}y$
2	$(1/3, 1/3)$	60°	$(1/3, 0)$	$w_2(x,y)$	$\frac{1}{6}x - \frac{\sqrt{3}}{6}y + \frac{1}{3}$	$\frac{\sqrt{3}}{6}x + \frac{1}{6}y$
3	$(1/3, 1/3)$	-60°	$(1/2, \sqrt{3}/6)$	$w_3(x,y)$	$\frac{1}{6}x + \frac{\sqrt{3}}{6}y + \frac{1}{2}$	$-\frac{\sqrt{3}}{6}x + \frac{1}{6}y + \frac{\sqrt{3}}{6}$
4	$(1/3, 1/3)$	0°	$(2/3, 0)$	$w_4(x,y)$	$\frac{1}{3}x + \frac{2}{3}$	$\frac{1}{3}y$

A curva de Koch tem a complexidade que se observa em objetos naturais, como por exemplo linhas costeiras, sistemas de dobramentos, de lineamentos, etc. O seu comprimento é infinito.

4.4.3 - A ilha de Koch

Um caso particular da curva de Koch, é a ilha ou curva triádica (de base 3) de Koch, ilustrada na figura 4.18. A construção começa com um triângulo equilátero com lados de comprimento unitário (lados normalizados). Na primeira iteração, quando se define o processo *gerador*, esse triângulo é reduzido de 1/3 e colocado, sem a base, no centro de cada um dos 3 lados do triângulo inicial. O perímetro da ilha fica constituído de 3×4 lados de tamanho 1/3. No nível de iteração k , adicionam-se $3 \times 4^{k-1}$ triângulos equiláteros com lado de tamanho igual a $L \times 1/3^k$, sendo L o tamanho do lado do triângulo inicial. A magnitude da área e do perímetro da ilha nos diferentes níveis de iteração evolui da seguinte forma:

k	k+1	Área da ilha de Koch	Perímetro
0	1	$A_1 = L^2 \cdot \frac{\sqrt{3}}{4}$	$3L$
1	2	$A_2 = A_1 + 3 \cdot \left(\frac{L}{3}\right)^2 \cdot \frac{\sqrt{3}}{4} = A_1 + \frac{\sqrt{3}}{12} \cdot L^2$	$3 \cdot 4 \cdot L$
2	3	$A_3 = A_2 + 3 \cdot 4^1 \cdot \left(\frac{L}{3 \cdot 3}\right)^2 \cdot \frac{\sqrt{3}}{4} = A_2 + \frac{4}{9} \cdot \frac{\sqrt{3}}{12} \cdot L^2$	$3 \cdot 4^2 \cdot L$
3	4	$A_4 = A_3 + 3 \cdot 4^2 \cdot \left(\frac{L}{3 \cdot 3^2}\right)^2 \cdot \frac{\sqrt{3}}{4} = A_3 + \frac{4^2}{9^2} \cdot \frac{\sqrt{3}}{12} \cdot L^2$	$3 \cdot 4^3 \cdot L$
k	k+1	$A_{k+1} = A_k + 3 \cdot 4^{k-1} \cdot \left(\frac{L}{3 \cdot 3^{k-1}}\right)^2 \cdot \frac{\sqrt{3}}{4} = A_k + \frac{4^{k-1}}{9^{k-1}} \cdot \frac{\sqrt{3}}{12} \cdot L^2$	$3 \cdot 4^k \cdot L$

Efetuando a soma passo a passo obtém-se:

$$A_{k+1} = \frac{\sqrt{3}}{4} \cdot L^2 + \frac{\sqrt{3}}{12} \left(1 + \frac{4}{9} + \frac{4^2}{9^2} + \dots + \frac{4^{k-1}}{9^{k-1}} \right) \cdot L^2 \quad (4.6)$$

A soma parcial da série geométrica entre parênteses na equação (4.6) tem como limite $\frac{1}{1-4/9} = \frac{9}{5}$, de modo que no limite, a ilha de Koch tem área

$$A = \frac{\sqrt{3}}{4} \cdot L^2 + \frac{\sqrt{3}}{12} \cdot \frac{9}{5} \cdot L^2 = \frac{24\sqrt{3}}{60} \cdot L^2 = \frac{2\sqrt{3}}{5} \cdot L^2 \quad (4.7)$$

n	Objeto inicial	Pedaços N_n	Tamanho τ_n	Escala τ_n / τ_{n+1}
0		3	1	-
1		3×4	$\frac{1}{3}$	3
2		3×4^2	$\frac{1}{3^2}$	3
3		3×4^3	$\frac{1}{3^3}$	3
...	...	...	...	...
k		3×4^k	$\frac{1}{3^k}$	$\frac{1/3^k}{1/3^{k+1}} = 3$

Fig.4.18- Ilustração do processo de geração da ilha de Koch ou curva triádica de Koch .

4.5 - CONCEITOS DE AUTO-SIMILARIDADE E INVARIÂNCIA DE ESCALA

Uma reta representa um conjunto de pontos no espaço. Mudando a escala de comprimento da reta (aplicando, por exemplo, uma redução) ou mudando a sua posição (aplicando uma translação), obtém-se o mesmo conjunto de pontos. Assim, a reta é *invariante*, com respeito a translação e escala. Diz-se que a reta é um objeto **auto-similar**. (Feder, 1988).

Considere-se o conjunto de pontos do espaço tridimensional dado pelo vetor de posição $\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3)$. Uma reta, através de um ponto $\mathbf{x}_0$ na direção do vetor $\mathbf{a} = (a_1, a_2, a_3)$, é o conjunto S de pontos determinados por

$$\mathbf{x} = \mathbf{x}_0 + \mathbf{a} t \quad -\infty < t < \infty \quad (4.6)$$

onde t é um número real. Alterando a escala de comprimento através de um mesmo fator r , aplicado a todos os componentes do vetor $\mathbf{x}$, então os pontos $\mathbf{x}$ do espaço serão novos pontos $\mathbf{x}' = r\mathbf{x} = (rx_1, rx_2, rx_3)$, ou seja, serão um novo conjunto de pontos rS dado por

$$\mathbf{x}' = r(\mathbf{x}_0 + \mathbf{a} t) = \mathbf{x}_0 + \mathbf{a} t' - (1-r)\mathbf{x}_0 \quad (4.7)$$

onde $t' = rt$ também é um número real. Efetuando-se uma translação do novo conjunto de pontos rS , de uma quantia $(1-r)\mathbf{x}_0$, volta-se ao conjunto original de pontos S . Logo, a reta é *invariante*, tanto sob o efeito de uma mudança de escala quanto sob o efeito de uma translação $\mathbf{x} \rightarrow \mathbf{x} + \mathbf{a} n$ sendo n um número real.

A invariância da reta, quanto a escala e translação, fica ainda mais fácil de ser entendida quando se consideram conjuntos S *limitados* ou seja, segmentos de reta. De fato, o deslocamento ou translação de um segmento de reta no espaço resulta sempre em um novo conjunto de pontos, ou seja $\mathbf{x} \rightarrow \mathbf{x} + \mathbf{a} n$. Se o comprimento do segmento é modificado por um fator $r < 1$, gera-se um novo conjunto de pontos $S' = rS$ que representa uma parte ou "pedaço" do segmento original S . Este pedaço pode ser transladado para cobrir uma parte do segmento original. Para um segmento de reta de comprimento unitário, por exemplo, se N é um inteiro, o fator de escala $r(N) = 1/N$. Por translação, os N pedaços podem cobrir o segmento unitário. Portanto, diz-se que o conjunto S é *auto-similar* e *invariante de escala*. A noção de auto-similaridade é assim formalmente aplicável, quando um certo objeto pode ser subdividido em N partes, cada uma das quais é similar à original com um coeficiente de similaridade $r(N)$.

4.6 - DIMENSÃO FRACTAL

Um conjunto fractal é definido pela relação

$$N_n = \frac{C}{\tau_n^D} \quad (4.8)$$

onde

- N_n = número de objetos (fragmentos) de tamanho τ_n em que uma dada estrutura pode ser fragmentada
- C = constante de proporcionalidade
- D = dimensão fractal

A dimensão fractal pode assumir um valor inteiro e neste caso é equivalente à dimensão Euclidiana, que é zero para um ponto, 1 para uma reta, 2 para um quadrado, 3 para um cubo. Em geral a dimensão fractal não é inteira, mas fracionária, sendo essa a razão do termo fractal.

Um exemplo concreto, de um problema que resulta em um conjunto fractal, é o da medida de um comprimento, de uma área ou de um volume, quando se usam diferentes escalas. De fato, medidas y , de objetos, realizadas sob diferentes escalas x , não variam arbitrariamente, mas seguem uma lei de potência do tipo $y \propto x^D$, onde D é uma dimensão fractal.

A rigor, a noção de dimensão é muito complexa e difícil de entender. A partir do início do século (quando um dos maiores problemas da matemática era saber o significado da *dimensão* e as suas propriedades), até hoje, surgiram muitas noções: dimensão topológica, dimensão de Hausdorff, dimensão fractal, dimensão de auto-similaridade, dimensão de contagem de caixas, dimensão Euclidiana, dimensão de cobertura, dimensão de lacunaridade, etc. Todas essas noções estão relacionadas, e, em algumas situações, representam a mesma coisa. Em outras, podem discordar ou, até mesmo, deixar de ter sentido. Por isso, seguindo Peitgen et al. (1992), discutiremos aqui, em nível elementar, apenas quatro dimensões, que são formas especiais da dimensão fractal de Mandelbrot, a saber:

- dimensão de auto-similaridade
- dimensão da medida de um comprimento (ou dimensão de escala)
- dimensão de lacunaridade (não compacidade)
- dimensão de contagem de caixas

4.6.1 - Dimensão de auto-similaridade

Dada uma estrutura auto-similar, existe uma relação entre o fator de redução (escala ou tamanho dos pedaços) τ_n e o número de fragmentos N_n , no qual a estrutura pode ser dividida. Isto se expressa por meio da equação (4.8), mas, por uma questão de precisão, ou seja, para explicitar a condição de auto similaridade, se escreve:

$$N_n = \frac{C}{\tau_n^{D_s}} \quad (4.9)$$

e portanto

$$D_s = \frac{\log N_n}{\log(1/\tau_n)} + \log C \quad (4.10)$$

D_s é chamado *dimensão de auto-similaridade*.

N_n é o número de objetos, similares ao original, com escala de tamanho τ_n vezes menor.

Objeto (normalizado)	Pedaço	Número de pedaços N_n	Fator de redução τ_n	Dimensão $D_s = \frac{\log N_n}{\log(1/\tau_n)}$
reta		3 6 173	1/3 1/6 1/173	1
quadrado		$9 = 3^2$ $36 = 6^2$ $29929 = 173^2$	1/3 1/6 1/173	2
cubo		$27 = 3^3$ $216 = 6^3$ $5177717 = 173^3$	1/3 1/6 1/173	3
curva de Koch		4 16 4^k	1/3 1/9 $1/3^k$	1.2619

Fig. 4.19 - Dimensão, calculada a partir do número de pedaços e fator de redução, de quatro objetos auto-similares: segmento de reta, quadrado, cubo e curva de Koch.

Convém lembrar que nem toda estrutura auto-similar é fractal. Um segmento de reta, um quadrado ou um cubo, podem ser divididos em pedaços, por transformações de auto-similaridade, e embora obedeçam à mesma lei de potência, não são fractais, pois possuem dimensão inteira.

4.6.2. - Dimensão de escala

A lei de potência que caracteriza as variações da medida de um comprimento L , em função da escala τ_n utilizada, é expressa pela equação:

$$L = \frac{C}{\tau_n^D} \quad (4.11)$$

Comparando a equação (4.9), ou seja, a lei de potência de um objeto auto-similar, com a equação (4.11), que representa a lei de potência da medida de um comprimento, verifica-se que:

$$N_n \tau_n^{D_s} = L \tau_n^D \quad (4.12)$$

Por outro lado, quando um objeto é composto de N_n pedaços de tamanho τ_n , o seu comprimento total é dado por:

$$L = N_n \tau_n \quad (4.13)$$

Substituindo o valor de L , da equação (4.13), na equação (4.12), obtém-se:

$$N_n \tau_n^{D_s} = N_n \tau_n^{D+1} \quad (4.14)$$

Conclui-se que o expoente D , da lei da medida de um comprimento, em função da escala, acrescido da unidade, é igual à dimensão de alto similaridade. Ou seja:

$$D_s = D + 1 \quad (4.15)$$

Por esse motivo, define-se a *dimensão de escala*, para estruturas que não são auto-similares, como sendo:

$$D_e = D_s - 1 \quad (4.16)$$

4.6.3 - Dimensão de lacunaridade

Para caracterizar a estrutura, ou grau de auto-afinidade, de objetos auto-afins, Mandelbrot (1986) propõe, entre outras coisas, a *dimensão de lacunaridade* D_G , (que mede o grau de não compacidade do objeto, no plano). As propriedades geométricas do objeto, no plano (x,y) , são caracterizadas por dois índices, nas direções dos eixos coordenados. Este conceito se aplica nos estudos de características fractais de bacias hidrográficas (La Barbera & Rosso, 1989; Robert & Roy 1990; Nikora & Shapozhnikov, 1993, entre outros).

Por exemplo, para uma bacia hidrográfica de área A , comprimento longitudinal L , e largura W , Nikora (1994), propõe os índices:

Na direção longitudinal:

$$D_L = \frac{\ln[A_n - \Delta A_n / A_{n-1}]}{\ln(L_n / L_{n-1})} \quad (4.17)$$

Na direção transversal:

$$D_w = \frac{\ln[A_n - \Delta A_n / A_{n-1}]}{\ln(W_n / W_{n-1})} \quad (4.18)$$

Os índices D_L e D_w são *dimensões de escala*, enquanto que L_n e W_n , são as medidas dos comprimentos, do curso d'água de ordem n , com área de drenagem A_n , nas direções longitudinal e transversal, respectivamente.

A *dimensão de lacunaridade*, neste caso, é dada pela relação:

$$D_G = \frac{2D_L D_w}{D_L + D_w} \quad (4.19)$$

4.6.4 - Dimensão de contagem de caixas

No caso de objetos muito irregulares, a dimensão fractal pode ser determinada pelo método de contagem de caixas, que é um procedimento sistemático de medida aplicável a qualquer estrutura no plano e que também pode ser facilmente adaptado para qualquer estrutura no espaço. O método consiste em situar o objeto, ou estrutura considerada, dentro de malhas quadradas de diferentes tamanhos.

Conta-se então, em cada malha de ordem n , o número de caixas N_n de tamanho τ_n , necessário para envolver o objeto. Esse número é função do tamanho das caixas e a

precisão da medida é tanto maior, quanto maior for o número de caixas. Ou em outras palavras, mais detalhada a escala.

Para ilustrar o método, adotou-se uma sequência de quatro diferentes malhas quadradas ($n = 1, 2, 3, 4$), com um fator de redução do tamanho igual a $1/2$, de uma malha para outra (figura 4.20). Na primeira malha, o objeto está coberto por 4 caixas; na segunda, por 14 caixas; na terceira por 35 caixas e finalmente na última, por 101 caixas.

Fig. 4.20 - Quatro estágios do processo de cobertura de um objeto, por caixas, com um fator de redução de tamanho (ou escala de redução) igual a $1/2$.

Como já se sabe que a variação das medidas de um objeto, em função da escala, segue uma lei de potência, constrói-se um gráfico bi-logarítmico do número de caixas em função do tamanho de cada caixa, isto é, $\log(N(\tau))$ versus $\log(1/\tau)$. A declividade da reta bilogarítmica, representativa da referida lei, fornece a *dimensão fractal de contagem de caixas* do objeto (figura 4.21).

Fig.4.21 - Dimensão de *contagem de caixas*, de um objeto fractal irregular no plano.

A dimensão fractal, determinada pelo método de contagem de caixas, é uma das mais utilizadas em todas as ciências (Peitgen, et al. 1992). Isto porque, além da facilidade do cálculo, o método pode ser empregado para objetos com ou sem auto-similaridade e ainda para estruturas ou formas tri-dimensionais, utilizando-se caixas 3D. Finalmente o conceito também se aplica a fractais como o conjunto de Cantor, que é um subconjunto do intervalo unitário $[0,1]$, sendo que neste caso as caixas são subintervalos de $[0,1]$.

4.7 - AUTO AFINIDADE

A partir dos conceitos de auto similaridade (4.5) e dimensão fractal (4.6), define-se formalmente um conjunto fractal auto similar, no espaço bidimensional (x,y) , dizendo que $f(rx,ry)$ é estatisticamente similar a $f(x,y)$, onde r , é um fator ou coeficiente de escala. Digamos, por exemplo, que o número de caixas de dimensões x_1, y_1 , necessário para cobrir um determinado objeto (linha costeira, lineamento estrutural, etc), é N_1 ; que o número de caixas, com dimensões $x_2 = rx_1$, $y_2 = ry_1$, necessário para cobrir o objeto, é N_2 . Então, se o objeto é auto similar, $N_2 = N_1 r^{-D}$.

Em muitos problemas de interesse prático estudam-se conjuntos que não são auto-similares. Por exemplo, é o caso do movimento Browniano de uma partícula, no qual a posição da partícula X , e o tempo t , são quantidades físicas diferentes, que não possuem a mesma relação de escala.

Uma *transformação afim*, transforma um ponto $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_E)$ em um ponto $\mathbf{x}' = (r_1 x_1, r_2 x_2, \dots, r_E x_E)$, no qual os coeficientes de escala $r_1, r_2, \dots, r_E$, não são todos iguais (Feder, 1988).

Um fractal, estatisticamente auto-afim não é isotrópico. No espaço bidimensional (x, y) , define-se formalmente um fractal auto-afim, dizendo que: $f(rx, r^H y)$ é estatisticamente similar a $f(x, y)$ onde H é conhecido como medida de Hausdorff, a qual se relaciona com a dimensão fractal (Turcotte, 1993).

O método de contagem de caixas pode ser usado para determinar a medida de Hausdorff H , e a dimensão fractal D , de um processo de deslocamento aleatório. Todavia, a escala aplicada aos lados das caixas, deve levar em conta a medida de Hausdorff. Digamos que o número de caixas, de dimensões x_1, y_1 , necessário para cobrir o deslocamento aleatório, seja N_1 ; e que N_2 seja o número de caixas de dimensões $x_2 = rx_1$, $y_2 = r^H y_1$, necessário para cobrir o objeto. Então, o deslocamento aleatório é um fractal auto-afim se $N_2 = N_1 r^{-D}$.

5 - O MODELO FRACTAL PROPOSTO

O modelo fractal proposto, é aplicado a uma formação rochosa heterogênea. Esta porém, não é concebida como um aquífero fissural, ou como formação geológica, nos termos em que é conhecido na hidrogeologia, mas tão somente como um condutor hidráulico (item 2.3.2).

O procedimento, aqui denominado de método da capacidade específica fractal, consiste de duas etapas distintas:

- a. Tratamento dos dados de teste, visando determinar dois coeficientes fundamentais, que são, respectivamente, a dimensão fractal D , da vazão bombeada, e a vazão fractal uniforme (constante), equivalente Q^* .
- b. Identificação dos parâmetros do condutor hidráulico: transmissividade, abertura das fraturas, condutividade hidráulica, permeabilidade e porosidade.

O método é aplicável apenas para fluxo no próprio poço bombeado e, neste sentido, independe de quaisquer modelos existentes. Não permite, porém, avaliar o coeficiente de armazenamento das fissuras e portanto a difusividade do meio. Por isso, para fluxo fora do poço, emprega-se o método de Boulton & Streltsova (1977).

5.1 - FLUXO NO POÇO BOMBEADO

5.1.1 - Hipóteses básicas

O método proposto é inteiramente resultante da experiência obtida com a realização de testes de bombeamento em duas e três etapas independentes, com vazões diferentes e variáveis em cada etapa, em poços perfurados no granito Meruoca. Através desse método é possível determinar o fluxo uniforme para o poço, bem como caracterizar, em termos médios, a transmissividade, a abertura das fraturas, a condutividade hidráulica e a porosidade. As hipóteses básicas são as seguintes:

- a capacidade específica de poços perfurados em meios heterogêneos é um parâmetro fractal porque depende de um fluxo de dimensão fractal D .
- o meio poroso fraturado, a partir do qual a água subterrânea circula para o poço, é um aquífero fractal, com dimensões e limites desconhecidos.
- o domínio de fluxo é a superfície de controle representada pela área lateral do poço bombeado, de raio r_w e zona ativa ou bloco, de espessura h_a , compreendida, respectivamente, entre a fenda produtora mais rasa e a mais profunda.

- as fissuras existentes na zona ativa, são idealizadas como uma fenda produtora principal, na base do condutor, através da qual, o fluxo horizontal penetra no poço.

5.1.2- Parâmetros do poço

Como base para uma avaliação das condições de fluxo, no poço bombeado, em relação à superfície de controle (área lateral da zona ativa do poço), são introduzidos a seguir, os seguintes parâmetros:

Espessura saturada inicial (h_i)

Em condutores hidráulicos de aquíferos fraturados, os testes de bombeamentos escalonados, isto é, testes que envolvem mais de uma etapa de bombeamento com vazões diferentes, geralmente se realizam em etapas, partindo de níveis estáticos diferentes. Isto porque, no processo de recuperação do nível d'água, que se segue após a parada do bombeamento de uma etapa para outra, quase sempre fica um rebaixamento residual. Na verdade, em aquíferos dessa natureza, nos quais os condutores hidráulicos tendem a se comportar como reservatórios subterrâneos de extensão limitada, a plena recuperação do nível d'água, depois de um bombeamento, pode ser muito demorada ou até mesmo nem ocorrer, se não houver uma recarga. Por isso os testes escalonados tendem a ser realizados sob diferentes condições de *espessura saturada inicial* h_i . Essa espessura é definida como a altura saturada correspondente à distância vertical entre o nível extremo da fenda produtora mais profunda (FMP) e o nível estático (NE), do poço (figura 5.1).

$$h_i = FMP - NE \quad (5.1)$$

Fig. 5.1 -Espessura saturada inicial do condutor hidráulico em aquífero fraturado e altura da zona ativa: a) zona ativa confinada; b) zona ativa parcialmente livre; c) zona ativa confinada.

Espessura da zona ativa (h_a)

A *zona ativa* do poço é aqui definida como o intervalo compreendido entre as fendas produtoras, mais rasa e mais profunda (figura 5.1).

$$h_a = FMP - FMR \quad (5.2)$$

Teoricamente, essa espessura pode variar, no máximo, entre o nível estático e o fundo do poço (fig. 5.1a) e no mínimo, no caso de existir uma única fenda (cortanto transversal e horizontalmente a superfície de controle do condutor hidráulico), ficar restrita à abertura dessa fenda (fig. 5.1c).

Esbeltez do poço (λ)

A *esbeltez* λ do poço em aquífero fraturado, é um parâmetro adimensional aqui definido como a razão entre a espessura da zona ativa (h_a) e o comprimento da circunferência que constitui a secção transversal do poço de raio r_w , isto é:

$$\lambda = \frac{h_a}{2\pi r_w} \quad (5.3)$$

Submergência estática do crivo da bomba (h_c)

Define-se aqui a submergência estática h_c , como a diferença entre a profundidade do "crivo", do equipamento de bombeamento, e a profundidade do nível estático ou nível inicial de bombeamento. Quando se deseja produzir vazões diferentes nos testes escalonados, a posição do crivo da bomba ou do emulsor do sistema de bombeamento "air lift" (quando se usa compressor), pode ser alterada de uma etapa para outra, de modo a produzir diferentes submergências estáticas.

Capacidade específica observada (y_{ob})

Considere-se um teste de bombeamento realizado em um poço situado em um meio fraturado e no qual tenham sido medidos n pares de valores $[Q(t), s_w(t)]$ de vazão e de rebaixamento do nível d'água, respectivamente, observados durante o teste. A capacidade específica do poço, aqui por enquanto denominada *capacidade específica observada*, (y_{ob}) é expressa pela relação:

$$y_{ob} = \frac{Q(t)}{s_w(t)} \quad (5.4)$$

A equação (5.4) está na forma mais geral que se pode encontrar para a capacidade específica do poço, na medida em que se apresenta como uma função de duas variáveis. Isto é, com vazão variável e rebaixamento variável. Vale dizer que essa é a forma que se observa com maior frequência nos testes de bombeamento de poços perfurados em meios fraturados.

Capacidade específica fractal (y^*)

A capacidade específica, observada para regime de fluxo não uniforme, pode ser aproximada por uma *capacidade específica fractal* y^* , característica de um regime de fluxo fractal uniforme que se expressa através da equação:

$$y^* = \frac{Q^*}{s_w^D} \quad (5.5)$$

onde:

- Q^* é um parâmetro ($\equiv$ constante) de dimensão fractal $[L^{2+D}T^{-1}]$ que caracteriza um regime uniforme de fluxo fractal. Por esse motivo é aqui denominado de *vazão fractal uniforme*.
- s_w^D é o rebaixamento de dimensão fractal $[L^D]$ do poço bombeado correspondente à vazão fractal uniforme.

Descarga específica fractal (q^*)

A descarga Q^* é um fluxo fractal uniforme. Esse fluxo para o poço tem lugar, por hipótese, através da área aberta da superfície de controle, dada por

$$A_a = 2\pi r_w a \quad (5.6)$$

onde:

A_a = área de vazios da zona ativa do poço $[L^2]$

r_w = raio do poço $[L]$

a = abertura da fenda produtora principal $[L]$

Assim, a descarga específica fractal q^* , do condutor hidráulico, tem dimensão $[L^D T^{-1}]$ e é dada pela relação

$$q^* = \frac{Q^*}{2\pi r_w a} \quad (5.7)$$

Coefficiente de produção do poço (C_p)

Pode-se obter uma vazão constante de dimensão não fractal, isto é, integral, característica de um regime de fluxo uniforme, eliminando na equação fundamental a influência do parâmetro D , o que é feito dividindo-se o numerador e denominador da equação (5.5) por um coeficiente de dimensão $[L^D]$.

Como a vazão inicial do teste é ditada pela capacidade da bomba, instalada com submersão estática h_c , de dimensão $[L]$, utiliza-se aqui o coeficiente h_c^D , isto é:

$$\frac{\frac{Q^*}{h_c^D}}{\frac{s^D}{h_c^D}} = \frac{C_p}{x} \quad (5.8)$$

Da equação (5.8) resultam as relações:

$$C_p = \frac{Q^*}{h_c^D} \quad (5.9)$$

$$x = \frac{s^D}{h_c^D} \quad (5.10)$$

onde:

- C_p (equação 5.9) é denominado coeficiente de produção do poço para regime uniforme de fluxo integral (vazão constante), com dimensão $[L^2 T^{-1}]$;
- x (equação 5.10) é um rebaixamento adimensional, expresso como uma fração da submersão estática do crivo da bomba, a qual, em última instância, representa o rebaixamento máximo possível do nível d'água dentro do poço, sob um regime de fluxo de dimensão D , e assume valores compreendidos no intervalo semi-aberto $(0,1]$, ou seja $0 < x \leq 1$.

Vazão integral uniforme (Q)

Como o coeficiente C_p tem dimensão $[L^2 T^{-1}]$, a vazão uniforme de dimensão integral $[L^3 T^{-1}]$ é dada pela equação:

$$Q = C_p h_c \quad (5.11)$$

Por outro lado, a capacidade específica fractal y^* pode ser expressa em função do coeficiente de produção do poço C_p , por meio da equação:

$$y^* = C_p x^{-1} \quad (5.12)$$

A representação gráfica da equação (5.12), em escala log-log, é uma família de retas paralelas com declividade igual a -1 e ordenada na origem igual ao coeficiente de produção do poço em regime uniforme

A dimensão fractal D

A dimensão fractal D caracteriza as irregularidades do fluxo e é indicativa do grau de variação da descarga bombeada durante o teste. O seu valor obedece à equação (5.1) e é tanto mais próximo da unidade quanto menos variar a vazão bombeada. Se a variação for crescente, $D < 1$, e se for decrescente $D > 1$. Para uma vazão constante, D é rigorosamente igual a 1.

$$D = \frac{\log\left(\frac{Q^*}{y}\right)}{\log(s_w)} \quad (5.13)$$

Lei de variação da vazão do poço

Na capacidade específica expressa pela equação (5.3), a variação da vazão bombeada com o tempo, $Q(t)$ pode ocorrer de diferentes maneiras. Ou seja, ela pode ser contínua (crescente, decrescente, regular, irregular) ou descontínua (em degraus, por exemplo). Seja qual for a forma em que ocorra, é sempre possível deduzir uma lei de variação dessa vazão bombeada em função da vazão fractal e da dimensão do fluxo, ou seja, a partir da fórmula fundamental.

De fato, multiplicando o numerador e denominador da equação (5.4) pelo rebaixamento s_w , obtém-se:

$$y = \frac{s_w Q^*}{s_w s_w^D} = \frac{Q^* s_w^{1-D}}{s_w} = \frac{Q(t)}{s_w} \quad (5.14)$$

Da equação (5.14) resulta portanto a seguinte lei de variação da vazão bombeada com o tempo:

$$Q(t) = Q^* s_w^{1-D} \quad (5.15)$$

Evolução do rebaixamento em função da vazão

Multiplicando-se o numerador e o denominador da equação (5.8) pela submersão estática do crivo da bomba, obtém-se a relação entre a vazão bombeada em regime uniforme e o rebaixamento correspondente do poço. Na referida relação, expressa pela equação (5.16) a capacidade específica tem dimensão $[L^3 T^{-1} / L]$

$$y = \frac{C_p h_c}{x h_c} \quad (5.16)$$

- $C_p h_c$ é a produção ou vazão constante, do poço $[L^3 T^{-1}]$ (equação 5.11)
- $x h_c = \left(\frac{s}{h_c}\right)^D h_c$ é o rebaixamento para a vazão uniforme $[L]$

Isto significa que através do método proposto não há necessidade de se efetuarem testes de produção escalonados, ou testes em etapas, para avaliar a evolução do rebaixamento em função da vazão para poços em aquíferos fraturados. De fato, elimina-se a necessidade dos "testes em 3 etapas", uma vez que isto pode ser feito a partir de uma única etapa de teste, conforme demonstra a equação (5.12)

5.1.3 - Interpretação dos testes**Procedimento para o cálculo de Q^* e D**

Construir em um mesmo gráfico, as curvas de variação da vazão bombeada e do nível dinâmico, em função do tempo, destacando a posição da(s) fenda(s) produtora(s) principal(ais), e definindo o rebaixamento máximo permissível no nível da fenda produtora mais profunda. Isto facilita uma visualização dos efeitos do fluxo não uniforme e das entradas de água para o poço, na curva de rebaixamento versus tempo.

Construir a curva de capacidade específica y , versus rebaixamento s , em coordenadas bi-logarítmicas.

Interpretar essa curva de acordo com a variação da vazão bombeada com o tempo, ajustando à mesma uma lei de potência do tipo $y(s) = Q^* s^{-D}$ onde D é a *dimensão fractal do fluxo* e Q^* a *descarga fractal uniforme* a ser utilizada na equação do rebaixamento com o tempo para determinação das propriedades hidráulicas do condutor testado e previsão do comportamento do poço em regime de exploração.

A extrapolação dessa lei deve ser feita até o nível da fenda produtora principal, ou de rebaixamento máximo permissível.

Transmissividade do condutor hidráulico (T_f)

Por hipótese, a água penetra no poço horizontalmente, através da fenda produtora principal, idealizada como uma fratura horizontal, de abertura a , situada na base do condutor hidráulico. Portanto, a transmissividade do condutor hidráulico está intrinsecamente ligada à abertura da fenda produtora principal, que representa a abertura média das fendas reais, conectadas com o poço.

Para um poço de raio desprezível, e enquanto a fenda produtora principal permanecer confinada, ou seja, enquanto o rebaixamento no poço for menor do que FMR-NE, para cada vazão uniforme Q^* , de dimensão $[L^{D+2}T^{-1}]$, a evolução do rebaixamento s_w^D , com o tempo, segue uma lei do tipo:

$$s_w^D(t) = \alpha_1 \log(t) + \alpha_0 \quad (5.17)$$

O gráfico da equação (5.17), em coordenadas monolog, é uma reta cuja declividade reflete a capacidade de transmissão de água das fendas conectadas com o poço. Essa declividade, $\alpha_1 = \Delta(s^D) / \log(t_2 / t_1)$, tem dimensão $[L^D]$ e varia com a vazão fractal uniforme do poço. Assim, usando a aproximação de Jacob (1946), a transmissividade do condutor hidráulico (T_f) pode ser estimada pela relação:

$$T_f = \frac{0.183Q^*}{\Delta(s_w^D)_{ciclo}} \quad (5.18)$$

Abertura média das fraturas (a)

A abertura média das fraturas é dada pela expressão:

$$a = \left[T_f \frac{12\nu}{g} \right]^{1/3} \quad (5.19)$$

Condutividade hidráulica (K_f)

A condutividade hidráulica das fraturas é obtida dividindo-se a transmissividade pela abertura média das fraturas, ou seja, através da relação:

$$K_f = \frac{T_f}{a} \quad (5.20)$$

Permeabilidade

A permeabilidade das fraturas é obtida da relação:

$$k_f = K_f \frac{V}{g} \quad (5.21)$$

Porosidade do condutor hidráulico (n)

A porosidade do condutor hidráulico, é obtida de uma relação entre superfícies, a saber: área de vazios e área total da superfície de controle.

$$n = \frac{2\pi r_w a}{2\pi r_w h_i} = \frac{a}{h_i} \quad (5.22)$$

5.2 - FLUXO NO PLANO VERTICAL (r, z)

Para fluxo no plano vertical (r, z), o modelo incorpora as hipóteses básicas dos modelos de dupla porosidade de Barenblatt et al. (1960), de Boulton (1963) e ainda de Boulton & Streltsova (1977), descritas no item (3.2.2), porém com as diferenças conceituais indicadas.

5.2.1 - Hipóteses básicas

Do modelo de duplo domínio com drenagem retardada (Barenblatt et al. 1960) são consideradas as hipóteses básicas seguintes:

- São admitidos dois domínios de fluxo: o primeiro, representado pela matriz de uma rede de blocos rochosos irregulares, e o segundo, constituído pelas fissuras.
- Não existe fluxo das fraturas para os blocos.
- Os blocos são isotrópicos e o aquífero é confinado, com extensão lateral infinita como em Theis (1935).

Do modelo de duplo domínio com drenagem instantânea (Boulton 1963) as hipóteses consideradas, são:

- O fluxo vertical, fora do poço, ocorre em todos os instantes, a partir do início do bombeamento, e não após um certo tempo, como em Barenblatt et al. 1960)
- A evolução do rebaixamento na fissura, com o tempo, obedece à equação (3.47).

Finalmente, do modelo de blocos e fraturas horizontais (Boulton & Streltsova 1977), as hipóteses incorporadas foram as seguintes:

- A unidade bloco-fissura, associada a um poço de bombeamento, apresenta simetria vertical e é representada por um elemento de dimensões $H \times a$, no plano vertical de coordenadas (r, z)

Diferenças conceituais propostas

- A menos que haja referência em contrário, em se tratando de rochas ígneas e metamórficas de todos os graus de metamorfismo, a porosidade dos blocos é suposta desprezível e o armazenamento na matriz (blocos ou aquitard equivalente) é interpretado como armazenamento no manto de cobertura indiferenciada.
- O fluxo, no condutor hidráulico, acontece por conta da resposta elástica das fraturas, às diferenças de pressão entre pontos situados dentro do próprio meio fissurado e cobertura indiferenciada (dentro, e fora do poço), e não entre pontos situados dentro e fora dos blocos.
- O fluxo é vertical nas fendas não diretamente conectadas com o poço, e horizontal nas fendas de entrada de água para o poço.
- O fluxo para o poço é uma vazão fractal uniforme (constante) e tem dimensão fractal D .
- O raio do poço é desprezível, porém a evolução do rebaixamento com o tempo, dentro do poço, pode ser aproximada pela evolução nas fraturas, a uma distância $r=1\text{m}$, suposta representativa das proximidades imediatas do poço.
- No caso de condutores hidráulicos de extensão limitada, admite-se a hipótese de que a equação (3.47) pode ser usada com a teoria das imagens, mas este problema, é deixado pelo autor para futuras considerações.

5.2.2 - Interpretação dos testes

Para a interpretação no plano (r, z) , a exemplo do que foi feito para o poço bombeado, o primeiro passo é a determinação da descarga fractal uniforme equivalente Q^* e da dimensão do fluxo D , usando o procedimento indicado no item (5.1.3).

Em seguida, as propriedades hidráulicas do meio podem ser calculadas pelo processo clássico de superposição da curva de rebaixamento versus tempo obtida no campo com a curva padrão da função do poço (fig. 5.2a, 5.2b, 5.2c) em meio fraturado, correspondente à integral que aparece na equação (5.24), de Boulton (1963).

Fig. 5.2a - Curvas padrão de Boulton (1963) em coordenadas mono-logarítmicas para a função do rebaixamento em um poço em meio fraturado [Equação (5.2)] para $\eta=10$.

Fig. 5.2b - Curvas padrão de Boulton (1963) em coordenadas mono-logarítmicas para a função do rebaixamento em um poço em meio fraturado [Equação (5.2)] para $\eta=100$.

Fig. 5.2c - Curvas padrão de Boulton (1963) em coordenadas mono-logarítmicas para a função do rebaixamento em um poço em meio fraturado [Equação (5.2)] para $\eta=1000$.

A distribuição do rebaixamento na fissura, para fluxo uniforme, é dada pela equação:

$$s_f = \frac{Q}{4\pi T_f} \int_0^\infty 2J_0\left(\frac{r}{B_f} \frac{x}{v}\right) \left\{ 1 - \exp\left[-0.5\alpha_f t \eta (1+x^2)\right] \times \left[\cosh(0.5\alpha_f t q) + \frac{\eta(1-x^2)}{q} \sinh(0.5\alpha_f t q) \right] \right\} \frac{dx}{x} \quad (5.23)$$

A integral infinita da equação (5.23) é simbolicamente representada pela função $W(\theta, \eta, r/B)$, de modo que o rebaixamento na fissura pode ser expresso por:

$$s_f = \frac{Q}{4\pi T_f} W(\theta, \eta, r/B) \quad (5.24)$$

$$B_f^2 = \frac{T_f}{\alpha_f S_m} = \frac{K_f}{K_m} aH = \frac{K_f a}{K_m / H} = \frac{T_f}{T'_m} \quad T_f = K_f a \quad T'_m = K_m / H \quad (5.25)$$

$$q = \sqrt{\eta^2 (1+x^2)^2 - 4\eta x^2} \quad (5.26)$$

$$v = \sqrt{\frac{\eta - 1}{\eta}} \quad (5.27)$$

$$\eta = 1 + \frac{S_m}{S_f} \quad (5.28)$$

$$\theta = \frac{4T_f t}{r^2 S_f} \quad (5.29)$$

$$\alpha_1 t = \frac{\theta}{4} \left(\frac{1}{\eta - 1} \right) \left(\frac{r}{B_f} \right) \quad (5.30)$$

Observação: admite-se a validade da equação (5.24) para níveis dinâmicos inferiores à profundidade da “fenda produtora principal”, por hipótese situada na base do condutor hidráulico.

Cálculo dos parâmetros hidráulicos

Simplificando um pouco mais a simbologia adotada, isto é, chamando a função do poço simplesmente W_θ , o cálculo das propriedades hidráulicas é feito conforme se indica a seguir:

Curvas de rebaixamento

Substituindo (na equação 5.24) o rebaixamento específico s_f / Q , pelo inverso da capacidade específica fractal, isto é, por s_w^D / Q^* ou simplesmente por $1/y^*$, obtemos para as fraturas:

$$\text{Transmissividade} \quad T_f = \frac{y^*}{4\pi} W_\theta \quad (5.31)$$

$$\text{Difusividade}^1 \quad \delta = \frac{T_f}{S_f} = \frac{\theta r^2}{4t} \quad (5.32)$$

$$\text{Armazenamento nas fraturas} \quad S_f = T_f \times \frac{1}{\delta r^2} \quad (5.33)$$

$$\text{Armazenamento na matriz} \quad S_m = S_f (\eta - 1) \quad (5.34)$$

A abertura das fraturas, a condutividade hidráulica e a permeabilidade, são calculadas, respectivamente, com as equações (5.19), (5.20) e (5.21)

Curvas de recuperação

A descarga fractal uniforme equivalente Q^* reflete um regime de fluxo de dimensão D rigorosamente uniforme. Isto permite calcular um rebaixamento específico fractal de recuperação $(s_w')^D / Q^*$, que chamaremos de $1/y^{*'}$ dado pela equação:

$$\frac{1}{y^{*'}} = \frac{1}{4\pi T_f} [W_\theta(t_b) - W_\theta(t')] \quad (5.35)$$

¹ O modelo admite que o raio do poço é desprezível. Por isso, para fins de cálculo, considera-se uma distância $r = 1 \text{ m}$ como representativa das proximidades imediatas do poço.

A transmissividade do condutor hidráulico é então dada pela equação:

$$T_f = \frac{y^{*'}}{4\pi} [W_{\theta}(t_b) - W_{\theta}(t')] \quad (5.36)$$

onde t_b e t' representam, respectivamente, o tempo de bombeamento e o tempo contado a partir do início da recuperação.

Também nesse caso, a abertura das fraturas, a condutividade hidráulica e a permeabilidade, são calculadas, respectivamente, com as equações (5.19), (5.20) e (5.21)

Ilustração do processo de cálculo

O processo de cálculo que se acabou de descrever, é ilustrado pelas curvas de rebaixamento e recuperação, superpostas às curvas padrão da função de Boulton (1963), mostradas nas figuras 5.2a, 5.2b e 5.2c, as quais, para simplificar, chamaremos, respectivamente, W_1 , W_2 e W_3 . Neste sentido foram selecionados gráficos de testes realizados em meio heterogêneo, em três diferentes litologias e três diferentes subprovíncias hidrogeológicas, a saber: a) meta-calcário do Grupo Salitre (Bambuí), na subprovincia Coberturas Carbonáticas São Francisco (52), conforme figura 5.3.

Fig. 5.3 - Curvas de rebaixamento e recuperação de teste de produção em meta-calcário, na subprovincia Coberturas Carbonáticas São Francisco (52) superpostas às curvas padrão da função W_i (Boulton 1963). Notar a influência da variação da vazão bombeada sobretudo na curva de recuperação

b) quartzito, da Formação Morro do Chapéu, na subprovincia Coberturas Clásticas São Francisco (51), conforme figura 5.4;

Fig. 5.4 -Curvas de rebaixamento e recuperação de teste de produção em quartzito, na subprovincia Coberturas Clásticas São Francisco (51) superpostas às curvas padrão da função W_2 (Boulton, 1963).

c) gnaiss do maciço Rio Piranhas, na subprovincia Escudo Oriental Nordeste (61), conforme figura 5.5.

Fig. 5.4 - Curvas de rebaixamento e recuperação de teste de produção em gnaiss, na subprovincia Escudo Oriental Nordeste (61) superpostas às curvas padrão da função W_3 de Boulton (1963).

PARTE II

APLICAÇÕES DO MODELO AO ESTUDO DE CASOS

Aplicações do modelo proposto, foram feitas ao estudo de casos, apenas em região semi-árida, numa amostra de 72 poços perfurados em rochas cristalinas de diferentes litologias. No total foram analisados 86 etapas de bombeamento, com 75 medições de recuperação, em diferentes sub-províncias hidrogeológicas e diferentes tipos de rochas conforme é mostrado no quadro II-1. O cadastro parcial desses testes é apresentado na tabela II-1. Os dados de rebaixamento e recuperação estudados, se encontram arquivados em planilha eletrônica (Lotus 5.0) e não foram incluídos neste trabalho.

Quadro II - 1 - Distribuição dos poços e dos testes de bombeamento nos quais foi aplicado o modelo de capacidade específica fractal

SBH	SPH	LITOLOGIA	POÇOS							TESTES	
			CE	RN	PB	BA	FN	HO	Σ	REB	REC
35	61	Granito	9						9	22	12
37	61			5	3				8	8	8
37	61	Gnaiss		5	5				10	10	10
99	99							6	6	6	6
37	61	Migmatito			4				4	4	4
37	61	Micaxisto		3	4				7	7	7
37	61	Filito			4				4	4	4
35	61	Quartzito	1						1	5	4
51	51					3			3		
47	52	Meta-calcário				9			9	9	9
99	61	Basalto					3		3	3	3
50	61	Cristalino				8			8	8	8
TOTAIS			10	13	20	20	3	6	72	86	75

SBH = sub-bacia hidrográfica; SPH = subprovíncia hidrogeológica; REB=rebaixamento; REC=recuperação; FN=Fernando de Noronha; HO=Honduras.

Admite-se que esse número de poços e testes, é suficiente para a finalidade de testar o modelo. Todavia, ainda não se pode dizer que seja bastante para permitir a individualização, a partir do conhecimento dos parâmetros hidráulicos, (em regiões climáticas, geomorfológicas e geotectônicas diversas), de unidades aquíferas de produtividade distinta. E nem esta é, a finalidade da presente tese. Por enquanto, ainda é preciso continuar ampliando o conhecimento das propriedades hidráulicas do meio fissural, de forma consistente, através do emprego sistemático do método proposto.

A uniformização de informações é talvez um dos aspectos mais importantes até hoje não devidamente considerados em análises estatísticas da hidrogeologia do cristalino. Acredita-se que o estudo sistemático de parâmetros hidráulicos do meio fissural seja essencial para a identificação de variáveis hidrogeológicas. Isto porque, conhecendo-se um parâmetro independente da vazão de teste (como é o caso, por exemplo, da difusividade de um condutor hidráulico), podem-se uniformizar os dados de sua capacidade específica transiente (12 horas, 24 horas, etc), tornando-os apropriados a um tratamento estatístico, sob diferentes condições litológicas, climáticas, morfológicas, tectônicas, etc. Essa é a razão pela qual os testes estão codificados de acordo com o sistema georeferencial discutido no item 1.3.3.

Os casos estudados envolvem poços tubulares, perfurados exclusivamente em zona semi-árida, com profundidades da ordem de 40 a 60 m, diâmetros de 4,5 a 6 polegadas e com revestimento apenas na parte superior, correspondente ao manto de cobertura indiferenciada, para evitar desmoronamento. Ou seja, tratam-se de poços, cuja zona ativa não possui revestimento e portanto, do ponto de vista das profundidades, diâmetros e “desenho”, todos eles são perfeitamente comparáveis. Do ponto de vista das locações, inexistem elementos que levem a dizer que algum dos poços tenha sido “melhor” ou “pior” locado do que outro. Em todos eles, o critério de locação utilizou a fotogeologia e controle de campo para identificação da zona fraturada. Como locações “diferentes” excetuam-se apenas 8 (oito), em poços perfurados no granito Meruoca, que utilizaram, além do critério mencionado, prospecção geofísica por eletro-resistividade.

Como “variável geológica” passível de, eventualmente, influir na produtividade dos poços (e por isso incluída nas tabelas de resultados apresentadas nos capítulos 6 a 8), temos apenas a litologia, pois não existe qualquer informação sobre estilo tectônico ou tipo de estrutura, em escala mesoscópica, que possa ser incluída como tal.

A “influência da litologia” na *produtividade de aquífero*, para os casos estudados, pode ser deduzida da figura II-1, onde são mostradas capacidades específicas de 6 horas obtidas em condutores hidráulicos de diferentes litologias. Vale dizer que os resultados não são muito significativos em termos estatísticos, porque além do pequeno número de poços em cada litologia, o tamanho das amostras é diferente, o que pode afetar as “medidas estatísticas”, ou seja, os parâmetros estatísticos.

De um modo geral, todavia, o que se observa na figura II-1, para um total de 72 poços, é que a produtividade de aquífero no domínio das rochas cristalinas situa-se entre

muito fraca em 37 poços (45,12%), *fraca a média* em 38 poços (46,34%), *média a elevada* em 5 poços (6,10%) e finalmente *muito elevada* em apenas 2 poços (2,44%).

As faixas de valores inferiores a $2,5 \text{ m}^3/\text{h}$ e de valores compreendidos entre $2,5$ e $25 \text{ m}^3/\text{h}$, são encontrados em todas as litologias, representando mais de 90% das amostras. Essas faixas praticamente se repartem com frequências de mesma ordem de grandeza, conforme, aliás, já foi ilustrado na figura 2.10, para a subprovincia Escudo Oriental Nordeste, e como mostra a figura II-1, para o cristalino em geral.

Fig. II-1. Produtividade de aquífero (capacidade específica de 6 horas) em 72 poços, perfurados em meio fissural em diferentes litologias e em diferentes subprovincias hidrogeológicas.

Valores de vazão entre 25 e $100 \text{ m}^3/\text{h}$ ocorrem com frequência muito baixa e apenas nos meta-calcários do Grupo Salitre (Bambuí), para os quais também a maioria dos valores fica na faixa de produtividade de aquífero *fraca a média*.

A apresentação dos resultados dos testes, realizados sob condições de fluxo não uniforme, por subprovincia e por Estado da Federação, é feita em tabelas de dois tipos, a saber:

Tabela de condições iniciais, mostrando:

a) Código do teste e litologia do condutor hidráulico.

- b) *Condições iniciais de carga*, representadas, respectivamente, pela submergência estática do crivo da bomba (h_e) e pela espessura saturada inicial (h_i), do condutor hidráulico.
- c) *Condições de fluxo observadas*, para o tempo de 6 horas, representadas pela capacidade específica observada (y_6) e pela respectiva vazão (Q_6), em regime de fluxo não uniforme.
- d) *Condições de fluxo fractal uniforme equivalente*, caracterizadas, respectivamente, pela magnitude (Q^*) e pela dimensão (D).
- e) *Qualidade do ajuste* da capacidade específica observada à capacidade específica fractal, revelada, respectivamente, pelo coeficiente de determinação amostral (R^2)¹ e pelo erro médio quadrático ($\hat{\sigma}^2$).
Conforme se verá adiante, em todas as tabelas de “condições iniciais”, os altíssimos coeficientes de determinação amostral e os baixos erros médios quadráticos não deixam dúvidas sobre a natureza fractal da capacidade específica.

Tabela de propriedades hidráulicas, mostrando:

- a) Código do condutor hidráulico.
- b) *Parâmetros de transporte do fluido*, associados com as fraturas e representados, respectivamente, pela transmissividade (T_f), condutividade hidráulica (K_f), permeabilidade (k_f) e abertura média das fendas (a).
- c) *Parâmetros de resposta elástica do meio fissural e de difusão do fluido*, representados, respectivamente, pelo coeficiente de armazenamento (S_f) e pelo coeficiente de difusividade (δ).
- d) *Parâmetro de armazenamento*, representado pela porosidade (n).
- e) *Condições de fluxo calculadas*, representadas pela capacidade específica calculada ($\hat{y}_6$) e pela respectiva vazão uniforme ($\hat{Q}_6$), para o tempo de 6 horas.

¹ Razão entre a variância explicada e a variância total da amostra: $\sum (y_{comp} - \bar{y})^2 / \sum (y_{obs} - \bar{y})^2$.
onde: y_{comp} = valores computados; y_{obs} = valores observados; $\bar{y}$ = média dos valores.

Tabela II-1 - CADASTRO DE TESTES DE BOMBEAMENTO REALIZADOS NA SUBPROVÍNCIA **ESCUDO ORIENTAL NORDESTE**

CÓDIGO	LITOLOGIA	FORMAÇÃO OU GRUPO	NOME DO POÇO	LOCAL	UF	MUNICÍPIO	ENTIDADE	DATA INÍCIO	DATA FIM	FIRM	EQPT	TB horas	PRO m	DIA pol	CRI m	NE m	FMP m	FMR m	NUMERO ENTIDADE
3561000101	Granito	Meruoca	JOR-01	Jordão	CE	Sobral	CAGECE	27.04.92	27.04.92	PHD	BS	6	50	6	46	16,03	25,76	20,5	JOR-01
3561000102	Granito	Meruoca	JOR-01	Jordão	CE	Sobral	CAGECE	26.04.92	26.04.92	PHD	BS	10,5	50	6	40	7,12	25,76	20,5	JOR-01
3561000103	Granito	Meruoca	JOR-01	Jordão	CE	Sobral	CAGECE	26.04.92	26.04.92	PHD	BS	10,5	50	6	-1	7,12	25,76	20,5	JOR-01
3561000104	Granito	Meruoca	JOR-01	Jordão	CE	Sobral	CAGECE	09.04.92	09.04.92	PHD	BS	5,75	50	6	46	12,25	25,76	20,5	JOR-01
3561000201	Granito	Meruoca	JOR-02	Jordão	CE	Sobral	CAGECE	11.05.92	11.05.92	PHD	BS	6	50	6	36	6,02	33,5	16	JOR-02
3561000202	Granito	Meruoca	JOR-02	Jordão	CE	Sobral	CAGECE	09.05.92	09.05.92	PHD	BS	2,5	50	6	36	4,766	33,5	16	JOR-02
3561000203	Granito	Meruoca	JOR-02	Jordão	CE	Sobral	CAGECE	10.05.92	10.05.92	PHD	BS	15	50	6	36	4,93	33,5	16	JOR-02
3561000301	Granito	Meruoca	JOR-03	Jordão	CE	Sobral	CAGECE	07.05.92	07.05.92	PHD	BS	10	50	6	46	4,706	42,5	19	JOR-03
3561000302	Granito	Meruoca	JOR-03	Jordão	CE	Sobral	CAGECE	07.05.92	07.05.92	PHD	BS	10	50	6	-1	4,706	42,5	19	JOR-03
3561000303	Granito	Meruoca	JOR-03	Jordão	CE	Sobral	CAGECE	08.05.92	08.05.92	PHD	BS	6	50	6	45	5,212	42,5	19	JOR-03
3561000401	Granito	Meruoca	JOR-04	Jordão	CE	Sobral	CAGECE	05.05.92	05.05.92	PHD	BS	6	50	6	36	8,776	32,5	24,5	JOR-04
3561000402	Granito	Meruoca	JOR-04	Jordão	CE	Sobral	CAGECE	05.05.92	05.05.92	PHD	BS	6	50	6	-1	8,776	32,5	24,5	JOR-04
3561000403	Granito	Meruoca	JOR-04	Jordão	CE	Sobral	CAGECE	05.05.92	05.05.92	PHD	BS	6	50	6	0	8,776	32,5	24,5	JOR-04
3561000404	Granito	Meruoca	JOR-04	Jordão	CE	Sobral	CAGECE	04.05.92	04.05.92	PHD	BS	4	50	6	36	9,125	32,5	24,5	JOR-04
3561000405	Granito	Meruoca	JOR-04	Jordão	CE	Sobral	CAGECE	04.05.92	04.05.92	PHD	BS	4	50	6	-1	9,125	32,5	24,5	JOR-04
3561000406	Granito	Meruoca	JOR-04	Jordão	CE	Sobral	CAGECE	04.05.92	04.05.92	PHD	BS	4	50	6	0	9,125	32,5	24,5	JOR-04
3561000407	Granito	Meruoca	JOR-04	Jordão	CE	Sobral	CAGECE	03.05.92	03.05.92	PHD	BS	6	50	6	36	7,984	32,5	24,5	JOR-04
3561000408	Granito	Meruoca	JOR-04	Jordão	CE	Sobral	CAGECE	03.05.92	03.05.92	PHD	BS	6	50	6	0	7,984	32,5	24,5	JOR-04
3561000501	Granito	Meruoca	JOR-05	Jordão	CE	Sobral	CAGECE	29.04.92	29.04.92	PHD	BS	6	50	6	35	5,54	45,5	20,5	JOR-05
3561000502	Granito	Meruoca	JOR-05	Jordão	CE	Sobral	CAGECE	29.04.92	29.04.92	PHD	BS	5	50	6	-1	5,54	45,5	20,5	JOR-05
3561000503	Granito	Meruoca	JOR-05	Jordão	CE	Sobral	CAGECE	01.05.92	01.05.92	PHD	BS	10	50	6	36	6,17	45,5	20,5	JOR-05
3561000504	Granito	Meruoca	JOR-05	Jordão	CE	Sobral	CAGECE	01.05.92	01.05.92	PHD	BS	10	50	6	0	6,17	45,5	20,5	JOR-05
3561000601	Granito	Meruoca	PAL-01	Palestina	CE	Meruoca	CAGECE	26.07.92	26.07.92	PHD	BS	6	55	6	48	2,138	44	6,5	PAL-01
3561000602	Granito	Meruoca	PAL-01	Palestina	CE	Meruoca	CAGECE	23.05.92	24.05.92	PHD	BS	22	55	6	48	2,141	44	6,5	PAL-01
3561000603	Granito	Meruoca	PAL-01	Palestina	CE	Meruoca	CAGECE	23.05.92	24.05.92	PHD	BS	22	55	6	-1	2,141	44	6,5	PAL-01
3561000604	Granito	Meruoca	PAL-01	Palestina	CE	Meruoca	CAGECE	22.07.92	22.07.92	PHF	BS	3	55	6	48	1,078	44	6,5	PAL-01
3561000605	Granito	Meruoca	PAL-01	Palestina	CE	Meruoca	CAGECE	22.05.92	22.05.92	PHD	BS	3	55	6	-1	1,078	44	6,5	PAL-01
3561000701	Granito	Meruoca	PAL-02	Palestina	CE	Meruoca	CAGECE	31.07.92	31.07.92	PHD	BS	1,33	60	6	48	6,46	53	24,5	PAL-02
3561000702	Granito	Meruoca	PAL-02	Palestina	CE	Meruoca	CAGECE	01.08.92	02.08.92	PHD	BS	6	60	6	57	4,408	53	24,5	PAL-02
3561000703	Granito	Meruoca	PAL-02	Palestina	CE	Meruoca	CAGECE	01.08.92	02.08.92	PHD	BS	6	60	6	-1	4,408	53	24,5	PAL-02
3561000704	Granito	Meruoca	PAL-02	Palestina	CE	Meruoca	CAGECE	29.07.92	30.07.92	PHD	BS	16	60	6	57	1,775	53	24,5	PAL-02
3561000705	Granito	Meruoca	PAL-02	Palestina	CE	Meruoca	CAGECE	29.07.92	30.07.92	PHD	BS	16	60	6	57	1,775	53	24,5	PAL-02
3561000801	Quartzito	Sede	GOI-02	Goiana	CE	Moraújo	CAGECE	04.07.92	04.07.92	PHD	BS	6	50	6	46	6,495	41	21,5	GOI-02
3561000802	Quartzito	Sede	GOI-02	Goiana	CE	Moraújo	CAGECE	04.07.92	04.07.92	PHD	BS	3	50	6	-1	6,495	41	21,5	GOI-02
3561000803	Quartzito	Sede	GOI-02	Goiana	CE	Moraújo	CAGECE	05.07.92	05.07.92	PHD	BS	14	50	6	46	6,481	41	21,5	GOI-02

UF = Estado; EQPT = equipamento de bombeamento; BS = bomba submersa; BP = bomba pistão; CP = compressor; TB = tempo de bombeamento; FIRM = firma executora; PRO = profundidade do poço; DIA = diâmetro; CRI = crivo da bomba; CRI = -1, indica etapa de recuperação; CRI = 0, indica poço de observação; NE = nível estático; FMP = fenda mais profunda; FMR = fenda mais rasa.

Tabela II-1 - CADASTRO DE TESTES DE BOMBEAMENTO REALIZADOS NA SUBPROVÍNCIA **ESCUDO ORIENTAL NORDESTE**

CODIGO	LITOLOGIA	FORMAÇÃO OU GRUPO	NOME DO POÇO	LOCAL	UF	MUNICIPIO	ENTIDADE	DATA INICIO	DATA FIM	FIRMA	EQPT	TB horas	PRO m	DIA pol	CRI m	NE m	FMP m	FMR m	NUMERO ENTIDADE
3561000901	Granito	Meruoca	CAM-01	Camilos	CE	Meruoca	CAGECE	26.08.92	27.08.92	PHD	BS	16	40	6	38	5,22	27,5	21,5	CAM-01
3561000902	Granito	Meruoca	CAM-01	Camilos	CE	Meruoca	CAGECE	26.08.92	27.08.92	PHD		0,25	40	6	-1	5,22	27,5	21,5	CAM-01
3561000903	Granito	Meruoca	CAM-02	Camilos	CE	Meruoca	CAGECE	26.08.92	27.08.92	PHD		16	40	6	0	5,22	27,5	21,5	CAM-01
3561000904	Granito	Meruoca	CAM-01	Camilos	CE	Meruoca	CAGECE	09.09.92	13.09.92	PHD	BS	88	40	6	36	5,87	27,5	21,5	CAM-01
3561000905	Granito	Meruoca	CAM-01	Camilos	CE	Meruoca	CAGECE	13.09.92	22.10.92	PHD		937	40	6	-1	5,87	27,5	21,5	CAM-01
3561001001	Granito	Meruoca	CAM-02	Camilos	CE	Meruoca	CAGECE	09.09.92	13.09.92	PHD	BS	88	40	6	36	2,20	17,5	13,5	CAM-02
3561001002	Granito	Meruoca	CAM-02	Camilos	CE	Meruoca	CAGECE	13.09.92	22.10.92	PHD		1024	40	6	-1	2,20	17,5	13,5	CAM-02
3761000101	Gnaiss	Caicó	ACA-02	Cacimba da Cabra	RN	Acarí	CDM	28.09.93	28.09.93	CDM	CP	12	42	4,5	41	8,00	23,5	11,7	p-1956
3761000102	Gnaiss	Caicó	ACA-02	Cacimba da Cabra II	RN	Acarí	CDM	28.09.93	28.09.93	CDM		2	42	4,5	-1	8,00	23,5	11,7	p-2612
3761000201	Gnaiss	Caicó	ENC-01	Carnaubinha	RN	Encanto	CDM	22.11.93	22.11.93	CDM	CP	12	55	4,5	51	7,30	51	15	p-2727
3761000202	Gnaiss	Caicó	ENC-01	Carnaubinha	RN	Encanto	CDM	22.11.93	22.11.93	CDM		2	55	4,5	-1	7,30	51	15	p-2727
3761000301	Gnaiss	Caicó	CAI-01	Rch. Roça	RN	Caicó	CDM	28.10.93	28.10.93	CDM	CP	12	45	4,5	44	2,80	29,9	6,5	p-2683
3761000302	Gnaiss	Caicó	CAI-01	Rch. Roça	RN	Caicó	CDM	28.10.93	28.10.93	CDM		2,5	45	4,5	-1	2,80	29,9	6,5	p-2683
3761000401	Gnaiss	Caicó	CAI-02	Salão	RN	Caicó	CDM	09.03.93	09.03.93	CDM	CP	12	32,5	4,5	31,6	7,00	16	11	p-1956
3761000402	Gnaiss	Caicó	CAI-02	Salão	RN	Caicó	CDM	09.03.90	09.03.93	CDM		1,5	32,5	4,5	-1	7,00	16	11	p-1956
3761000501	Gnaiss	Caicó	CAI-03	Barbosa de Cima I	RN	Caicó	CDM			CDM	CP	6	45	4,5	43	3,60	38,7	6,4	p-2207
3761000502	Gnaiss	Caicó	CAI-03	Barbosa de Cima I	RN	Caicó	CDM			CDM		1	45	4,5	-1	3,60	38,7	6,4	p-2207
3761000601	Micaxisto	Seridó	EQU-01	Caçara	RN	Equador	CDM	31.10.93	31.10.93	CDM	CP	6	42	4,5	41	3,00	26,8	13,3	p-2302
3761000602	Micaxisto	Seridó	EQU-01	Caçara	RN	Equador	CDM	31.10.93	31.10.93	CDM		2	42	4,5	-1	3,00	26,8	13,3	p-2302
3761000701	Micaxisto	Seridó	CNO-01	Sítio Pedra Preta	RN	Currais Novos	CDM	18.09.93	18.09.93	CDM	CP	12	48	4,5	47	5,30	24,7	18,6	p-2650
3761000702	Micaxisto	Seridó	CNO-01	Sítio Pedra Preta	RN	Currais Novos	CDM	18.09.93	18.09.93	CDM		2	48	4,5	-1	5,30	24,7	18,6	p-2650
3761000801	Micaxisto	Seridó	CNO-02	Sítio Totoró II	RN	Currais Novos	CDM	09.03.90	09.03.90	CDM	CP	6	30	4,5	29	4,80	8		p-1958
3761000802	Micaxisto	Seridó	CNO-02	Sítio Totoró II	RN	Currais Novos	CDM	09.03.90	09.03.90	CDM		2	30	4,5	-1	4,80	8		p-1958
3761000901	Granito		ACA-03	Sít. Eldorado	RN	Acarí	CDM	21.10.92	22.10.92	CDM	CP	10	41	4,5	40	2,65	12	7	p-2284
3761000902	Granito		ACA-03	Sít. Eldorado	RN	Acarí	CDM	22.10.92	22.10.92	CDM		3	41	4,5	-1	2,65	12	7	p-2284
3761001001	Granito		ACA-04	Morada Nova	RN	Acarí	CDM	04.10.93	04.10.93	CDM	CP	12	45	4,5	44	2,88	27,3	8,6	p-2654
3761001002	Granito		ACA-04	MoradaNova	RN	Acarí	CDM	04.10.93	04.10.93	CDM		1,5	45	4,5	-1	2,88	27,3	8,6	p-2654

UF = Estado; EQPT = equipamento de bombeamento; BS = bomba submersa; BP = bomba pistão; CP = compressor; TB = tempo de bombeamento; FIRM = firma executora; PRO = profundidade do poço; DIA = diâmetro; CRI = crivo da bomba; CRI = -1, indica etapa de recuperação; CRI = 0, indica poço de observação; NE = nível estático; FMP = fenda mais profunda; FMR = fenda mais rasa.

Tabela II-1 - CADASTRO DE TESTES DE BOMBEAMENTO REALIZADOS NA SUBPROVÍNCIA **ESCUDO ORIENTAL NORDESTE**

CODIGO	LITOLOGIA	FORMAÇÃO OU GRUPO	NOME DO POÇO	LOCAL	UF	MUNICIPIO	ENTIDADE	DATA INICIO	DATA FIM	FIRMA	EQPT	TB horas	PRO m	DIA pol	CRI m	NE m	FMP m	FMR m	NUMERO ENTIDADE
3761001101	Granito		ACA-05	Pau Pedra	RN	Acarí	CDM	12.10.93	12.10.93	CDM	CP	12	45	4,5	44,5	6,39	21,4	6,3	p-2677
3761001102	Granito		ACA-05	Pau Pedra	RN	Acarí	CDM	12.10.93	12.10.93	CDM	CP	2	45	4,5	-1	6,39	21,4	6,3	p-2677
3761001201	Granito		ALE-01	Trapiá II	RN	Alexandria	CDM	28.05.93	28.05.93	CDM	CP	6	36	4,5	35	3,5	31	5,8	p-2514
3761001202	Granito		ALE-01	Trapiá II	RN	Alexandria	CDM	28.05.93	28.05.93	CDM	CP	3	36	4,5	-1	3,5	31	5,8	p-2514
3761001301	Granito		ANG-01	Tupá	RN	Angicos	CDM	26.04.93	26.04.93	CDM	CP	6	52	4,5	51	7,5	23,3	14,25	p-2743
3761001302	Granito		ANG-01	Tupá	RN	Angicos	CDM	26.04.93	26.04.93	CDM	CP	4	52	4,5	-7	7,5	23,3	14,25	p-2743
3761001401	Filito	Cachoeirinha	CAC-01	Bom Nome	PB	Catingueira	CDRM	18.05.88	18.05.88	CDRM	CP	12	40	4,5	24	2,36	32		aq-437
3761001402	Filito	Cachoeirinha	CAC-01	Bom Nome	PB	Catingueira	CDRM	18.05.88	18.05.88	CDRM	CP	1	40	4,5	-1	2,36	32		aq-437
3761001501	Filito	Cachoeirinha	BVE-01	Fz Raimundo	PB	Boa Ventura	CDRM	29.11.83	30.11.83	CDRM	CP	12	40	4,5	17	7,45	17		rpw-156
3761001502	Filito	Cachoeirinha	BVE-01	Fz Raimundo	PB	Boa Ventura	CDRM	30.11.93	30.11.83	CDRM	CP	1	40	4,5	-1	7,45	17		rpw-156
3761001601	Micaxisto	Seridó	NPA-01	Rch. Serrote	PB	Nova Palmeira	CDRM	30.07.86	30.07.86	CDRM	CP	12	50	4,5	33	0	32,6		aq-325
3761001602	Micaxisto	Seridó	NPA-01	Rch. Serrote	PB	Nova Palmeira	CDRM	30.07.86	30.07.86	CDRM	CP	2	50	4,5	-1	0	32,6		aq-325
3761001701	Micaxisto	Seridó	JDS-01	Ponta da Serra	PB	Junco do Seridó	CDRM	24.07.86	24.07.86	CDRM	CP	12	50	4,5	36	2,5	35,2		aq-337
3761001702	Micaxisto	Seridó	JDS-01	PONTA DA SERRA	PB	Junco do Seridó	CDRM	24.07.86	24.07.86	CDRM	CP	1	50	4,5	-1	2,5	35,2		aq-337
3761001801	Micaxisto	Seridó	PLV-01	Sítio Bo-queirãozinho	PB	Pedra Lavrada	CDRM	08.12.85	09.12.85	CDRM	CP	12	48	4,5	24	5,62	23,7		wbo-258
3761001802	Micaxisto	Seridó	PLV-01	Sítio Bo-queirãozinho	PB	Pedra Lavrada	CDRM	08.12.85	09.12.85	CDRM	CP	2	48	4,5	-1	5,62	23,7		wbo-258
3761001901	Micaxisto	Seridó	SVS-01	Curupaiti-Morcego	PB	São Vicente do Seridó	CDRM	11.07.85	11.07.85	CDRM	CP	12	51	4,5	48	1,05	46,3		aq-272
3761001902	Micaxisto	Seridó	SVS-01	Sit. Curupaiti-Morcego	PB	São Vicente do Seridó	CDRM	11.07.85	11.07.85	CDRM	CP	2	51	4,5	-1	1,05	46,3		aq-272
3761002001	Migmatito	Complexo gn-mg	OLV-01	Sítio Tanque	PB	Olivedos	CDRM	17.03.93	17.03.93	CDRM	CP	10	50	4,5	36	3,72	11,8		c-1022
3761002002	Migmatito	Complexo gn-mg	OLV-01	Sítio Tanque	PB	Olivedos	CDRM	17.03.93	17.03.93	CDRM	CP	1	50	4,5	-1	3,72	11,8		c-1022

UF = Estado; EQPT = equipamento de bombeamento; BS = bomba submersa; BP = bomba pistão; CP = compressor; TB = tempo de bombeamento; FIRM = firma executora; PRO = profundidade do poço; DIA = diâmetro; CRI = crivo da bomba; CRI = -1, indica etapa de recuperação; CRI = 0, indica poço de observação; NE = nível estático; FMP = fenda mais profunda; FMR = fenda mais rasa.

Tabela II - 1 - CADASTRO DE TESTES DE BOMBEAMENTO REALIZADOS NA SUBPROVÍNCIA **ESCUDO ORIENTAL NORDESTE**

CODIGO	LITOLOGIA	FORMAÇÃO OU GRUPO	NOME DO POÇO	LOCAL	UF	MUNICIPIO	ENTIDADE	DATA INICIO	DATA FIM	FIRMA	EQPT	TB horas	PRO m	DIA pol	CRI m	NE m	FMP m	FMR m	NUMERO ENTIDADE
3761002101	Migmatito	Complexo gn-mg	BJS-01	Sede I	PB	Bom Jesus	CDRM	14.08.83	14.08.83	CDRM	CP	12	50	4,5	17	2,50	15		rpw-124
3761002102	Migmatito	Complexo gn-mg	BJS-01	Sede I	PB	Bom Jesus	CDRM	14.08.83	14.08.83	CDRM		1	50	4,5	-1	2,50	15		rpw-124
3761002201	Migmatito	Complexo gn-mg	SBR-01	Grossos	PB	Serra Branca	CDRM	25.05.88	25.05.88	CDRM	CP	12	35	4,5	15	3,78	14,4		aq-440
3761002202	Migmatito	Complexo gn-mg	SBR-01	Grossos	PB	Serra Branca	CDRM	25.05.88	25.05.88	CDRM		1	35	4,5	-1	3,78	14,4		aq-440
3761002301	Migmatito	Complexo gn-mg	SBR-02	Coroa Branca	PB	Serra Branca	CDRM	14.10.87	14.10.87	CDRM	CP	12	50	4,5	10	1,74	8,5		wbb-178
3761002302	Migmatito	Complexo gn-mg	SBR-02	Coroa Branca	PB	Serra Branca	CDRM	14.10.87	14.10.87	CDRM		2	50	4,5	-1	1,74	8,5		wbb-1778
3761002401	Filito	Cachoeirinha	CVE-01	Sítio Catolé	PB	Curral Velho	CDRM	03.12.83	03.12.83	CDRM	CP	12	48	4,5	29	5,88	39,5		rpw-158
3761002402	Filito	Cachoeirinha	CVE-01	Sítio Catolé	PB	Curral Velho	CDRM	03.12.83	03.12.83	CDRM		1	48	4,5	-1	5,88	39,5		rpw-158
3761002501	Filito	Cachoeirinha	NOL-01	Rch. Gravatá (Sede)	PB	Nova Olinda	CDRM	30.10.84	30.10.84	CDRM	CP	12	40	4,5	39	5,51	31,1		aq-242
3761002502	Filito	Cachoeirinha	NOL-01	Rch. Gravatá (Sede)	PB	Nova Olinda	CDRM	30.10.84	30.10.84	CDRM		1	40	4,5	-1	5,51	31,1		aq-242
3761002601	Gnaiss	Complexo gn-mg	CAJ-01	Bairro Remédios II (Sede)	PB	Cajazeiras	CDRM	09.11.88	09.11.88	CDRM	CP	6	50	4,5	12	3,65	6,9		aq-449
3761002602	Gnaiss	Complexo gn-mg	CAJ-01	Bairro Remédios II (Sede)	PB	Cajazeiras	CDRM	09.11.88	09.11.88	CDRM		1	50	4,5	-1	3,65	6,9		aq-449
3761002701	Gnaiss	Complexo gn-mg	CAJ-02	Bairro Pôr do Sol (Sede)	PB	Cajazeiras	CDRM	03.11.88	03.11.88	CDRM	CP	6	30	4,5	18	1,93	13		aq-450
3761002702	Gnaiss	Complexo gn-mg	CAJ-02	Bairro Pôr do Sol (Sede)	PB	Cajazeiras	CDRM	03.11.88	03.11.88	CDRM		1	30	4,5	-1	1,93	13		aq-450

UF = Estado; EQPT = equipamento de bombeamento; BS = bomba submersa; BP = bomba pistão; CP = compressor; TB = tempo de bombeamento; FIRM = firma executora; PRO = profundidade do poço; DIA = diâmetro; CRI = crivo da bomba; CRI = -1, indica etapa de recuperação; CRI = 0, indica poço de observação; NE = nível estático; FMP = fenda mais profunda; FMR = fenda mais rasa.

Tabela II -1 - CADASTRO DE TESTES DE BOMBEAMENTO REALIZADOS NA SUBPROVÍNCIA **ESCUDO ORIENTAL NORDESTE**

CODIGO	LITOLOGIA	FORMAÇÃO OU GRUPO	NOME DO POÇO	LOCAL	MUNICIPIO	UF	ENTIDADE	DATA INICIO	DATA FIM	FIRMA	EQPT	TB horas	PRO m	DIA pol	CRI m	NE m	FMP m	FMR m	NUMERO ENTIDADE
3761002801	Gnaiss	Cplexo gn-mg	SBR-03	Varzea Nova	Serra Branca	PB	CDRM	11.10.87	11.10.87	CDRM	CP	12	22,5	4,5	15	3,16	11,7		wbb-180
3761002802	Gnaiss	Cplexo gn-mg	SBR-03	Varzea Nova	Serra Branca	PB	CDRM	11.10.87	11.10.87	CDRM	CP	2	22,5	4,5	-1	3,16	11,7		wbb-180
3761002901	Gnaiss	Cplexo gn-mg	JUA-01	Sítio Pedra d'Água	Juazeirinho	PB	CDRM	20.07.86	20.07.86	CDRM	CP	12	50	4,5	12	4,15	10,5		aq-336
3761002902	Gnaiss	Cplexo gn-mg	JUA-01	Sítio Pedra d'Água	Juazeirinho	PB	CDRM	20.07.86	20.07.86	CDRM		1	50	4,5	-1	4,15	10,5		aq-336
3761003001	Gnaiss	Cplexo gn-mg	BSM-01	Sítio Monte Alegre	Barra de São Miguel	PB	CDRM	26.10.86	26.10.86	CDRM	CP	12	40	4,5	18	3,06	10,7		aq-363
3761003002	Gnaiss	Cplexo gn-mg	BSM-01	Sítio Monte Alegre	Barra de São Miguel	PB	CDRM	26.10.86	26.10.86	CDRM		1	40	4,5	-1	3,06	10,7		aq-363
3761003101	Granito	Cplexo gn-mg	BSM-02	Sítio Mulungu	Barra de São Miguel	PB	CDRM	28.10.86	28.10.86	CDRM	CP	12	30	4,5	9	2,80	7,9		aq-364
3761003102	Granito	Cplexo gn-mg	BSM-02	Sítio Mulungu	Barra de São Miguel	PB	CDRM	28.10.86	28.10.86	CDRM		1	30	4,5	-1	2,80	7,9		aq-364
3761003201	Granito	Cplexo gn-mg	SBR-04	Sítio Marés	Serra Branca	PB	CDRM	13.10.87	13.10.87	CDRM	CP	12	35	4,5	24	3,73	29		wbb-179
3761003202	Granito	Cplexo gn-mg	SBR-04	Sítio Marés	Serra Branca	PB	CDRM	13.10.87	13.10.87	CDRM	CP	2	35	4,5	-1	3,73	29		wbb-179
3761003301	Granito	Cplexo gn-mg	SUM-01	Abertas II	Sumé	PB	CDRM	04.03.88	04.03.88	CDRM	CP	12	40	4,5	15	3,85	14,3		aq-432
3761003302	Granito	Cplexo gn-mg	SUM-01	Abertas II	Sumé	PB	CDRM	04.03.88	04.03.88	CDRM	CP	1	40	4,5	-1	3,85	14,3		aq-432
5061000101	Pegmatito		lpira-01	Caboré 1	Ipira	BA	CERB	06.06.72	07.06.72	CONE SP	BP	33	60	6	54,8	4,75	36	9	2 - 01/72
5061000201	Pegmatito		lpira-02	Caboré 2	Ipira	BA	CERB	26.07.72	26.07.72	CONE SP	BP	24	54	6	40,8 5	0,70	34,3	19,5	2 - 007/72
5061000301	Pegmatito		lpira-03	Caboré-3	Ipira	BA	CERB	01.09.72	02.09.72	CONE SP	BP	24	30	6	28,7	1,20	11	3	2 - 09/72
5061001301	Cristalino	Embasam	lbir-01	Ibirapoã	Ibirapoã	BA	CERB	13.05.72	14.05.72	CERB	BP	18	100	6	50	1,19	32		1-04/72
5061001302	Cristalino	Embasam	lbir-01	Ibirapoã	Ibirapoã	BA	CERB	14.05.72	14.05.72	CERB	BP	16	100	6	-1	1,19	32		1-04/72
5061001501	Cristalino	Embasam	lbir-02	Ibirapoã	Ibirapoã	BA	CERB	07.10.72	08.10.72	CERB	CP	26	70	6	51,5	0,60	35,4		1-07/72
5061001502	Cristalino	Embasam	lbir-02	Ibirapoã	Ibirapoã	BA	CERB	08.10.72	08.10.72	CERB	CP	4	70	6	-1	0,60	35,4		1-07/72
5061001801	Rocha Basica	Embasam	VRO-01	V.Ouro	Jacobina	BA	CERB	24.02.74	25.02.74	CERB	BP	24	30	6	24,5	3,35	17		1-55/73
5061001802	Rocha Basica	Embasam	VRO-01	V.Ouro	Jacobina	BA	CERB	25.02.74	25.02.74	CERB	BP	5	30	6	-1	3,35	17		1-55/73
5061001901	Gnaiss	Embasam	FBA-01	Fz. Banan	Miguel Calmon	BA	CERB	13.04.73	14.04.73	CERB	BP	24	50	6	43	3,60	33		1-66/73
5061001902	Gnaiss	Embasam	FBA-01	Fz. Banan	Miguel Calmon	BA	CERB	14.04.73	15.04.73	CERB		28	50	6	-1	3,60	33		1-66/73
5061002001	Roc Meso	Embasam	FBA-02	Fz. Banan	Miguel Calmon	BA	CERB	19.05.73	20.05.73	CERB	BP	24	50	6	42	2,00	30		1-75/73
5061002002	Roc Meso	Embasam	FBA-02	Fz. Banan	Miguel Calmon	BA	CERB	20.05.73	22.05.73	CERB		31	50	6	-1	2,00	30		1-75/73

UF = Estado; EQPT = equipamento de bombeamento; BS = bomba submersa; BP = bomba pistão; CP = compressor; TB = tempo de bombeamento; FIRM = firma executora; PRO = profundidade do poço; DIA = diâmetro; CRI = crivo da bomba; CRI = -1, indica etapa de recuperação; CRI = 0, indica poço de observação; NE = nível estático; FMP = fenda mais profunda; FMR = fenda mais rasa.

Tabela II.1 - CADASTRO DE TESTES DE BOMBEAMENTO REALIZADOS NA PROVÍNCIA SÃO FRANCISCO

CÓDIGO	LITOLOGIA	FORMAÇÃO OU GRUPO	NOME DO POÇO	LOCAL	MUNICÍPIO	UF	ENTIDADE	DATA INÍCIO	DATA FIM	FIRMA	EQPT	TB horas	PRO m	DIA pol	CRI m	NE m	FMP m	FMR m	NUMERO ENTIDADE
5151000401	Quartzito	M.Chapeu	G.Ouro-01	Lagin 1	G.Ouro	BA	CERB	11.06.72	12.06.72	MAPEL	BP	24	48	6	32	8,00	33,2	21,2	2 - 002/72
5151000402	Quartzito	M.Chapeu	G.Ouro-01	Lagin 1	G.Ouro	BA	CERB	12.06.72	13.06.72	MAPEL		8,75	48	6	-1	8,00	33,2	21,2	2 - 002/72
5151000501	Quartzito	M.Chapeu	G.Ouro-02	Lagin 2	G.Ouro	BA	CERB	24.07.72	25.07.72	MAPEL	BP	24	52	6	44,4	1,32	38	18,5	2 - 008/72
5151000502	Quartzito	M.Chapeu	G.Ouro-02	Lagin 2	G.Ouro	BA	CERB	25.07.72	25.07.72			18	52	6	-1	1,32	38	18	2 - 008/72
47521000601	Calcário	Bambui	Ibipeba-01	Sede	Ibipeba	BA	CERB	02.06.72	03.06.72	CERB	CP	24	80	6	58,42	2,30	9,8		1 - 008/72
4752000602	Calcário	Bambui	Ibipeba-01	Sede	Ibipeba	BA	CERB	02.06.72	03.06.72	CERB		18	80	6	-1	2,30	9,8		1 - 008/72
4752000701	Calcário	Bambui	Irece-01	Sede	Irece	BA	CERB	21.07.72	22.07.72	CERB	CP	24	80	6	73	28,0	52	12,5	1 - 009/72
4752000702	Calcário	Bambui	Irece-01	Sede	Irece	BA	CERB	22.07.72	22.07.72	CERB		4	80	6	-1	28,0	52	12,5	1 - 009/72
4752000801	Calcário	Bambui	Ibitita-01	Sede	Ibitita	BA	CERB	23.08.72	24.08.72	CERB	CP	24	80	6	75	9,00	23,8	8,2	1 - 011/72
4752000802	Calcário	Bambui	Ibitita-01	Sede	Ibitita	BA	CERB	24.08.72	24.08.72	CERB		6	80	6	-1	9,00	23,8	8,2	1 - 011/72
4752000901	Calcário	Bambui	Irece-02	Sede	Irece	BA	CERB	29.07.72	29.07.72	CERB	CP	15	100	6	74	28,8	48	22	1 - 014/72
4752000902	Calcário	Bambui	Irece-02	Sede	Irece	BA	CERB	29.07.72	30.07.72	CERB		5	100	6	-1	28,8	48	22	1 - 014/72
4752001001	Calcário	Bambui	Irece-03	Sede	Irece	BA	CERB	15.08.72	16.08.72	CERB	CP	24	80	8	73,35	32,0	52	8,85	1 - 016/72
4752001002	Calcário	Bambui	Irece-03	Sede	Irece	BA	CERB	16.08.72	16.08.72	CERB		3	80	8	-1	32,0	52	8,85	1 - 016/72
4752001101	Calcário	Bambui	Lapao-01	Irece	Irece	BA	CERB	20.08.72	21.08.72	CERB	CP	24	80	6	75	9,00	58	36	1 - 019/72
4752001102	Calcário	Bambui	Lapao-01	Irece	Irece	BA	CERB	21.08.72	21.08.72	CERB	CP	2	80	6	-1	9,00	58	36	1 - 019/72
4752001201	Calcário	Bambui	Gabriel	Irece	Irece	BA	CERB	07.12.72	08.12.72	CERB	CP	24	80	10	76	8,00	59	9	1 - 029/72
4752001202	Calcário	Bambui	Gabriel	Irece	Irece	BA	CERB	08.12.72	08.12.72	CERB	CP	1	80	10	-1	8,00	59	9	1 - 029/72
5151001401	Quartzito	M.Chapeu	Pso-01	Po So	M.Chapeu	BA	CERB	29.05.72	30-05-72	CERB	CP	24	40	6	38,6	1,55	13		1-06/72
5151001402	Quartzito	M.Chapeu	Pso-01	Po So	M.Chapeu	BA	CERB	30.05.72	30.05.72	CERB		0,667	40	6	-1	1,55	13		1-06/72
4752001601	Calcário	Bambui	Jus-01	Jussara	Jussara	BA	CERB	0302.72	04.02.72	CERB	CP	24	80	6	73	11,0	50	58	1-43/72
4752001602	Calcário	Bambui	Jus-01	Jussara	Jussara	BA	CERB	04.02.73	05.02.73	CERB		21	80	6	-1	11,0	50	58	1-43/72
4752001701	Calcário	Bambui	Sos-02	S.Soures	S. Soares	BA	CERB	07.01.73	08.01.73	CERB	BP	12	120	6	72,25	5,30	20	28	1-44/72
4752001702	Calcário	Bambui	SOS-02	S.Soures	S. Soares	BA	CERB	08.01.73	08.01.73	CERB		5	120	6	-1	5,30	20	28	1-44/72

UF = Estado; EQPT = equipamento de bombeamento; BS = bomba submersa; BP = bomba pistão; CP = compressor; TB = tempo de bombeamento; FIRM = firma executora; PRO = profundidade do poço; DIA = diâmetro; CRI = crivo da bomba; CRI = -1, indica etapa de recuperação; CRI = 0, indica poço de observação; NE = nível estático; FMP = fenda mais profunda; FMR = fenda mais rasa.

Tabela II - 1 - CADASTRO DE TESTES DE BOMBEAMENTO REALIZADOS NA ILHA DE FERNANDO DE NORONHA

CÓDIGO	LITOLOGIA	FORMAÇÃO OU GRUPO	NOME DO POÇO	LOCAL	UF	MUNICÍPIO	ENTIDADE	DATA INÍCIO	DATA FIM	FIRMA	EQPT	TB horas	PRO m	DIA pol	CRI m	NE m	FMP m	FMR m	NUMERO ENTIDADE
9961000101	Basalto		ATA-01	Atalaia	PE	F.Noronha	CISAGRO	22.12.92	22.12.92	CISAGRO	CP	11	41	6	36	3,65	15		
9961000102								22.12.92	22.12.92	CISAGRO		1,17	41	6	-1	3,65	15		
9961000201	Basalto		CAI-01	Caiera	PE	F.Noronha	CISAGRO	10.12.92	10.12.92	CISAGRO	CP	10	36	6	33,5	9,79	24,7	20,5	
9961000202								10.12.92	10.12.92	CISAGRO		2	36	6	-1	9,79	24,7	20,5	
9961000301	Basalto		VRE-01	Vila Remédio	PE	F.Noronha	CISAGRO	14.11.90	14.11.90	CISAGRO	CP	12	21,6	6	21	4,49	10,8		
9961000302								14.11.90	14.11.90	CISAGRO		2	21,6	6	-1	4,49	10,8		

Tabela II - 1 - CADASTRO DE TESTES DE BOMBEAMENTO REALIZADOS NA ILHA DE ROATÁN - HONDURAS

CODIGO	LITOLOGIA	FORMAÇÃO OU GRUPO	NOME DO POÇO	LOCAL	UF	MUNICÍPIO	ENTIDADE	DATA INÍCIO	DATA FIM	FIRMA	EQPT	TB horas	PRO m	DIA pol	CRI m	NE m	FMP m	FMR m	NUMERO ENTIDADE
9999000101	Gnaiss			Diamond	HO	Roatan	OEA	15.09.85	16.09.85		BS	24	68	6	60	31,3	60,9		
9999000102							OEA	16.09.85	16.09.85			2	68	6	-1	31,3	60,9		
9999000201	Gnaiss			Corozal	HO	Roatan		17.09.85	18.09.85		BS	24	45	6	40	8	30,4		
9999000202								19.09.85	18.09.85			2	45	6	-1	8	30,4		
9999000301	Gnaiss			Flowers Bay	HO	Roatan	OEA	21.09.85	22.09.85		BS	20	54	6	50	7,04	39,6	12,1	
9999000302								22.09.85	22.09.85			1,5	54	6	-1	7,04	39,6	12,1	
9999000401	Gnaiss			La Punta	HO	Roatan	OEA	24.09.85	25.09.85		BS	24	51	6	45	6,86	37	16,7	
9999000402								25.09.85	25.09.85			1	51	6	-1	6,86	37	16,7	
9999000501	Gnaiss			Spanish Bay	HO	Roatan	OEA	02.09.85	03.09.85		BS	24	38	6	35	0,91	15,2		
9999000502								03.09.85	03.09.85			1	38	6	-1	0,91	15,2		
9999000601	Gnaiss			Sandy Bay	HO	Roatan	OEA	02.10.85	03.10.85		BS	24	39	6	30	3,5	24,3		
9999000602								03.10.85	03.10.85			1	39	6	-1	3,5	24,3		

UF = Estado; EQPT = equipamento de bombeamento; BS = bomba submersa; BP = bomba pistão; CP = compressor; TB = tempo de bombeamento; FIRM = firma executora; PRO = profundidade do poço; DIA = diâmetro; CRI = crivo da bomba; CRI = -1, indica etapa de recuperação; CRI = 0, indica poço de observação; NE = nível estático; FMP = fenda mais profunda; FMR = fenda mais rasa.

6. PROVÍNCIA ESCUDO ORIENTAL

6.1 - SUBPROVÍNCIA ESCUDO ORIENTAL NORDESTE

Na subprovíncia Escudo Oriental Nordeste (61) foram analisadas 57 etapas de teste, com 46 medições de recuperação, em 51 poços distribuídos pelos Estados do Ceará (10 poços), Rio Grande do Norte (13 poços), Paraíba (20 poços) e Bahia (8 poços), conforme se descreve a seguir:

6.1.1 - Estado do Ceará

No Estado do Ceará, foram realizadas 24 etapas de teste de bombeamento que permitiram obter 24 curvas de rebaixamento e 12 curvas de recuperação. Os testes foram feitos em 10 (dez) poços, dos quais 9 (nove) em granito e 1 (um) em quartzito, na região de dobramento Médio Coreaú, no Noroeste do Estado. As condições iniciais dos testes aparecem na tabela 6.1 e as propriedades hidráulicas na tabela 6.2.

Magnitude Q^* e dimensão D , do fluxo fractal

Os testes realizados no Estado do Ceará, foram todos feitos com bomba submersa, conforme mostra a tabela II-1 (página 143) de cadastro dos testes. Os valores da dimensão do fluxo (7^a coluna da tabela 6.1), são mostrados na figura 6.1.

Fig. 6.1 - Dimensão fractal de fluxo avaliada em testes de bombeamento na subprovíncia Escudo Oriental Nordeste, no Estado do Ceará, em testes feitos com bomba submersa.

De um modo geral, os valores de D podem ser interpretados da seguinte maneira:

- Valores iguais a 1, indicam que o teste foi realizado com vazão *constante*.

b) Valores maiores do que 1, indicam que a vazão bombeada *decreceu* durante o teste.

c) Valores menores do que 1, significam que a vazão *cresceu*, durante o teste.

Tabela 6.1 - Condições iniciais e fluxo fractal uniforme dos testes de produção realizados em 10 (dez) poços na subprovincia Escudo Oriental Nordeste, no Estado do Ceará

Código	Litologia	hc m	hi m	y6 m³/h.m	Q6 m³/h	D	Q* m²·D·T ⁻¹	R²	σ²
3561000101	Granito	29,97	9,73	0,095	0,69	1,2003	1,02	0,9962	4,00E-05
3561000102	Granito	32,88	18,64	0,077	1,28	1,0267	1,50	0,9997	4,00E-05
3561000103	Granito	-1	18,64						
3561000104	Granito	33,75	13,51			1,2728	2,66	0,9942	7,10E-04
3561000201	Granito	29,98	27,48	0,315	1,74	1,0945	2,17	0,9959	1,37E-03
3561000202	Granito	31,23	28,73			1,0131	2,53	0,9999	3,00E-05
3561000203	Granito	31,07	28,57	0,190	3,60	1,0424	4,15	0,9995	1,20E-04
3561000301	Granito	41,29	37,79	0,107	1,86	1,0199	2,24	0,9993	1,50E-04
3561000302	Granito	-1	37,79						
3561000303	Granito	39,79	37,29	0,057	2,10	1,1079	5,13	0,9979	4,00E-04
3561000401	Granito	27,22	23,72	0,365	1,68	1,0450	1,78	0,9999	7,60E-04
3561000402	Granito	-1	23,72						
3561000403	Granito	0,00	23,72						
3561000404	Granito	26,88	23,38			1,2273	2,87	0,9701	9,52E-02
3561000405	Granito	-1	23,38				2,87		
3561000406	Granito	0,00	23,38				2,87		
3561000407	Granito	28,02	24,52	0,282	3,60	1,0080	3,85	0,9999	1,10E-04
3561000408	Granito	0,00	24,52						
3561000501	Granito	29,46	39,96	0,451	2,40	0,9727	2,36	0,9998	3,20E-04
3561000502	Granito	-1	39,96						
3561000503	Granito	29,83	39,33	0,395	4,15	1,0038	4,31	0,9999	6,00E-05
3561000504	Granito	0,00	39,33						
3561000601	Granito	45,86	41,86	0,327	1,14	0,7386	0,96	0,7398	3,06E-02
3561000602	Granito	45,86	41,86	0,085	2,76	1,0282	3,75	0,9999	3,00E-04
3561000603	Granito	-1	41,86						
3561000604	Granito	46,92	42,92			1,0088	3,85	1,0000	5,90E-04
3561000605	Granito	-1	42,92						
3561000701	Granito	41,54	46,54			1,2424	1,63	0,9942	1,00E-05
3561000702	Granito	52,59	48,59	0,045	0,90	1,1299	1,30	0,9900	3,00E-05
3561000703	Granito	-1	48,59						
3561000704	Granito	55,22	51,22	0,028	1,56	1,1731	5,09	0,9956	2,20E-04
3561000705	Granito	-1	51,22						
3561000801	Qtzito	39,51	34,51	0,515	1,32	1,4211	1,88	0,6390	1,74E-03
3561000802	Qtzito	-1	34,51						
3561000803	Qtzito	39,52	34,52	0,328	2,40	1,0147	2,45	0,9989	2,00E-05
3561000901	Granito	32,78	22,28	1,843	9,48	1,0033	9,59	1,0000	4,00E-04
3561000902	Granito	-1	22,28						
3561000903	Granito	0,00	22,28						
3561000904	Granito	30,13	21,63	0,681	4,00	1,0021	3,99	1,0000	3,60E-04
3561000905	Granito	-1	21,63						
3561001001	Granito	33,79	15,30	1,111	10,20	1,0036	10,77	1,0000	1,53E-03
3561001002	Granito	-1	15,30						

Para os testes realizados no Ceará, conforme mostra a figura 6.1, os valores da dimensão fractal são bastante próximos de 1, indicando que as variações de vazão

verificadas durante os testes foram relativamente pequenas. Basta dizer que os casos de decréscimo mais significativo de vazão nos testes com bomba submersa são caracterizados por valores situados entre 1,20 e 1,27 (figura 6.2)

Fig. 6.2 - Teste de bombeamento em teste de 3 etapas, com bomba submersa. a) Vazão decrescente com o tempo; b) magnitude Q^* e dimensão D do fluxo fractal uniforme equivalente ao fluxo variável.

Existem apenas dois casos em que o valor da dimensão do fluxo é inferior a 1. Tratam-se: i) da primeira etapa de teste do poço 35610005 (figura 6.3a) que foi iniciada com vazão de 2,3 m³/h e pouco tempo depois sofreu um aumento para 2,4 m³/h; ii) da primeira etapa de teste do poço 35610006 (figura 6.3b) na qual a vazão oscilou muito nos primeiros 20 minutos porém de forma crescente. Daí em diante comportou-se como decrecente.

Fig. 6.3 - Variações de vazão bombeada determinantes da dimensão do fluxo fractal uniforme. a) vazão crescente passando a uniforme; b) vazão oscilante, com tendência crescente, depois decrescente.

O baixo valor do coeficiente de determinação (0,7398), conforme tabela 6.1, revela que o ajuste (incluindo pontos de vazão oscilante, crescente e decrescente), traduz um comportamento médio da variabilidade do fluxo e por isso é pouco significativo.

Propriedades hidráulicas

Os valores de transmissividade das fraturas apresentam variações de 1,46 a $77,2 \times 10^{-6} m^2 / s$ (tabela 6.2). Os coeficientes de armazenamento exibem variação de 0,03% a 1,3%.

Tabela 6.2 - Parâmetros físicos dos condutores hidráulicos testados em 10 (dez) poços na subprovincia Escudo Oriental Nordeste - Estado do Ceará

Código	Tf m ² /s	Kf m/s	kf m ²	Difusiv m ² /s	Sf	Abert mm	n %
3561000101	6,38E-06	3,33E-05	3,06E-12	4,17E-03	1,53E-03	1,91E-01	1,97E-03
3561000102	6,36E-06	3,33E-05	3,05E-12	4,17E-03	1,53E-03	1,91E-01	1,03E-03
3561000103	6,37E-06	3,33E-05	3,05E-12			1,91E-01	1,03E-03
3561000104	6,37E-06	3,33E-05	3,05E-12	3,47E-03	1,83E-03	1,91E-01	1,42E-03
3561000201	3,46E-05	1,03E-04	9,44E-12	3,47E-03	9,98E-03	3,37E-01	1,22E-03
3561000202	3,46E-05	1,03E-04	9,43E-12	3,47E-03	9,96E-03	3,36E-01	1,17E-03
3561000203	3,46E-05	1,03E-04	9,43E-12	3,47E-03	9,96E-03	3,36E-01	1,18E-03
3561000301	8,25E-06	3,95E-05	3,63E-12	2,78E-03	2,97E-03	2,09E-01	5,52E-04
3561000302	8,26E-06	3,96E-05	3,63E-12			2,09E-01	5,52E-04
3561000303	8,26E-06	3,96E-05	3,63E-12	1,39E-03	5,94E-03	2,09E-01	5,60E-04
3561000401	3,02E-05	9,38E-05	8,61E-12	2,78E-03	1,09E-02	3,21E-01	1,35E-03
3561000402	3,02E-05	9,39E-05	8,61E-12			3,22E-01	1,36E-03
3561000403	3,02E-05	9,40E-05	8,62E-12				
3561000404	3,02E-05	9,40E-05	8,62E-12	3,47E-03	8,71E-03	3,22E-01	1,38E-03
3561000405	3,02E-05	9,39E-05	8,61E-12			3,21E-01	1,38E-03
3561000406	3,02E-05	9,40E-05	8,62E-12				
3561000407	3,02E-05	9,40E-05	8,63E-12	2,08E-03	1,45E-02	3,22E-01	1,31E-03
3561000408	3,02E-05	9,39E-05	8,62E-12				
3561000501	3,14E-05	9,65E-05	8,85E-12	4,17E-03	7,54E-03	3,26E-01	8,15E-04
3561000502	3,14E-05	9,65E-05	8,85E-12			3,26E-01	8,16E-04
3561000503	3,14E-05	9,65E-05	8,85E-12	3,47E-03	9,06E-03	3,26E-01	8,29E-04
3561000504	3,14E-05	9,64E-05	8,84E-12				
3561000601	4,30E-05	1,19E-04	1,09E-11	4,17E-03	1,03E-02	3,62E-01	8,64E-04
3561000602	7,01E-06	3,55E-05	3,26E-12	5,21E-03	1,35E-03	1,98E-01	4,72E-04
3561000603	3,76E-06	2,34E-05	2,15E-12			1,61E-01	3,84E-04
3561000604	5,55E-06	3,04E-05	2,79E-12	8,33E-03	6,66E-04	1,83E-01	4,26E-04
3561000605	7,54E-06	3,72E-05	3,42E-12			2,02E-01	4,72E-04
3561000701	6,27E-06	3,29E-05	3,02E-12	4,17E-03	1,50E-03	1,90E-01	4,09E-04
3561000702	3,00E-06	2,01E-05	1,85E-12	4,17E-03	7,20E-04	1,49E-01	3,06E-04
3561000703	4,82E-06	2,76E-05	2,54E-12			1,74E-01	3,59E-04
3561000704	2,96E-06	2,00E-05	1,83E-12	9,26E-03	3,20E-04	1,48E-01	2,90E-04
3561000705	1,47E-06	1,25E-05	1,15E-12			1,17E-01	2,29E-04
3561000801	4,15E-05	1,16E-04	1,07E-11	4,17E-03	9,97E-03	3,58E-01	1,04E-03
3561000802	5,51E-05	1,40E-04	1,29E-11			3,93E-01	1,14E-03
3561000803	5,26E-05	1,36E-04	1,25E-11	4,17E-03	1,26E-02	3,87E-01	1,12E-03
3561000901	3,83E-05	1,10E-04	1,01E-11	4,17E-02	9,20E-04	3,48E-01	1,56E-03
3561000902	4,21E-05	1,17E-04	1,08E-11			3,59E-01	1,61E-03
3561000903	4,22E-05	1,17E-04	1,08E-11				
3561000904	1,76E-05	6,55E-05	6,01E-12	4,17E-02	4,22E-04	2,68E-01	1,24E-03
3561000905	1,46E-06	1,25E-05	1,14E-12			1,17E-01	5,42E-04
3561001001	7,72E-05	1,76E-04	1,61E-11	5,95E-03	1,30E-02	4,40E-01	2,87E-03
3561001002	2,95E-05	9,24E-05	8,47E-12			3,19E-01	2,08E-03

As aberturas médias das fendas variam entre 0,17 e 0,44 mm, enquanto que a porosidade (total), apresenta valores muito baixos, na faixa de 0,0022 a 0,2800%.

6.1.2 - Estado do Rio Grande do Norte

Foram feitos 13 testes, de uma única etapa, com 12 medições de recuperação, distribuídos do seguinte modo: i) nove (9) testes no Maciço Rio Piranhas (MRP), sendo 5 em gnaiss e 5 em granito; ii) três (3) testes no sistema de dobramentos interiores Seridó (SED), em micaxistos (tabela 6.3).

Tabela 6.3 - Condições iniciais e fluxo fractal uniforme dos testes de produção realizados em 13 (treze) poços na subprovincia Escudo Oriental Nordeste, no Estado do Rio Grande do Norte.

Código	Litologia	hc m	hi m	y6 m3/h.m	Q6 m3/h	D	Q* m ² ·D ⁻¹	R ²	$\hat{\sigma}^2$
3761000101	Gnaiss	33,00	15,50	0,099	1,07	1,7206	5,97	0,9956	2,20E-04
3761000102	Gnaiss	-1	15,50						
3761000201	Gnaiss	43,70	43,70	0,062	1,20	1,7668	11,79	0,6390	1,74E-03
3761000202	Gnaiss	-1	43,70						
3761000301	Gnaiss	41,20	27,10	0,046	1,20	1,5307	6,35	0,9989	2,00E-05
3761000302	Gnaiss	-1	27,10					1,0000	4,00E-04
3761000401	Gnaiss	24,60	9,00	2,082	2,77	1,0527	2,81		
3761000402	Gnaiss	-1	9,00						
3761000501	Gnaiss	39,40	35,10	0,081	1,36	1,7798	12,37	1,0000	3,60E-04
3761000502	Gnaiss	-1	35,10						
3761000601	Micaxisto	38,00	23,80	0,720	1,95	1,0100	2,01	1,0000	1,53E-03
3761000602	Micaxisto	-1	23,80						
3761000701	Micaxisto	41,70	19,40	0,079	1,18	2,3046	39,84	0,9961	0
3761000702	Micaxisto	-1	19,40						
3761000801	Micaxisto	24,20	3,20	0,066	0,75	1,1694	1,59	0,9965	1,00E-05
3761000802	Micaxisto	-1	3,20						
3761000901	Granito	37,35	9,35	0,189	2,18	1,3433	4,94	0,9878	5,00E-05
3761000902	Granito	-1	9,35						
3761001001	Granito	41,12	24,42	0,083	1,60	1,5035	7,32	0,9982	5,00E-04
3761001002	Granito	-1	24,42						
3761001101	Granito	38,11	15,01	0,017	0,42	1,8884	9,29	1,0000	7,90E-04
3761001102	Granito	-1	15,01						
3761001201	Granito	31,50	27,50	0,176	3,00	1,4260	10,47	0,9892	9,00E-05
3761001202	Granito	-1	27,50						
3761001301	Granito	43,50	15,80	0,017	0,50	2,1040	25,78	0,9979	4,90E-04
3761001302	Granito	-1	15,80						

Magnitude Q* e dimensão D do fluxo fractal

A magnitude Q* da vazão fractal uniforme equivalente está intrinsecamente ligada às condições iniciais do teste. No caso do Rio Grande do Norte, onde os bombeamentos foram feitos com compressor, os dados da tabela 6.3 revelam que alguns testes foram iniciados com vazão muito alta, conforme sugerem os valores de dimensão de fluxo superiores a 2. É o caso dos poços 37610007 e 37610013, nos quais a magnitude do fluxo fractal uniforme equivalente Q* é muito superior à vazão medida após 6 horas de

bombeamento, como mostram as razões (Q^*/Q_0), que atingem, respectivamente, 33,76 e 51,56.

A distribuição dos valores da dimensão do fluxo nos testes realizados, é ilustrada na figura 6.4, na qual se observa que além dos valores superiores a 2 (nos testes 7 e 13), existem quatro outros valores (nos testes 1, 2, 5 e 11), próximos de 2, que também refletem diferenças significativas entre as vazões bombeadas no início do teste e após 6 horas de bombeamento.

Fig. 6.4 - Dimensão fractal de fluxo avaliada em testes de bombeamento na subprovíncia Escudo Oriental Nordeste, no Estado do Rio Grande do Norte, em testes feitos com compressor.

Propriedades hidráulicas

Os parâmetros físicos do meio fissural são mostrados na tabela 6.4. A transmissividade das fraturas ($\times 10^{-6} m^2/s$) varia, nos gnaisses, de 3,6 a 291; nos micaxistos, de 6,1 a 111; e de 1,7 a 25,6 nos granitos. O coeficiente de armazenamento assume valores da ordem de 0,03% a 7% nos gnaisses, da ordem de 0,15% a 2,4% nos micaxistos e de 0,004% a 0,6% nos granitos. Os valores inferiores a 1% já são indicativos de condições de confinamento nas fraturas.

De um modo geral, para as fraturas, a abertura média oscila entre 0,1 e 0,7 mm; o coeficiente de armazenamento fica entre 0,004% e 7%, enquanto que a porosidade (total) apresenta baixos valores percentuais, isto é, na faixa de 0,0004% e 0,0076%.

Tabela 6.4-Parâmetros físicos dos condutores hidráulicos testados em 13 (treze) poços na subprovincia Escudo Oriental Nordeste, no Estado do Rio Grande do Norte

Código	Tf m ² /s	Kf m/s	kf m ²	Difusiv m ² /s	Sf	Abert mm	n %
3761000101	1,37E-05	5,54E-05	5,08E-12	1,39E-02	9,84E-04	2,47E-01	1,59E-03
3761000102	1,37E-05	5,53E-05	5,08E-12			2,47E-01	1,59E-03
3761000201	5,22E-06	2,91E-05	2,67E-12	1,67E-02	3,13E-04	1,79E-01	4,10E-04
3761000202	5,60E-06	3,05E-05	2,80E-12			1,83E-01	4,20E-04
3761000301	3,62E-06	2,28E-05	2,09E-12	5,21E-02	6,95E-05	1,59E-01	5,85E-04
3761000302	3,65E-06	2,29E-05	2,10E-12			1,59E-01	5,86E-04
3761000401	2,83E-04	4,17E-04	3,83E-11	4,17E-03	6,78E-02	6,78E-01	7,53E-03
3761000402	2,91E-04	4,26E-04	3,91E-11			6,85E-01	7,61E-03
3761000501	1,10E-05	4,80E-05	4,40E-12	4,17E-03	2,65E-03	2,30E-01	6,55E-04
3761000502	1,07E-05	4,70E-05	4,32E-12			2,28E-01	6,48E-04
3761000601	1,00E-04	2,09E-04	1,92E-11	4,17E-03	2,41E-02	4,80E-01	2,02E-03
3761000602	1,11E-04	2,24E-04	2,05E-11			4,96E-01	2,08E-03
3761000701	1,06E-05	4,66E-05	4,27E-12	1,39E-03	7,60E-03	2,26E-01	1,17E-03
3761000702	1,02E-05	4,56E-05	4,18E-12			2,24E-01	1,15E-03
3761000801	6,16E-06	3,26E-05	2,99E-12	4,17E-03	1,48E-03	1,89E-01	5,92E-03
3761000802	6,30E-06	3,30E-05	3,03E-12			1,91E-01	5,96E-03
3761000901	2,51E-05	8,29E-05	7,61E-12	4,17E-03	6,01E-03	3,02E-01	3,23E-03
3761000902	2,56E-05	8,41E-05	7,71E-12			3,04E-01	3,25E-03
3761001001	7,23E-06	3,62E-05	3,32E-12	2,78E-03	2,60E-03	2,00E-01	8,18E-04
3761001002	6,82E-06	3,48E-05	3,20E-12			1,96E-01	8,02E-04
3761001101	1,76E-06	1,41E-05	1,30E-12	8,33E-03	2,12E-04	1,25E-01	8,31E-04
3761001102	6,27E-06	3,29E-05	3,02E-12			1,90E-01	1,27E-03
3761001201	1,54E-05	6,00E-05	5,50E-12	4,17E-02	3,70E-04	2,57E-01	9,34E-04
3761001202	1,58E-05	6,10E-05	5,59E-12			2,59E-01	9,42E-04
3761001301	1,84E-06	1,45E-05	1,33E-12	4,17E-02	4,41E-05	1,26E-01	8,01E-04
3761001302	1,86E-06	1,47E-05	1,35E-12			1,27E-01	8,04E-04

6.1.3 - Estado da Paraíba

No Estado da Paraíba foram analisados 20 testes de produção incluindo medidas de recuperação e contemplando diferentes litologias a saber: 4 testes em filito, 4 em micaxisto, 4 em migmatito, 5 em gnaiss e 3 em granito.

Magnitude Q^* e dimensão D , do fluxo fractal

Os bombeamentos foram feitos usando compressor e sob condições que resultaram, na maioria dos casos (65%), em dimensões de fluxo superiores a 2, indicativas de vazão inicial excessivamente forte. Isto pode ser observado na tabela 6.5, e na figura 6.5, onde aparecem valores de D que ascendem de 3,29 até 9,00. Isto significa que a magnitude do fluxo fractal uniforme, nesses casos, tende para infinito, ou seja, a declividade da reta no gráfico dilog de rebaixamento versus capacidade específica, é praticamente sub-vertical. Por isso, a razão (Q^*/Q_c) assume valores consideráveis, chegando no caso extremo, verificado no teste do poço 37610029, a $7,95 \times 10^6 [L^{D-1}]$. Essas grandes diferenças entre o fluxo fractal uniforme equivalente e a vazão medida após 6 horas de bombeamento, se devem ao fato de que os testes foram iniciados com

vazões relativamente muito altas, isto é, o impulso inicial criado no condutor hidráulico, pelo compressor, corresponde a uma vazão instantânea que evidentemente não pode ser medida pelos métodos convencionais de campo usados nos testes de bombeamento.

Tabela 6.5 - Condições iniciais e fluxo fractal uniforme dos testes de produção realizados em 20 (vinte) poços na subprovincia Escudo Oriental Nordeste, no Estado da Paraíba

Código	Litologia	hc m	hi m	y_6 m³/h.m	Q_6 m³/h	D	Q^* $L^{2+D}T^{-1}$	R^2	$\hat{\sigma}^2$
3761001401	Filito	21,64	29,64	0,124	1,44	4,3549	5820,00	0,7181	1,15E-03
3761001402	Filito	-1	29,64						
3761001501	Filito	9,55	9,55	1,820	5,33	1,26305	6,95	0,9795	1,49E-02
3761001502	Filito	-1	9,55						
3761001601	Micaxisto	33,00	32,60	0,023	0,54	5,31055	82500,00	0,9508	7,60E-04
3761001602	Micaxisto	-1	32,60						
3761001701	Micaxisto	33,50	32,70	0,093	2,31	2,34656	219,27	0,9726	8,70E-04
3761001702	Micaxisto	-1	32,70						
3761001801	Micaxisto	18,38	18,08	0,012	0,17	4,33085	2940,00	0,9542	1,20E-03
3761001802	Micaxisto	-1	18,08						
3761001901	Micaxisto	46,95	45,25	0,069	2,26	1,78726	60,80	0,9450	8,96E-03
3761001902	Micaxisto	-1	45,25						
3761002001	Migmatito	32,28	8,13	0,029	0,76	1,7909	23,408	0,9916	4,47E-03
3761002002	Migmatito	-1	8,13						
3761002101	Migmatito	14,50	12,50	0,034	0,42	4,43592	2810,00	0,5425	1,80E-04
3761002102	Migmatito	-1	12,50						
3761002201	Migmatito	11,22	10,62	0,517	3,33	2,42553	47,06	0,9504	9,00E-05
3761002202	Migmatito	-1	10,62						
3761002301	Migmatito	8,26	6,76	0,062	0,41	2,01122	6,92	0,9929	1,03E-02
3761002302	Migmatito	-1	6,76						
3761002401	Filito	23,12	33,62	0,052	0,90	3,29054	576,82	0,9550	1,30E-04
3761002402	Filito	-1	33,62						
3761002501	Filito	33,49	25,59	0,371	6,55	1,14706	15,01	0,9997	4,68E-02
3761002502	Filito	-1	25,59						
3761002601	Gnaiss	8,35	3,25	0,175	0,84	5,45789	766,14	0,9345	9,20E-04
3761002602	Gnaiss	-1	3,25						
3761002701	Gnaiss	16,07	11,07	0,435	4,00	4,64634	12500,00	0,9813	1,57E-03
3761002702	Gnaiss	-1	11,07						
3761002801	Gnaiss	11,83	8,53	1,021	5,22	1,13677	6,90	0,9723	3,84E-03
3761002802	Gnaiss	-1	8,53						
3761002901	Gnaiss	7,85	6,35	0,027	0,19	9,0025	1,51E+06	0,8447	1,47E-01
3761002902	Gnaiss	-1	6,35						
3761003001	Gnaiss	14,94	7,64	0,307	3,00	2,81164	192,09	0,9757	1,45E-03
3761003002	Gnaiss	-1	7,64						
3761003101	Granito	6,20	5,10	1,378	4,11	1,39648	4,06	0,9813	6,53E+00
3761003102	Granito	-1	5,10						
3761003201	Granito	20,27	25,27	0,142	2,06	1,27209	13,93	0,9713	9,49E-02
3761003202	Granito	-1	25,27						
3761003301	Granito	11,15	10,45	0,331	2,32	2,95053	110,07	0,9826	6,50E-04
3761003302	Granito	-1	10,45

Fig. 6.5 - Dimensão fractal de fluxo avaliada em testes de produção realizados com compressor, em 20 poços na subprovincia Escudo Oriental Nordeste, no Estado da Paraíba.

Em três dos poços listados na tabela 6.5 (de números de ordem 0014, 0021 e 0029), os ajustes de capacidade específica fractal apresentam baixos coeficientes de determinação (respectivamente 0,7181, 0,5425 e 0,8447). Isso se explica porque, nos respectivos gráficos de capacidade específica versus rebaixamento, os pontos correspondentes às vazões e rebaixamentos medidos nos primeiros instantes dos testes, “curiosamente” ficam fora da lei de potência característica do fluxo fractal. Mas, nos três casos considerados, verifica-se que, já no *primeiro minuto* de teste, as razões entre os rebaixamentos registrados e os rebaixamentos totais, após 12 horas de bombeamento, eram, respectivamente de 9,73/11,84; 10,98/12,33; 4,03/7,03.

Ou seja, no primeiro minuto as respectivas perdas de carga nos poços eram de 82%, 89% e 57% da perda total após 12 horas. Tratando-se de perdas registradas no *primeiro minuto* dos testes, pode-se dizer que são relativamente *muito altas*. Assim sendo, os valores das vazões medidas, para essas perdas, nesse lapso de tempo, não se coadunam com a lei de potência, provavelmente porque o impulso inicial criado pelo fluxo tendo sido muito forte, não deixou margem para um registro adequado das vazões e dos rebaixamento correspondentes.

Propriedades hidráulicas

As propriedades hidráulicas determinadas na Paraíba, conforme é mostrado na tabela 6.6, variam muito em todas as litologias. A transmissividade das fraturas ($\times 10^{-6} m^2 / s$) varia de 13,7 a 152 nos filitos; de 3,2 a 16,1 nos micaxistos; de 0,8 a 71

nos migmatitos e de 3,1 a 731 nos granitos. O coeficiente de armazenamento se distribui em faixas de valores que variam, respectivamente, de 0,03 a 3,6% nos filitos; de 0,03 a 0,09% nos micaxistos; de 0,008 a 17% nos migmatitos e de 0,01 a 1,1% nos granitos.

Tabela 6.6 - Parâmetros físicos dos condutores hidráulicos testados em 20 poços, na subprovincia Escudo Oriental Nordeste, no Estado da Paraíba

Código	Tf m ² /s	Kf m/s	kf m ²	Difusiv m ² /s	Sf	Abert mm	n %
3761001401	1,14E-05	4,90E-05	4,50E-12	4,17E-03	2,73E-03	2,32E-01	7,84E-04
3761001402	1,37E-04	2,58E-04	2,36E-11			5,33E-01	1,80E-03
3761001501	1,50E-04	2,74E-04	2,51E-11	4,17E-03	3,61E-02	5,49E-01	5,75E-03
3761001502	1,52E-04	2,76E-04	2,53E-11			5,51E-01	5,77E-03
3761001601	3,74E-06	2,33E-05	2,14E-12	1,39E-02	2,70E-04	1,60E-01	4,92E-04
3761001602	3,27E-06	2,13E-05	1,96E-12			1,53E-01	4,70E-04
3761001701	1,61E-05	6,17E-05	5,66E-12	4,17E-03		2,61E-01	7,97E-04
3761001702	1,61E-05	6,17E-05	5,66E-12			2,61E-01	7,97E-04
3761001801	4,05E-06	2,46E-05	2,26E-12	4,17E-03	9,73E-04	1,65E-01	9,11E-04
3761001802	4,02E-06	2,45E-05	2,24E-12			1,64E-01	9,08E-04
3761001901	9,98E-06	4,49E-05	4,12E-12	1,04E-02	9,59E-04	2,22E-01	4,91E-04
3761001902	9,83E-06	4,45E-05	4,08E-12			2,21E-01	4,89E-04
3761002001	8,09E-07	8,41E-06	7,72E-13	9,26E-03	8,74E-05	9,62E-02	1,18E-03
3761002002	8,14E-07	8,45E-06	7,75E-13			9,64E-02	1,19E-03
3761002101	3,65E-06	2,29E-05	2,11E-12	4,17E-03	8,75E-04	1,59E-01	1,27E-03
3761002102	4,38E-06	2,59E-05	2,38E-12			1,69E-01	1,35E-03
3761002201	7,07E-05	1,66E-04	1,52E-11	4,17E-04	1,70E-01	4,27E-01	4,02E-03
3761002202	7,10E-05	1,66E-04	1,52E-11			4,28E-01	4,03E-03
3761002301	1,32E-05	5,41E-05	4,97E-12	8,33E-03	1,59E-03	2,44E-01	3,61E-03
3761002302	1,31E-05	5,37E-05	4,93E-12			2,43E-01	3,60E-03
3761002401	4,23E-06	2,53E-05	2,33E-12	1,39E-02	3,05E-04	1,67E-01	4,97E-04
3761002402	4,50E-06	2,64E-05	2,42E-12			1,70E-01	5,07E-04
3761002501	4,69E-05	1,26E-04	1,16E-11	4,17E-03	1,13E-02	3,72E-01	1,46E-03
3761002502	4,32E-05	1,19E-04	1,09E-11			3,62E-01	1,42E-03
3761002601	1,29E-05	5,32E-05	4,88E-12	4,17E-03	3,09E-03	2,42E-01	7,45E-03
3761002602	7,31E-04	7,86E-04	7,21E-11			9,30E-01	2,86E-02
3761002701	3,50E-05	1,04E-01	9,51E-09	4,17E-03	8,41E-03	3,38E-01	3,05E-03
3761002702	5,78E-03	3,12E-03	2,86E-10			2,5E-01	2,26E-03
3761002801	2,22E-05	7,65E-05	7,02E-12	2,08E-01	1,07E-04	2,90E-01	3,40E-03
3761002802	1,46E-04	2,69E-04	2,47E-11			5,44E-01	6,38E-03
3761002901	3,14E-06	2,08E-02	1,91E-09	4,17E-03	7,55E-04	1,51E-01	2,83E-03
3761002902	4,97E-06	2,82E-02	2,59E-09			1,76E-01	2,77E-03
3761003001	2,69E-05	8,70E-05	7,98E-12	2,08E-02	1,29E-03	3,10E-01	4,05E-03
3761003002	1,38E-04	2,58E-04	2,37E-11			5,33E-01	6,98E-03
3761003101	4,16E-05	1,16E-04	1,07E-11	4,17E-02	9,99E-04	3,58E-01	7,02E-03
3761003102	7,11E-05	1,66E-04	1,52E-11			4,28E-01	8,39E-03
3761003201	5,72E-05	1,44E-04	1,32E-11	2,08E-02	2,75E-03	3,98E-01	1,57E-03
3761003202	3,85E-05	1,10E-04	1,01E-11			3,49E-01	1,38E-03
3761003301	2,98E-05	9,31E-05	8,54E-12	8,33E-03	3,58E-03	3,20E-01	3,06E-03
3761003302	9,50E-03	4,34E-03	3,98E-10			2,19E+00	2,09E-02

6.1.4 - Estado da Bahia

Na subprovincia Escudo Oriental Nordeste, no Estado da Bahia, foram analisados 8 (oito) testes de produção em rochas de diferentes litologias, envolvendo pegmatitos, gnaisses e cristalino indiferenciado, conforme se vê na tabela 6.7.

Magnitude Q^* e dimensão D , do fluxo fractal

Neste caso, dos 8 (oito) poços testados apenas 7 (sete) apresentaram fluxo de dimensão fractal cuja distribuição de valores é mostrada na figura 6.6. Dentre esses, existem 6 (seis) testes com dimensão de fluxo compreendida entre 1 e 2 e apenas 1 teste com dimensão superior a 2. O teste 5061000201 (número 2 na figura 6.6), foi realizado com rebaixamento constante e por isso o fluxo não apresenta dimensão fractal, ou seja, neste caso, temos uma capacidade específica não fractal.

Fig. 6.6 - Dimensão fractal de fluxo avaliada em testes de produção realizados com compressor, em 7 poços na subprovincia Escudo Oriental Nordeste, no Estado da Paraíba.

Ocorre que o referido teste foi realizado com rebaixamento constante porque o nível dinâmico atingiu o crivo da bomba a partir dos 5 minutos (quando foi feita a primeira leitura), aí permanecendo até o final do teste, que teve duração de 24 horas, conforme mostra a figura 6.7.

Neste caso, a capacidade específica não é fractal, pois depende apenas da vazão bombeada, à qual se associa por uma relação linear do tipo $y = BQ_i$, conforme é ilustrado na figura 6.8.

Fig. 6.7 - Teste realizado com rebaixamento constante, em pegmatito, na subprovíncia Escudo Oriental Nordeste no Estado da Bahia e sob condição de fluxo variável de dimensão não fractal.

Fig. 6.8 - Capacidade específica linear, não fractal, dependente apenas da vazão bombeada, em teste com rebaixamento constante na subprovíncia Escudo Oriental Nordeste no Estado da Bahia

Tabela 6.7 - Condições iniciais dos testes realizados em 8 (oito) poços na subprovincia Escudo Oriental Nordeste (61), no Estado da Bahia, sendo 7 (sete) com fluxo fractal uniforme equivalente e 1 (um) com fluxo não uniforme e não fractal.

Código	Litologia	hc m	hi m	y6 m3/h.m	Q6 m3/h	D	Q*	R ²	$\hat{\sigma}^2$
5061000101	Pegmatito	50,05	31,25	0,136	3,85	1,7482	55,85	0,9585	5,52E-03
5061000201	Pegmatito	40,15	33,60	0,152	6,08				
5061000301	Pegmatito	27,50	9,80	0,276	7,60	1,7861	108,08	0,9203	5,62E-03
4761001301	Cristalino	48,81	30,81	0,363	11,99	1,3081	35,38	0,9661	1,36E-03
4761001302	Cristalino	-1	30,81						
4761001501	Cristalino	50,90	34,80	1,681	29,99	1,3340	77,69	0,9654	3,87E-03
4761001502	Cristalino	-1	34,80						
5061001801	Roc Basic	21,15	13,65	0,111	2,34	1,5597	30,05	0,9394	3,31E-02
5061001802	Roc Basic	-1	13,65						
5061001901	Gnaiss	39,40	29,40	0,134	5,08	2,5164	1257,49	0,9274	3,36E-03
5061001902	Gnaiss	-1	29,40						
5061002001	Roc Meso	40,00	28,00	0,188	5,72	1,0213	9,03	0,9998	8,51E-03
5061002002	Roc Meso	-1	28,00						

Propriedades hidráulicas

As propriedades hidráulicas foram calculadas apenas para os 7 (sete) poços que apresentaram fluxo fractal uniforme equivalente, uma vez que o modelo proposto não se aplica para regime de fluxo variável, com rebaixamento constante. Ou seja, não se aplica porque neste caso inexiste uma capacidade específica fractal.

Tabela 6.8 - Parâmetros físicos dos condutores hidráulicos testados em 7 (sete) poços com fluxo fractal uniforme equivalente, na subprovincia Escudo Oriental Nordeste (61) no Estado da Bahia

Código	Tf m ² /s	Kf m/s	kf m ²	Difusiv m ² /s	Sf	Abert mm	n %
5061000101	3,15E-06	2,08E-02	1,91E-09	3,33E-05	9,44E-02	1,51E-01	4,84E-04
5061000201							
5061000301	2,46E-05	8,20E-02	7,52E-09	4,17E-04	5,91E-02	3,00E-01	3,07E-03
4761001301	3,11E-05	9,58E-02	8,78E-09	4,17E-03	7,46E-03	3,25E-01	1,05E-03
4761001302	3,11E-05	9,58E-02	8,78E-09			3,25E-01	1,05E-03
4761001501	2,26E-04	3,60E-01	3,30E-08	4,17E-03	5,43E-02	6,29E-01	1,81E-03
4761001502	2,30E-04	3,64E-01	3,34E-08			6,33E-01	1,82E-03
5061001801	5,49E-05	1,40E-04	1,28E-11	8,33E-02	6,59E-04	3,93E-01	2,88E-03
5061001802	5,40E-05	1,38E-04	1,27E-11			3,90E-01	2,86E-03
5061001901	1,85E-05	6,76E-05	6,21E-12	4,17E-03	4,43E-03	2,73E-01	9,28E-04
5061001902	1,84E-05	6,74E-05	6,18E-12			2,72E-01	9,27E-04
5061002001	1,16E-05	4,96E-05	4,55E-12	2,78E-01	4,18E-05	2,34E-01	8,35E-04
5061002002	1,16E-05	4,98E-05	4,56E-12			2,34E-01	8,36E-04

Os parâmetros físicos nos 7 (sete) testes com fluxo fractal uniforme equivalente, apresentam transmissividades de fraturas ($\times 10^{-6} m^2/s$) entre 3,1 e 24,6 nos pegmatitos e na faixa de 3,1 a 230 para a totalidade dos poços, isto é, para o cristalino indiferenciado. Os coeficientes de armazenamento variam de 0,004% a 9,4%. As aberturas das fraturas oscilam entre 0,15 e 0,63 mm, e a porosidade entre 0,004% a 0,003%.

7. PROVÍNCIA SÃO FRANCISCO

7.1 - SUBPROVÍNCIA COBERTURAS CLÁSTICAS

Nessa subprovíncia foram analisados apenas 3 (três) testes em orto-quartzitos da Formação Morro do Chapéu, conforme mostrado na tabela 7.1.

Magnitude Q^* e dimensão D , do fluxo fractal

Dentre os 3 (três) testes, 2 (dois) foram realizados com bomba pistão (números 1 e 2 na figura 7.1) e o terceiro com compressor (tabela II-1, página 148). As dimensões do fluxo estão ilustradas na figura 7.1 e também são apresentadas na tabela 7.1, juntamente com a magnitude do fluxo fractal uniforme.

Fig. 7.1 - Dimensão fractal de fluxo avaliada em testes de produção na subprovíncia Coberturas Clásticas São Francisco no Estado da Bahia

Tabela 7.1 - Condições iniciais e fluxo fractal uniforme dos testes de produção realizados em 3 (três) poços na subprovíncia Coberturas Clásticas São Francisco (51) no Estado da Bahia

Código	Litologia	hc m	hi m	y6 m3/h.m	Q6 m3/h	D	Q^* $L^{2+D}T^{-1}$	R^2	σ^2
5151000401	Quartzito	24,00	25,20	0,507	10,50	1,0000	10,50	1,0000	0,00E+00
5151000402	Quartzito	-1	25,20	17,303					
5151000501	Quartzito	43,08	36,68	0,242	5,51	1,3008	13,36	0,9922	3,00E-04
5151000502	Quartzito	-1	36,68	0,873					
4751001401	Quartzito	37,05	11,45	4,490	23,98	1,3922	49,87	0,7328	7,34E-04
4751001402	Quartzito	-1	11,45						

Propriedades hidráulicas

Pelo método de superposição de curvas, dos 3 (três) poços selecionados apenas 2 forneceram parâmetros das fraturas, com ordens de grandeza relativamente próximas. Para esses, a transmissividade ($\times 10^{-6} m^2/s$) varia de 15,4 a 69. O coeficiente de armazenamento varia de 0,37% a 1,65%. As aberturas médias ficam entre 0,26 e 0,42 mm e a porosidade entre 0,0007% a 0,0016%. O terceiro poço (4751001401) forneceu valores bem mais altos, até certo ponto inesperados, posto que a transmissividade ($\times 10^{-6} m^2/s$) deduzida do rebaixamento atingiu 3160 contra apenas 658 na recuperação. Além disso, o coeficiente de armazenamento, que foi de 15,8%, é possivelmente muito alto para fraturas.

Tabela 7.2 - Parâmetros físicos dos condutores hidráulicos testados em 3 (três) poços na subprovincia Coberturas Clásticas São Francisco (51), no Estado da Bahia

Código	Tf m ² /s	Kf m/s	kf m ²	Difusiv m ² /s	Sf []	Abert mm	n %
5151000401	6,90E-05	1,63E-01	1,49E-08	4,17E-03	1,65E-02	4,23E-01	1,68E-03
5151000402	5,64E-05	1,42E-01	1,31E-08			3,96E-01	1,57E-03
5151000501	1,54E-05	6,00E-02	5,50E-09	4,17E-03	3,70E-03	2,57E-01	7,00E-04
5151000502	2,98E-05	9,32E-02	8,55E-09			3,20E-01	8,73E-04
4751001401	6,58E-04	7,33E-01	6,72E-08	4,17E-03	1,58E-01	8,98E-01	7,84E-03
4751001402	3,16E-03	2,08E+00	1,91E-07			1,51E+00	1,32E-02

Mesmo assim, o ajuste obtido com a superposição das curvas de rebaixamento e recuperação às curvas padrão de Boulton, conforme mostra a figura 5.4, pode ser considerado excelente.

Fig.7.2 - Gráfico monolog de rebaixamento x tempo, com a transmissividade calculada pela tangente à curva no trecho inicial, em poço na subprovincia Coberturas Clásticas São Francisco (51).

Pelo método da capacidade específica fractal, a transmissividade, calculada com a equação (5.18) foi de $1450 (\times 10^{-6} m^2 / s)$ conforme é mostrado pelo cálculo que se segue, baseado no gráfico ilustrado na figura 7.2. Esse valor é próximo da média obtida pelo método de superposição que é igual a 1909.

$$T_f = \frac{0,183 \times 49,87 / 3600}{1,7491} = 1,45E - 03 \text{ ou } 145E - 06 m^2 / s$$

7.2 - SUBPROVÍNCIA COBERTURAS CARBONÁTICAS (52)

Nessa subprovincia foram analisados 9 (nove) testes, em meta-calcários do Grupo Salitre (Bambu), todos com resultados considerados satisfatórios.

Magnitude Q^* e dimensão D , do fluxo fractal

Os testes interpretados foram efetuados com compressor. As dimensões do fluxo estão ilustradas na figura 7.3 e também são apresentadas na tabela 7.3, juntamente com a magnitude do fluxo fractal uniforme. A maioria dos valores de D fica compreendida entre 1 e 2, havendo apenas um valor acima de 2.

Fig. 7.3 - Dimensão fractal de fluxo avaliada em 9 testes de produção na subprovincia Coberturas Carbonáticas São Francisco (52) no Estado da Bahia

A magnitude da descarga fractal uniforme equivalente, que corresponde à descarga de bombeamento no instante em que o rebaixamento no poço é igual a 1 m, varia de 23,66 a 586,07 [$L^{2+D} T^{-1}$], enquanto que a descarga bombeada, realmente medida para o tempo de 6 horas de bombeamento, varia de 3,56 a 167,69 m^3 / h .

Tabela 7.3 - Condições iniciais e fluxo fractal uniforme dos testes de produção realizados em 9 (nove) poços na subprovincia Coberturas Carbonáticas (52) no Estado da Bahia

Código	Litologia	hc m	hi m	y6 m3/h.m	Q6 m3/h	D	Q* $L^{2+D} T^{-1}$	R^2	$\hat{\sigma}^2$
4752000601	Calcário	56,12	7,50	4,136	26,39	1,3992	56,45	0,8725	3,89E-01
4752000602	Calcário	-1	7,50						
4750000701	Calcário	45,00	24,00	0,987	13,64	1,4767	46,63	0,9605	2,66E-03
4752000702	Calcário	-1	24,00						
4752000801	Calcário	66,00	14,80	1,090	15,80	1,7113	100,05	0,9797	1,46E-02
4752000802	Calcário	-1	14,80						
4752000901	Calcário	45,13	19,13	0,577	11,66	2,2895	586,07	0,9746	9,21E-02
4752000902	Calcário	-1	19,13						
4752001001	Calcário	41,35	20,00	0,342	6,98	1,2356	23,66	0,9989	4,65E+00
4752001020	Calcário	-1	20,00						
4752001101	Calcário	66,00	49,00	167,688	167,69	0,9570	164,32	0,9709	1,37E+00
4752001102	Calcário	-1	49,00						
4752001201	Calcário	68,00	51,00	78,545	129,60	0,9413	132,08	0,9709	1,37E+00
4752001202	Calcário	-1	51,00						
4752001601	Calcário	61,90	38,90	6,187	39,60	1,0433	42,86	0,9988	9,59E-03
4752001602	Calcário	-1	38,90						
4752001701	Calcário	66,95	14,70	0,053	3,56	1,3461	23,03	0,9848	9,36E-04
4752001702	Calcário	-1	14,70						

Propriedades hidráulicas

As propriedades hidráulicas das fraturas/zonas cársticas, são mostradas na tabela 7.4. A transmissividade ($\times 10^{-6} m^2 / s$) varia de 11 a 13800, sendo esta uma das faixas mais amplas de variação observada nos casos estudados. Ainda assim não surpreende, por tratar-se de ambiente de dissolução cárstica. O coeficiente de armazenamento também apresenta, em termos percentuais, ampla faixa de variação, de 0,26% a 36,2%. As aberturas médias ficam entre 0,23 e 2,48 mm e a porosidade entre 0,0015% e 0,0120%.

Tabela 7.4 - Parâmetros físicos dos condutores hidráulicos testados em 9 (nove) poços na subprovincia Coberturas Carbonáticas São Francisco, no Estado da Bahia

Código	Tf m ² /s	Kf m/s	kf m ²	Difusiv m ² /s	Sf []	Abert mm	n %
4752000601	7,27E-04	7,83E-01	7,18E-08	4,17E-03	1,75E-01	9,29E-01	1,24E-02
4752000602	7,26E-04	7,83E-01	7,18E-08			9,28E-01	1,24E-02
4750000701	8,10E-05	1,81E-01	1,66E-08	4,17E-03	1,94E-02	4,47E-01	1,86E-03
4752000702	8,84E-05	1,92E-01	1,76E-08			4,60E-01	1,92E-03
4752000801	8,98E-05	1,94E-01	1,78E-08	4,21E-03	2,13E-02	4,62E-01	3,12E-03
4752000802	1,97E-04	3,28E-01	3,01E-08			6,01E-01	4,06E-03
4752000901	4,54E-05	1,23E-04	1,13E-11	2,78E-01	1,64E-04	3,68E-01	1,93E-03
4752000902	4,51E-05	1,23E-04	1,13E-11			3,67E-01	1,92E-03
4752001001	6,38E-05	1,55E-01	1,42E-08	4,17E-03	1,53E-02	4,13E-01	2,06E-03
4752001020	7,06E-05	1,65E-01	1,52E-08			4,27E-01	2,13E-03
4752001101	1,38E-02	5,57E-03	5,11E-10	4,17E-02	3,31E-01	2,48E+00	5,06E-03
4752001102	1,38E-02	5,57E-03	5,11E-10			2,48E+00	5,05E-03
4752001201	7,16E-03	3,60E-03	3,30E-10	4,17E-02	1,72E-01	1,99E+00	3,90E-03
4752001202	7,19E-03	3,61E-03	3,31E-10			1,99E+00	3,91E-03
4752001601	1,51E-03	1,27E-03	1,17E-10	4,17E-03	3,62E-01	1,18E+00	3,04E-03
4752001602	1,53E-03	1,28E-03	1,18E-10			1,19E+00	3,06E-03
4752001701	1,11E-05	4,83E-05	4,43E-12	4,17E-03	2,68E-03	2,31E-01	1,57E-03
4752001702	1,12E-05	4,85E-05	4,45E-12			2,31E-01	1,57E-03

8 - ILHAS OCEÂNICAS

8.1 - ILHA DE FERNANDO DE NORONHA

Essa ilha, estando fora da rede potamográfica brasileira, recebe a codificação de sub-bacia hidrográfica 99 e sendo ainda de natureza vulcânica, constituída de rochas ígneas com porosidade fissural, recebe provisoriamente, até juízo mais aprofundado do assunto, a codificação (61), da subprovincia hidrogeológica fissural mais próxima, isto é, da subprovincia Escudo Oriental Nordeste, mesmo sem a ela pertencer.

8.1.1 - Magnitude Q^* e dimensão D, do fluxo fractal

Os 3 (três) testes foram realizados com compressor, mas o valor da dimensão do fluxo permaneceu próximo de 1 em dois testes e um pouco mais afastado no outro. Mesmo assim ficou na faixa compreendida entre 1 e 2, conforme é mostrado na figura 8.1 e na tabela 8.1. A magnitude da descarga fractal uniforme equivalente, que corresponde à descarga bombeada no instante de rebaixamento igual a 1 m, varia de 7,02 a 14,63 [$L^{2+D} T^{-1}$]. Por outro lado, a descarga bombeada para o tempo de 6 horas, varia de 1,30 a 6,51 m^3/h .

Fig. 8.1 - Dimensão do fluxo fractal uniforme em 3 (três) testes de produção realizados com compressor em basaltos na Ilha de Fernando de Noronha - PE.

Tabela 8.1 - Condições iniciais e fluxo fractal uniforme dos testes de produção realizados em 3 (três) poços na Ilha de Fernando de Noronha - Estado de Pernambuco

Código	Litologia	hc m	hi m	y6 m ³ /h.m	Q6 m ³ /h	D	Q* L ^{2+D} T ⁻¹	R ²	σ ²
9961000101	Basalto	32,35	11,35	0,411	6,51	1,1589	12,18	0,9949	5,31E-03
9961000102		-1	11,35						
9961000201	Basalto	23,71	14,91	0,084	1,30	1,6209	14,63	0,9879	1,42E-02
9961000202		-1	14,91						
9961000301	Basalto	16,51	6,31	0,640	4,08	1,1903	7,02	0,9988	1,28E-02
9961000302		-1	6,31						

8.1.2 - Propriedades hidráulicas

As propriedades hidráulicas mostradas na tabela 8.2 revelam para as fraturas dos basaltos, transmissividades ($\times 10^{-6} m^2/s$) variando de 14,6 a 60,6; coeficientes de armazenamento com percentuais variando entre 0,006% e 0,145%, indicativos de um ligeiro confinamento. As aberturas médias das fendas vão de 0,25 a 0,40 mm.

Tabela 8.2 - Parâmetros físicos dos) condutores hidráulicos testados em 3 (três) poços na Ilha de Fernando de Noronha - Estado de Pernambuco

Código	Tf m ² /s	Kf m/s	kf m ²	Difusiv m ² /s	Sf	Abert mm	n %
9961000101	2,12E-05	7,41E-05	6,80E-12	3,47E-01	6,10E-05	2,86E-01	2,52E-03
9961000102	2,03E-05	7,20E-05	6,61E-12			2,82E-01	2,48E-03
9961000201	1,46E-05	5,79E-05	5,31E-12	1,04E-01	1,40E-04	2,53E-01	1,69E-03
9961000202	1,48E-05	5,84E-05	5,36E-12			2,54E-01	1,70E-03
9961000301	6,06E-05	1,49E-04	1,37E-11	4,17E-02	1,45E-03	4,05E-01	6,43E-03
9961000302	6,05E-05	1,49E-04	1,37E-11			4,05E-01	6,42E-03

8.2 - ILHA DE ROATÁN

Pertence a um conjunto de 3 (três) ilhas oceânicas conhecidas como “Islas de la Baía”, situadas na costa de Honduras. É caracterizada por um clima semi-árido e constituída de rochas metamórficas Pré-Cambrianas, representadas por micaxistos e gnaisses. Resultados de testes de produção de poços tubulares perfurados nessa ilha foram estudados pelo autor (Manoel Filho, 1986) e por esse motivo são aqui incluídos para fins comparativos com os resultados do cristalino semi-árido brasileiro.

8.2.1 - Magnitude Q^* e dimensão D, do fluxo fractal

Os 6 (seis) testes em gnaisses, foram realizados com bomba submersa conforme tabela II - 1, página 149. A dimensão do fluxo fractal em 3 (três) desses testes se manteve rigorosamente igual a 1, significando que foram feitos com vazão *constante*; em um teste apresentou um valor igual a 1,0436, ou seja, muito próximo e ligeiramente superior a 1, indicativo de pequena variação *decrecente* na vazão bombeada; finalmente nos 2 (dois) testes restantes, apresentou valores próximos, porém inferiores a 1, ou seja, 0,8462 e 0,7903 respectivamente, indicativos de variação *crescente*, da vazão bombeada.

Os valores descritos da dimensão são ilustrados na figura 8.2 e podem ser observados na tabela 8.4. Como os testes foram realizados com vazão constante e quase constante, a magnitude do fluxo fractal uniforme equivalente é da mesma ordem de grandeza das vazões bombeadas para o tempo de 6 horas (tabela 8.4).

Fig. 8.2 - Dimensão do fluxo fractal uniforme em 6 (seis) testes de produção realizados com bomba submersa em gnaisses na Ilha de Roatán - República de Honduras.

Para mostrar que uma dimensão de fluxo inferior à unidade decorre de uma variação *crescente* de vazão durante o teste, apresenta-se a curva de variação da vazão com o tempo (figura 8.3) no teste do poço 99990005, ao qual corresponde a menor

dimensão de fluxo registrada na Ilha, ou seja, o valor 0,7903. Examinando a figura 8.3, observa-se que a variação crescente de fluxo para o poço não ocorreu de uma forma contínua, mas em 3 patamares de vazões constantes (2.18 m³/h nos primeiros 25 minutos; 2.84 m³/h entre 30 e 780 minutos e 5.42 m³/h entre 840 e 1440 minutos).

Fig. 8.3 -Teste escalonado em três patamares crescentes de vazão constante numa mesma etapa de bombeamento, no poço 99990005 (Spanish Bay) Ilha de Roatán - República de Honduras.

Esse comportamento da vazão bombeada se reflete muito bem no gráfico de variação da capacidade específica do poço com o rebaixamento (figura 8.4), no qual se observam dois conjuntos de pontos distribuídos ao longo de duas linhas paralelas de declividade -1. Assim, a figura 8.4 confirma que para vazão *constante* a dimensão do fluxo é rigorosamente igual a 1 e que a capacidade específica obedece à lei expressa pela equação (5.5). O valor 0,7903 reflete portanto um comportamento médio da vazão durante todo o teste.

Os pontos da linha mais baixa correspondem à capacidade específica do poço (equação 5.5) para a vazão de 2.18 m³/h; os pontos da linha imediatamente superior correspondem aos de vazão igual a 2.84 m³/h e finalmente o ponto isolado que aparece à extrema direita acima da linha intermediária representa o conjunto de valores de capacidade específica constante registrados para a vazão de 5.42 m³/h no intervalo de

tempo compreendido entre 840 e 1440 minutos (tabela 5.2), no nível da fenda produtora mais profunda.

As linhas contínuas, através dos mencionados pontos, correspondem à capacidade específica do poço ajustada pela equação (5.5). Os parâmetros indicadores da qualidade do ajuste são mostrados na tabela 8.3. Observa-se claramente que em cada um dos períodos de vazão constante, a dimensão do fluxo $D = 1$ e $Q(t) = Q^* = cte$.

Tabela 8.3 - Magnitude do fluxo, dimensão fractal e parâmetros estatísticos indicativos da qualidade do ajuste da capacidade específica fractal à capacidade específica observada no teste do poço 99990005 - Spanish Bay - Ilha de Roatán - Honduras

Poço	Q^* $L^{2+D}T^{-1}$	D	R^2	$\hat{\sigma}^2$
99990005	1,76	0,7903	0,9162	2,97E-03
	2,18	1	1	1,08E-12
	2,84	1	1	7,07E-11
	5,45	1	1	1,29E-15

Fig. 8.4 - Capacidade específica versus rebaixamento obedecendo a uma lei de potência (equação 5.5) e evoluindo (no gráfico dilog) segundo retas paralelas de declividade -1.

8.2.2 - Propriedades hidráulicas

As propriedades hidráulicas são mostradas na tabela 8.4. Os valores dos parâmetros determinados revelam, para as fraturas do gnaiss, transmissividades ($\times 10^{-6} m^2/s$) variáveis de 12 a 217; coeficientes de armazenamento compreendidos entre 0,3% e 5,2%; aberturas na faixa de 0,23 a 0,62 mm e porosidade variáveis de 0,0011% a 0,0049%.

Tabela 8.4 - Condições iniciais e fluxo fractal uniforme dos testes de produção realizados em 6 (seis) poços na Ilha de Roatán - República de Honduras

Código	Litologia	hc m	hi m	y6 m3/h.m	Q6 m3/h	D	Q* $L^{2+D}T^{-1}$	R ²	$\hat{\sigma}^2$
9999000101	Gnaiss	28,61	29,57	0,259	4,54	0,8462	3,55	0,9761	1,53E-02
9999000102		-1	29,57						
9999000201	Gnaiss	32,00	22,48	0,229	1,54	1,0000	1,54	1,0000	0,00E+00
9999000202		-1	22,48						
9999000301	Gnaiss	42,96	5,15	0,228	2,30	1,0000	2,30	1,0000	0,00E+00
9999000302		-1	5,15						
9999000401	Gnaiss	38,14	9,90	0,157	1,14	1,0436	1,58	0,9951	1,06E-03
9999000402		-1	9,90						
9999000501	Gnaiss	34,09	14,33	0,156	2,84	0,7903	1,77	0,9162	2,97E-03
9999000502		-1	14,33						
9999000601	Gnaiss	26,50	20,88	1,596	5,68	1,0000	5,68	1,0000	0,00E+00
9999000602		-1	20,88						

Tabela 8.5- Parâmetros físicos dos condutores hidráulicos testados em 6 (seis) poços na Ilha de Roatán - República de Honduras

Código	Tf m ² /s	Kf m/s	kf m ²	Difusiv m ² /s	Sf	Abert mm	n %
9999000101	3,53E-05	1,04E-01	9,55E-09	4,17E-03	8,46E-03	3,39E-01	1,15E-03
9999000102	4,67E-05	1,26E-01	1,15E-08			3,72E-01	1,26E-03
9999000201	1,95E-05	7,01E-02	6,43E-09	4,17E-03	4,67E-03	2,78E-01	1,24E-03
9999000202	3,75E-05	1,09E-01	9,96E-09			3,46E-01	1,54E-03
9999000301	1,52E-05	5,95E-02	5,46E-09	4,17E-03	3,66E-03	2,56E-01	4,97E-03
9999000302	1,21E-05	5,12E-02	4,69E-09			2,37E-01	4,61E-03
9999000401	2,24E-05	7,70E-02	7,07E-09	4,17E-03	5,38E-03	2,91E-01	2,94E-03
9999000402	1,52E-05	5,94E-02	5,45E-09			2,56E-01	2,58E-03
9999000501	2,00E-05	7,14E-02	6,55E-09	4,17E-03	4,80E-03	2,80E-01	1,96E-03
9999000502	2,12E-05	7,43E-02	6,81E-09			2,86E-01	2,00E-03
9999000601	2,17E-04	3,50E-01	3,21E-08	4,17E-03	5,21E-02	6,20E-01	2,97E-03
9999000602	1,87E-04	3,17E-01	2,90E-08			5,90E-01	2,83E-03

9. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O modelo de dimensão fractal proposto na presente tese para identificação de parâmetros hidráulicos em meio fissural, foi aplicado na interpretação de 86 etapas de rebaixamento e 75 medições de recuperação, correspondentes a 86 testes de produção realizados em 72 poços, distribuídos por diversas subprovíncias hidrogeológicas e perfurados em diversas litologias de rochas cristalinas. Os resultados levam às seguintes conclusões:

9.1 - O MODELO

- **O método da capacidade específica fractal**, pode ser considerado como plenamente satisfatório. Calcado na experiência obtida com a realização de testes de bombeamento sob condições de *fluxo variável* em domínios fraturados, o método permite avaliar a magnitude do *fluxo uniforme equivalente* para o poço e as propriedades físicas de transmissão (*transmissividade, abertura média das fraturas, condutividade hidráulica, permeabilidade*) e de armazenamento (*porosidade total*) do condutor hidráulico representado pelo conjunto *poço-fendas-blocos associados*.
- Permite ainda determinar, a partir de uma única etapa de bombeamento, em regime transitório, a evolução do rebaixamento do poço em função da vazão, para um dado regime de bombeamento. Vale lembrar que para isso a hidráulica de poços até hoje recomenda como necessária a realização de testes escalonados, com vazões diferentes, em duas etapas (Jacob, 1946) ou três etapas (Rorabaugh, 1953), que para alguns devem ser independentes (Lennox, 1966). Isto porque a equação do rebaixamento no poço, possuindo 3 (três) incógnitas, requer três etapas de bombeamento, para formar um sistema de 3 (três) equações não lineares, cuja solução fornece os parâmetros procurados (apêndice A).
- É aplicável apenas para fluxo *no próprio poço bombeado*, e, neste sentido, independe de quaisquer modelos existentes. A formação rochosa fraturada, à qual o modelo é aplicado, não é concebida como um aquífero fissural, mas tão somente como um condutor hidráulico.
- Mesmo no próprio poço, o método não se aplica a todos os casos, como por exemplo a testes realizados com rebaixamento constante, para os quais a

capacidade específica observada não é fractal, pois depende apenas da vazão bombeada, à qual está ligada por uma relação linear do tipo $y = BQ_i$.

- O modelo também não permite identificar parâmetros de resposta elástica e de difusão, (*coeficiente de armazenamento, difusividade*), nem tão pouco o parâmetro de filtração vertical, do manto de cobertura indiferenciada para as fendas subjacentes, do condutor hidráulico testado. Para tanto é preciso associar o modelo proposto a um outro que também estude o fluxo fora do poço, isto é, no plano (r,z) . No caso, o modelo escolhido como mais apropriado foi o de Boulton & Streltsova (1977), com o qual todos os parâmetros do meio fissural podem ser identificados, mediante substituição do rebaixamento específico s/Q , pelo inverso da capacidade específica fractal $1/y^*$
- O método proposto tem como base a comprovação experimental de que a *capacidade específica observada* Q_i / s_i , de um poço bombeado com vazão variável Q_i e rebaixamento variável s_i , pode ser aproximada por uma *capacidade específica fractal* Q^*/s_i^D , onde Q^* é uma *descarga fractal uniforme equivalente* (ao fluxo variável) e D é a *dimensão do fluxo*.

9.2 - OS PARÂMETROS FUNDAMENTAIS

- Os conceitos de dimensão de fluxo e de fluxo fractal uniforme equivalente, introduzidos no presente trabalho, são fundamentais na avaliação dos parâmetros do meio fissural e podem ser considerados como a principal contribuição da tese para a hidráulica de poços.
- A dimensão do fluxo pode ser encarada como um índice de variabilidade da vazão a partir do início do teste e seus valores podem ser interpretados da seguinte maneira: a) valores iguais a 1 traduzem a condição de fluxo uniforme; b) valores maiores do que 1, indicam que a vazão bombeada *decreceu* em relação à vazão de início do teste; c) valores menores do que 1, indicam que a vazão bombeada *cresceu* em relação à vazão de início do teste.
- A magnitude do fluxo fractal uniforme equivalente, é dada pela capacidade específica fractal para 1 m de rebaixamento, isto é, representa a magnitude da descarga bombeada no “instante” em que o rebaixamento no poço é igual a 1 m. É, portanto, um indicador das condições iniciais do teste e, além disso, um parâmetro que representa a condição de “vazão constante”, requerida pelos

modelos de análise de fluxo uniforme para poços. Essa magnitude pode assumir diferentes valores para uma mesma dimensão de fluxo.

9.3 - AS APLICAÇÕES

- Dos 86 testes estudados, não foi possível aplicar o método proposto em apenas 1 (um) teste (realizado com rebaixamento constante) no poço 50610002, perfurado em pegmatito na subprovíncia Escudo Oriental Nordeste (61) no Estado da Bahia. O nível dinâmico atingiu o crivo da bomba a partir dos 5 minutos, quando foi feita a primeira leitura e aí permaneceu até o final do ensaio, porém a vazão decresceu com tempo. Trata-se portanto de um teste de bombeamento com rebaixamento constante e vazão variável que (pelo método proposto) não pode ser transformada em vazão fractal uniforme equivalente simplesmente porque a capacidade específica, neste caso, não é fractal.
- O método, porém, foi aplicado e permitiu calcular os parâmetros hidráulicos do meio fissural ou melhor, dos condutores hidráulicos testados, em 85 dos 86 testes analisados, ou seja, em 98,8% do total.
- Embora a maioria dos modelos tradicionais de análise de fluxo para poços somente se apliquem para vazão constante, a vazão variável ou fluxo não uniforme, parece constituir a regra nos testes de bombeamento de poços no cristalino. Basta dizer que dos 86 testes analisados apenas 4 testes, representando menos de 5% do total, foram efetivamente realizados com vazão constante. Um deles foi feito com bomba pistão, no poço 51510004, perfurado em quartzito da Formação Morro do Chapéu, na subprovíncia Coberturas Clásticas São Francisco (51) e os 3 (três) outros com bomba submersa, em gnaisses, na Ilha de Roatán em Honduras. Nesses casos, é óbvio que a uniformização da descarga bombeada já é obtida no próprio teste e portanto a magnitude do fluxo fractal uniforme coincide com a magnitude da vazão uniforme bombeada e a dimensão do fluxo é igual a 1.
- Os 82 testes restantes, representando mais de 95% do total, foram realizados em regime de fluxo variável e sob condições iniciais que variam bastante, a depender da potência do equipamento de bombeamento em relação à capacidade do poço. Na subprovíncia Escudo Oriental Nordeste (61), onde foram realizados 65 etapas de teste, os valores da dimensão do fluxo apresentam as seguintes variações: i) de 0,73 a 1,42 em 24 etapas de teste com

bomba submersa, no Ceará; ii) 1,01 a 2,30 em 13 etapas de teste com compressor, no Rio Grande do Norte; iii) de 1, 13 a 9,00 em 20 etapas de testes com compressor, na Paraíba; iv) de 1,02 a 2,51 em 8 etapas de teste com compressor, na Bahia. Na subprovincia Coberturas Clásticas São Francisco (51), para 3 (três) testes, dos quais 2 (dois) com bomba pistão e 1 (um) com compressor, tem-se $1,00 \leq D \leq 1,39$; na subprovincia Coberturas Carbonáticas São Francisco (52), para 9 (nove) testes, dos quais 1 (um) com bomba pistão e 8 (oito) com compressor, $0,94 \leq D \leq 2,28$; nas duas Ilhas Oceânicas selecionadas, tivemos: i) em Fernando de Noronha, para 3 (três) testes com compressor, $1,15 \leq D \leq 1,62$ e em Roatán, para 6 (seis) testes com bomba submersa $0,79 \leq D \leq 1,04$. Valores de $D \leq 2$ podem ser classificados como *normais*; valores no intervalo $2 < D \leq 4$ sugerem *fortes* impulsos de descargas iniciais e valores de $D > 4$ indicam impulsos *muito fortes*.

- Os testes executados com impulsos iniciais acima do normal não são recomendáveis quando se utilizam métodos de interpretação baseados nas curvas de rebaixamento versus tempo. Com o método da capacidade específica fractal isto não parece afetar os resultados, porque não se usa o rebaixamento, mas o inverso da capacidade específica fractal, ou seja, o que podemos chamar de *rebaixamento específico fractal*.
- Assim sendo o método proposto talvez possa resgatar a confiança na possibilidade de análise de muitos dados de bombeamento de poços em meio fissural, hoje qualificados como de "testes mal conduzidos" e/ou com observações "não confiáveis". Aí se incluem os testes de vazão muito variável realizados em aquíferos heterogêneos (fissurais e cársticos) que, independente do equipamento usado para bombear, tenham sido feitos com impulsos iniciais de fluxo muito forte.

9.4 - OS RESULTADOS

Na subprovincia Escudo Oriental Nordeste (61)

- Para o granito Meruoca, no Estado do Ceará, os valores de transmissividade das fraturas apresentam variações de 1,46 a $77,2 \times 10^{-6} m^2 / s$ enquanto que os coeficientes de armazenamento exibem variação de 0,03% a 1,3%. As aberturas médias das fendas variam entre 0,17 e 0,44 mm, e a porosidade (total), apresenta valores muito baixos, na faixa de 0,0022 a 0,2800%.

- Nos gnaisses, no Estado do Rio Grande do Norte, a transmissividade das fraturas ($\times 10^{-6} m^2 / s$) varia, de 3,6 a 291; nos micaxistos, de 6,1 a 111; e de 1,7 a 25,6 nos granitos. O coeficiente de armazenamento assume valores da ordem de 0,03% a 7% nos gnaisses, da ordem de 0,15% a 2,4% nos micaxistos e de 0,004% a 0,6% nos granitos. Os valores inferiores a 1% já são indicativos de condições de confinamento nas fraturas. De um modo geral, para as fraturas, no Rio Grande do Norte, a abertura média oscila entre 0,1 e 0,7 mm; o coeficiente de armazenamento fica entre 0,004% e 7%, enquanto que a porosidade (total) apresenta baixos valores percentuais, isto é, na faixa de 0,0004% e 0,0076%.
- A transmissividade das fraturas ($\times 10^{-6} m^2 / s$) varia de 13,7 a 152 nos filitos; de 3,2 a 16,1 nos micaxistos; de 0,8 a 71 nos migmatitos e de 3,1 a 731 nos granitos. O coeficiente de armazenamento se distribui em faixas de valores que variam, respectivamente, de 0,03 a 3,6% nos filitos; de 0,03 a 0,09% nos micaxistos; de 0,008 a 17% nos migmatitos e de 0,01 a 1,1% nos granitos. A porosidade apresenta uma ampla variação percentual, ficando entre 0,0004% e 0,2860%.
- Na Bahia, a transmissividade das fraturas ($\times 10^{-6} m^2 / s$) fica entre 3,1 e 24,6 nos pegmatitos e na faixa de 3,1 a 230 para a totalidade dos poços, isto é, para o cristalino indiferenciado. Os coeficientes de armazenamento variam de 0,004% a 9,4%. As aberturas das fraturas oscilam entre 0,15 e 0,63 mm, e a porosidade entre 0,0005% e 0,0030%.

Subprovíncia Coberturas Clásticas São Francisco (51)

- Para 2 (dois) poços, de uma amostra de apenas 3 (três), a transmissividade ($\times 10^{-6} m^2 / s$) varia de 15,4 a 69. O coeficiente de armazenamento varia de 0,37% a 1,65%. As aberturas médias ficam entre 0,26 e 0,42 mm e a porosidade entre 0,0007% a 0,0016%. O terceiro poço (4751001401) forneceu valores bem mais altos: a transmissividade ($\times 10^{-6} m^2 / s$) deduzida do rebaixamento atingiu 3160 contra apenas 658 na recuperação e o coeficiente de armazenamento, chegou a 15,8%. A porosidade varia de 0,0007% a 0,0132%.

Subprovíncia Coberturas Carbonáticas São Francisco (52)

- A transmissividade ($\times 10^{-6} m^2 / s$) das fraturas/zonas cársticas, varia de 11 a 13800, sendo esta uma das faixas mais amplas de variação observada nos casos estudados. Ainda assim não surpreende, por tratar-se de ambiente de dissolução

cárstica. O coeficiente de armazenamento também apresenta, em termos percentuais, ampla faixa de variação, de 0,26% a 36,2%. As aberturas médias ficam entre 0,23 e 2,48 mm e a porosidade entre 0,0015% e 0,0120%.

9.5 - A VALIDADE

- As três conhecidas linhas de idéias conceituais de modelos para identificação de parâmetros em meio heterogêneo (caixa-preta, de meio contínuo, uni e duplamente porosos e descontínuos, ou discretos) por si só já é indicativa de que ainda não existe uma metodologia universalmente aceita.
- No nosso caso os resultados obtidos constituem as primeiras estimativas de propriedades hidráulicas feitas com o modelo proposto, a partir de testes de bombeamento de poços em meio fraturado, e por isso fica difícil avaliar, no momento, o significado das ordens de grandeza dos valores encontrados.
- Estudos recentes de identificação de parâmetros hidráulicos numa zona de falhas e fraturas na Alemanha (Himmelsbach et al. 1994) revelaram aberturas médias de fissuras na faixa de 0.1 a 0.3 mm; as porosidades das fissuras ficaram na faixa de 0.1 a 0.3%. Não foi mencionado o tipo de rocha e nem os valores de condutividade hidráulica, ressaltando-se tão somente que os testes se fizeram numa zona altamente permeável. Snow (1968) indica como valores *típicos* para fraturas em poços de 60 m, porosidades da ordem de 0,0050% , o que está em perfeita consonância com os valores encontrados no presente estudo.

9.6 - OS FATORES INFLUENTES NA VAZÃO DO POÇO

- Os casos estudados envolvem poços tubulares, perfurados exclusivamente em zona semi-árida, com profundidades da ordem de 40 a 60 m, diâmetros de 4,5 a 6 polegadas e com revestimento apenas na parte superior, correspondente ao manto de cobertura indiferenciada, para evitar desmoronamento. Tratam-se de poços com zona ativa natural, isto é, sem revestimento e portanto, do ponto de vista das profundidades, diâmetros e “desenho”, todos eles são perfeitamente comparáveis. Do ponto de vista das locações, inexistem elementos (de análise estrutural) que levem a dizer se algum dos poços foi “melhor” ou “pior” localizado do que outro. Em todos os casos, o critério de locação utilizou a fotogeologia e controle de campo para identificação da zona fraturada. Como locações “diferentes” excetuam-se apenas 8 (oito), em poços perfurados no granito

Meruoca, que utilizaram, além do critério mencionado, prospecção geofísica por eletro-resistividade.

- Como “variável geológica” passível de, eventualmente, influir na produtividade dos poços temos, ao lado do clima, apenas a litologia (caso dos calcários cristalinos) pois não existe qualquer informação sobre estilo tectônico ou tipo de estrutura, em escala mesoscópica, que possa ser incluída como tal.
- Mas, sobre a influência da litologia na *produtividade de aquífero*, os resultados disponíveis não são muito significativos, em termos estatísticos, porque além do pequeno número de poços em cada litologia, o tamanho das amostras é diferente, o que pode afetar as “medidas estatísticas”, ou seja, os parâmetros estatísticos.

9.7 - A PRODUTIVIDADE DE “AQUÍFERO”

- A faixa de vazões inferiores a $2,5 \text{ m}^3/\text{h}$, dentro da qual se encontram 57% das produtividades do cristalino semi-árido, também ocorre na zona úmida, porém com frequência bem menor: 18,6% em São Paulo e apenas 7,1% no Paraná.
- Na subprovincia Escudo Oriental Nordeste (61), de clima semiárido, a produtividade de aquífero, baseada em amostra de 822 poços, perfurados nos Estados do Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba e Bahia, varia em duas faixas: *muito fraca* (inferior a $2,5 \text{ m}^3/\text{h}$), em 57% dos poços, e *fraca a média* (entre $2,5$ e $25 \text{ m}^3/\text{h}$) em 43% dos poços. Não se registram valores nas faixas de produtividade superior a $25 \text{ m}^3/\text{h}$.
- Na subprovincia Coberturas Clásticas São Francisco (51) uma amostra de apenas 3 (três) poços revela valores de produtividade *fraca a média*.
- Na subprovincia Coberturas Carbonáticas São Francisco (52) dados de apenas 9 (nove) poços revelam 2 (dois) poços com vazão superior a $100 \text{ m}^3/\text{h}$, 2 (dois) com vazões entre 25 e $100 \text{ m}^3/\text{h}$ e 5 (cinco) com vazões entre $2,5$ e $25 \text{ m}^3/\text{h}$. São valores em faixas de produtividade comparáveis às encontradas na zona úmida, nos Estados de São Paulo e Paraná. Isso mostra, dentro do semi-árido, que nos calcários, devido à dissolução cárstica, a produtividade é superior à que se observa cristalino em geral.

- A produtividade de aquífero na subprovíncia Escudo Oriental Sudeste (62), com base em amostra de 85 poços, no Estado de São Paulo, é muito variável. As vazões mais frequentes (65,1% dos poços), ocorrem na faixa de 2,5 a 25 m³/h, ou seja, de produtividade *fraca a média*. Em ordem decrescente de frequência, aparecem valores nas faixas de produtividade *muito fraca* (18,6%), *média a elevada* (12,8%) e *muito elevada* (3,5%).
- Na subprovíncia Serra Geral (71), conforme se depreende de uma amostra de 198 poços no Estado do Paraná, as produtividades mais frequentes se encontram nas faixas de 2,5 a 25 m³/h e de 25 a 100 m³/h. Em ordem decrescente de frequência, a distribuição é a seguinte: *fraca a média* (51%); *média a elevada* (34,9%); *muito fraca* (7,1%); *muito elevada* (2,5%).

9.8 - O PROBLEMA DA LOCAÇÃO DE POÇOS NO CRISTALINO

- A grande incógnita continua sendo a identificação de relações *objetivas* - determinísticas ou probabilísticas - entre propriedades *geométricas* e propriedades *hidráulicas* do meio fissural, sem o que, provavelmente, o estabelecimento de uma metodologia eficiente de locação de poços, dificilmente será logrado. Isto não significa que se trate de encontrar uma metodologia capaz de garantir uma efetiva melhoria dos padrões conhecidos de produtividade (se é que isto é possível), nas regiões de rochas cristalinas, mas tão somente de uma metodologia que "justifique" ou "explique", os resultados obtidos.
- A distribuição de frequência dos valores de permeabilidade é tipicamente assimétrica concentrando baixos valores à esquerda. Por isso, não se pode dizer que os poços de baixa vazão (que são os mais frequentes no cristalino), sejam necessariamente "mal locados" ou "mal construídos". Ou seja, a maior frequência de baixas vazões no cristalino, pode ser explicada pela maior frequência de zonas de baixa permeabilidade, que caracteriza os maciços rochosos em geral.
- Em suma, o que ainda se continua desconhecendo, é como identificar aqueles **pontos específicos**, ou **zonas preferenciais** de fluxo em meio fraturado, posto que, até hoje, não foi possível relacionar, em escala mesoscópica, estilos estruturais com permeabilidades. Isso é comprovado pelas dispersões que se verificam nos resultados de produtividade de poços, obtidos em meios

fraturados, tanto em zonas áridas, quanto em zonas úmidas. Tais resultados, como os apresentados no presente capítulo, para diversas subprovíncias hidrogeológicas brasileiras, tendem a seguir uma distribuição de frequência do tipo log normal, semelhante à que geralmente se admite para a condutividade hidráulica e/ou para a permeabilidade das rochas fissuradas. (Gustafson & Krásný, 1986).

- Conclui-se, portanto, que somente os testes hidráulicos podem levar ao conhecimento das aberturas, interconectividade e grau de canalização das fraturas.

9.9 - AS AÇÕES

- O método parece reunir a consistência necessária para tornar-se ferramenta importante no estudo sistemático de condutores hidráulicos fraturados. Mas, um melhor julgamento somente poderá ser feito à medida que se forem ampliando os casos estudados. Recomenda-se portanto a sua aplicação no Brasil e particularmente na região Nordeste, onde existe um acervo considerável de informações sobre hidráulica de poços em meio fissural ainda sem tratamento por falta de métodos adequados.
- A uniformização de informações é um importante aspecto até hoje não devidamente considerado em análises estatísticas da hidrogeologia do cristalino. Por serem independentes das vazões bombeadas os parâmetros hidráulicos do meio fissural são essenciais para a identificação de variáveis hidrogeológicas. Recomenda-se por isso a avaliação sistemática dos mesmos por todos aqueles que atuam na área de perfuração de poços no cristalino, para uniformizar, por exemplo, os dados de sua capacidade específica transiente (12 horas, 24 horas, etc), tornando-os apropriados a um tratamento estatístico, sob diferentes condições litológicas, climáticas, morfológicas, tectônicas, etc.

Dados de monitoramentos sistemáticos no cristalino, inexistem no Brasil e por isso o conhecimento dos processos hidráulicos e dos vários fatores geológicos e topográficos, que controlam o fluxo de água do solo para o subsolo, é insatisfatório. No cristalino, o número de fatores influentes nas condições hidráulicas pode ser muito grande, resultando numa variabilidade que deve ser estudada **estatisticamente**. É preciso portanto, adotar procedimentos que, se forem aplicados de maneira sistemática, possam facilitar, no futuro, a

identificação de unidades hidrogeológicas e seus principais fatores influentes (variáveis principais). É o caso, por exemplo, de procurar associar as propriedades hidráulicas avaliadas em meio fissural, ou a produtividade dos condutores hidráulicos testados, com outros fatores ambientais. Daí porque há necessidade de um sistema georeferencial para o país, como por exemplo o recomendado no item 1.3.3.

10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABELIN, H.; GIDLUND, J.; NERETNIEKS, I. 1983. Migration experiments in a single fracture in the Stripa granite: preliminary results. In: WORKSHOP ON GEOL. DISP. RADIOACT. WASTE IN SITU EXPER. IN GRANITE. Stockholm, 1983. *Proc...* Paris, OECD. p. 154-163.
- ALBUQUERQUE, J.P.T. 1984. Os recursos de água subterrânea do trópico semi-árido do Estado da Paraíba. Campina Grande. (Dissertação-Mestrado). Univ. Fed. Paraíba, 183p.
- ARCHIE, G.E. 1952. Classification of carbonate reservoir rocks and petrophysical consideration. *Bull. Am. Assoc. Pet. Geol.* **36**(2): 278-298.
- ATKINSON, L.C.; GALE, J.E.; DUDGEON, C.R. 1994. New insight into the step-drawdown test in fractured-rock aquifers, *Applied Hydrogeology*, **2**(1):9-18.
- BACHMAT, Y. & BEAR, J. 1986. *Macroscopic Modelling of Transport Phenomena in Porous Media 1: The continuum approach*. In: Transport in Porous Media 1, 213-214.
- BAKER, W.J. 1955. Flow in fissured formations. In: PETROLEUM CONGR., 4. Rome, 1955. *Proceedings...* v. 2, p. 379-393.
- BANKS, D.; ROHR-TORP, E.; SKARPHAGEN, H. 1994. Groundwater resources in hard rock; experience from the Hvaler study, southeastern Norway, *Applied Hydrogeology*, **2**(2):33-42.
- BARENBLATT, G. E.; ZHELTOV, I.P.; KOCHINA, I.N. 1960. Basic concepts in the theory of seepage of homogeneous liquids in fissured rocks. *J. Applied Math. Mech.* **24**(5):1286-1303.
- BEAR, J. 1972. *Dynamics of Fluids in Porous Media*. New York, Elsevier.
- BEAR, J. & VERRUIJT, A. 1987. *Modelling Groundwater Flow and Pollution*. Dordrecht, Holland, D. Reidel. 414p.
- BERGÉ, P.; PONEAU, Y.; VIDAL, C. 1986. *Order within chaos*. New York, John Wiley and Sons. 329p.
- BISCALDI, R. 1968. Hydrogéologie des roches eruptives e métamorphiques: analyses bibliographiques. *Bull. BRGM*, **3**(2):23-24.
- BOEHMER, W.K. 1993. Secondary type aquifers and the value of pumping tests for the evaluation of groundwater potential. In: CONG. INT. ASS. HYDROGEOL., 24.. Oslo, 1993. *Memoires...IAH*. p. 159-168.
- BOLVEDE & CHRISTIANSSON, 1987. *Apud* Tsang et al. 1989. Flow and tracer transport in fractured media: A variable aperture channel model and its properties.
- BOULTON, N.S. 1963. Analysis of data from nonequilibrium pumping tests allowing for delayed yield from storage. *Proc. Inst. Civ. Eng.* **26**:469-482.
- BOULTON, N.S. & STRELTSOVA, T.D. 1977. Unsteady flow to a pumped well in a fissured water-bearing formation. *J. Hydrol.* v. **35**:257-269.

- BOURDET & GRINGARTEN, 1980. *Apud* Gringarten, 1982. Flow test evaluation of fractured reservoirs.
- BOURDET, D.; AYOUB, J.; WHITTLE, T.; PIRARD, V.; KNIAZEFF, V. 1983. Interpreting well test in fractured reservoirs. *World Oil*, October, 77-87.
- BOURKE, 1987.....*Apud* Tsang et al., 1989. Flow and tracer transport in fractured media: A variable aperture channel model and its properties.
- BREDEHOEFT, J.D. & PAPADOPULOS, I.S. 1980. A method for determining the hydraulic properties of tight formations. *Water Resour. Res.*, **16**(1):233-238.
- BRITO NEVES, B.B. (1970) Inventário hidrogeológico básico do Nordeste - Folha 24 Aracaju, SO. Recife, Brasil/SUDENE, Div. Doc. 284 p. (Série Hidrogeologia, 26).
- BRITO NEVES, B.B. & MANOEL FILHO, J. 1972. Geologia e províncias hidrogeológicas da Bahia. In: CONG. BRAS. GEOL., 26. Belém, 1972. *Anais...* Belém SBG. v. 2, p. 195-215.
- BRITO NEVES, B.B. 1978. A propósito da evolução litoestratigráfica do pré-cambriano superior do Nordeste. Recife. *J. Mineralogia*, v. 7:19-27.
- BROCH, E. & KJORHOLT, H. 1994. Verification of large-scale permeability tests in hard rock. *Applied hydrogeology*. **2**(3):9-16.
- BROWN, R. 1828. On the existence of active meolecules in organic and inorganic bodies. *Phil. Mag.* 4:162-173.
- BURKE, L. 1989. Using formation microscanner images. *The Technical Review*. January 1989, p. 16-40.
- CAMARGOS, C.C. 1994. Revisión bibliográfica de ensayos hidráulicos en medios poco permeables. s.l. (Tesina - master en hidrología subterránea). Universidad Politécnica de Catalunya. 124p.
- CAVALCANTE, I.N. 1990. Estudo hidrogeológico de terreno cristalino com manto de intemperismo: área piloto de Atibaia (SP). São Paulo, 123p., 1 mapa anexo. (Dissertação - Mestrado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- CHEN, Z.X. 1989 Transient flow of slightly compressible fluids through double-porosity, double-permeability systems. In: BEAR, J. ed. *Transport in porous media 4*, Haifa, Israel. p. 147-184.
- COMOLET, R. 1963. *Mécanique Expérimentale des Fluides*, Tome II. Masson et Cie. Paris.
- COMPANHIA DE ENGENHARIA RURAL DA BAHIA. 1974. Cadastro de poços tubulares do Estado da Bahia. Salvador, CERB. vol. 1, 100p. (poços 01 a 100).
- COMPANHIA DE ENGENHARIA RURAL DA BAHIA. 1975. Cadastro de poços tubulres do Estado da Bahia. Salvador, CERB. vol. 2, 106p. (poços 100 a 206).
- COOPER, H.H., Jr.; BREDEHOEFT, J.D.; PAPADOPULOS, I.S. 1967. Response of finite diameter well to instantaneous charge of water. *Water Resour. Res.*, **3**(1):263-269.

- COSTA, W. D. 1986. Análise dos fatores que atuam no aquífero fissural - área piloto dos Estados da Paraíba e Rio Grande do Norte. São Paulo. (Tese-Doutorado). Instituto de Geociências. Universidade de São Paulo, 225p.
- COSTA, W. D. 1994. Água subterrânea e o desenvolvimento sustentável no semi-árido Nordeste. In: Projeto ARIDAS - GT II. Recursos Hídricos. SPOCPR. Versão preliminar. s. l.
- CRUZ, W. B. & MELO, F.A.C.F. 1968. Estudo geoquímico preliminar das águas subterrâneas do Nordeste do Brasil. Recife, Brasil/SUDENE, Div. Doc. 147 p. (Série Hidrogeologia, 19)
- CULL, R. 1988. Formation microscanner tool imaging and laterolog resistivity measurements in interpretation of crystalline terrains. *Deep Drilling in Crystalline Bedrock*, v.2, Springer Verlag.
- CURRIE, J.B., & NWACHUKWU, S.O. 1974. Evidence on incipient fracture porosity in reservoir rock at depth. *Bull. Can. Pet. Geol.* **22**, 42-58.
- DAVIAU, F. 1986. Interprétation des essais de puits, Les nouvelles methodes, École Nationale Supérieure du Pétrole e des Moteurs, Centre d'études de developpment et d'exploitation des gisements, Édition Technip, Paris.
- DAVIS, S.N. 1969. Pososity and permeability of natural materials. In: DE Wiest, R.J.M. ed. *Flow through porous media*. New York. Academic Press. p. 54-90.
- DICKEY, P.A. 1972. Geology of oil fields of West Siberian Lowland. *Bull. Am. Assoc. Pet. Geol.*, **56**(3):454-471. Brasília.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA. Divisão de Controle de Recursos Hídricos. 1981. Inventário das estações fluviométricas; atualizado até junho de 1981. Brasília, 1981.
- DREESSEN, D. 1986. Fracture detection: interpretation of well logs to select packer seats and locate injection intervals. WORKSHOP ON GEOTHERMAL RESERVOIR ENGINEERING. 11. Stanford, 1986. University of Stanford,
- ELKINS, L.F. 1953. Reservoir performance and well spacing, Spraberry trend area field of West Texas. *Trans. AIME*, **219**:301-304.
- FEDER, J. 1988. *Fractals*. New York-London. Plenum Press. 283p.
- FRAGA, C.G. 1986. Introdução ao zoneamento do sistema aquífero Serra Geral no Estado do Paraná. São Paulo. 125p. (Dissertação - Mestrado) - Inst. Geociências, Univ. de São Paulo.
- GALE, J.E. 1975 A numerical field and laboratory study of flow in rocks with deformable fractures. Berkeley. (Ph.D- thesis). Univ. of California. 255p.
- GIBSON, H.E. 1948. The production of oil from the fields of southwestern Iran. *J. Inst. Pet.*, v. 294, p. 374-398.
- GRINGARTEN, A.C. 1982. Flow test evaluation of fractured reservoirs. *Geol. Soc. Am.* Special paper 189, 27p.

- GUERIN, F.P.M. & BILLAUX, D.M. 1993. On the relationship between connectivity and the continuum approximation in fracture flow and transport modeling. In: CONG. INT. ASS. HYDROGEOL., 24. Oslo, 1993. *Memoires...Oslo*, IAH. p.215-224.
- GUSTAFSON, 1986. *Apud* Gustafson & Krásný, 1994. Crystalline rock aquifers: their occurrence, use and importance.
- GUSTAFSON, G. , KRÁSNÝ, J. 1994, Crystalline rock aquifers: their occurrence, use and importance. *Applied Hydrogeology* 2(2):64-75.
- HAUSMAN, A. 1963. Províncias hidrogeológicas do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, Secretaria de Estado dos Negócios das Obras Públicas. 27p. 1 mapa anexo.
- HIMMELSBACH, T.; HOTZL, H.; MALOSZEWSKI, P. 1994. Forced gradient tracer tests in a highly permeable fault zone. *Applied hydrogeology*, 2(3):40-47.
- HOBBS, B.E.; MEANS, W.D.; WILLIAMS, P.F. 1979. *An outline of structural geology*. New York. John Wiley. 571p.
- HONIK, W.J. 1980. Proposta para uma nova unidade de produção de poço nas rochas cristalinas, Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia, Recife. (inédito).
- HUITT, J.L. 1956. Fluid flow in simulated fractures. *AIChEJ*, v.2, p. 259.
- IAH 1975 - INTERNACIONAL HYDROGEOLOGY CONGRESS. *Memoires...Porto Alegre*, Brazil. 157p.
- JACOB, C.E. 1947. Drawdown test to determine effective radius or artesian well. *Trans. Am. Soc. Civ. Eng.*, 112(2321):1047-1070.
- JOUANNA, P. 1993. A summary of field test methods in fractured rocks. In: BEAR, J.; TSANG CHIN-FU; MARSILY, G. de. ed. *Flow and contaminant transport in fractured rock*. Boston. Academic Press. p. 437-543,
- JOUANNA, P. & FRAS, G. 1979. Introduction à la reconnaissance harmonique, dans l'espace des fréquences, de milieux fissurés par essais d'eau transitoires. Notions de signatures spectrales et application au cas d'horizons fissurés reconnus par pompage harmonique. Unité des solutions. *C.R. Acad. Sc. Paris*, t.288, série B. p. 33-36.
- KARAZAKI, 1990. *Apud* Camargos, 1994. Revisión bibliográfica de ensayos hidráulicos en medios poco permeables.
- KARREBERG, H. 1981. *Hydrogeologie der Nichtverkarstungsfähigen Festgestein*. Wien - New York. Springer Verlag.
- KRÁSNÝ, J. 1990. Regionalization of transmissivity data: hard rocks of the Bohemien Massif , Czechoslovakia. In: CONGR. INTERN. HYDROGEOL. 22. Lausanne, 1990. *Memoires... v.1*, p. 98-105.
- LA BARBERA, P. & ROSSO, R. 1989. On the fractal dimension of stream networks. *Water Resour. Res.*, 25(4): 735-741.
- LABADIE, J.W., & HELWEG, O.J. 1975. Step-drawdown test analysis by computer. *Ground Water*, 13(5):438-450.

- LENNOX, D.H. 1966. Analysis and application of step-drawdown tests. *J. of Hydraulics Division, Amer. Soc. Civ. Eng.*, v. 92(HY6). p. 25-48.
- LEVORSEN, A.J. 1967. *Geology of petroleum*. San Francisco, Freeman.
- LI, T. Y., & YORKE, J. A. 1975. Period 3 implies chaos. *American Mathematical Monthly*, v. 82, p. 985-992.
- LLOYD, P.M.; DAHAN, C.; HUTIN, R. 1986 Formation imaging with micro-electrical scanning arrays: a new generation of stratigraphic high resolution dipmeter tool. In: EUROPEAN FORMATION EVALUATION SYMPOSIUM. 10. SPWLA, 1986.
- LOMIZE, G.M. 1947. *Water movement in fractures* (in Russian). Erevan. Akad. Nauk. Arm. SSR.
- LOMIZE, G.M. 1951. *Flow in fractured rocks* (in Russian). Moscow. Gosenergoizdat. 127 p.
- LORENZ, E.N. 1963. Deterministic nonperiodic flow. *J. Atmos. Sci.* **20**, 130-141.
- LOUIS, C. 1969. A study of groundwater flow in jointed rock and its influence on the stability of rock masses. ROCK MECH. RES. REP. London, Imperial College. (10) 10 p.
- LOUIS, C. 1977. Suggested methods for determining hydraulic parameters and characteristics of rock masses. Report Int. Soc. Rock Mechanics.
- MAINI, Y.N.T. 1971 In situ hydraulic parameters in jointed rock: Their measurement and interpretation. London. (Ph.D - thesis). Univ. of London, Imp. Coll. of Sci. and Technol.
- MANDELBROT, B.B. 1967. How long is the coast of Britain? Statistical self-similarity and fractional dimension, *Science* **156**, 636-638.
- MANDELBROT, B.B. 1983. *The fractal geometry of nature*. New York. Freeman. 468p.
- MANDELBROT, B.B. 1986. Self-affine fractal sets. In: *Fractals in physics*. New York, North Holland. p.3-28.
- MALOSZEWSKI, P. & ZUBER, A. 1985. On the theory of tracer experiments in fissured rocks with porous matrix. *J. Hydrology*, **79**:333-358.
- MALOSZEWSKI, P. & ZUBER, A. 1990. Mathematical modeling of tracer behavior in short-term experiments in fissured rocks. *Water Resour. Res.* **26**(7):1517-1528.
- MANOEL FILHO, J. 1973. Estudo hidrogeológico global e prognósticos de abastecimento de cidades do Paraná, com água subterrânea. Recife, ACQUA PLAN. (Rel. técnico - inédito).
- MANOEL FILHO, J. & BEZERRA, M.A. (1976). Estudo hidrogeológico global e prognósticos de abastecimento de cidades do Rio Grande do Sul com água subterrânea. Recife, ACQUA PLAN. (Relatório técnico - inédito).
- MANOEL FILHO, J. 1986. Estudio hidrogeologico de las islas Roatán, Propicia y Guanaja. República de Honduras. Proyecto Islas de la Bahia. Oficina de la OEA -Tegucigalpa.
- MANOEL FILHO, J. 1995. A gestão da água subterrânea na região cristalina semi-árida do Nordeste Brasileiro. Seminário da disciplina *Gestão de Aquíferos*, Prog. Pós-graduação, Rec. Min. Hidrog., IG-USP, 2º semestre.

- MEINZER, O.E. (1923). The occurrence of ground water in the United States. (U.S.G.S. supply paper 489).
- MEINZER, O.E. (1942). *Hydrology*. New York. Dover. 127p.
- MENEGASSE, L.N. 1991. Estudo hidrogeológico das rochas metassedimentares do Grupo São Roque a NW da Grande São Paulo: critérios para locação de poços profundos. São Paulo, 104p. (Dissertação - Mestrado) - Inst. Geociências, Universidade de São Paulo.
- MENTE, A. & MONT'ALVERNE, A.F. 1982. Mapa hidrogeológico do Brasil na escala de 1:5 000 000. In CONGR. BRAS. DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 2. Salvador, 1982. *Anais...* Salvador, ABAS. p. 111-117.
- MOENCH, A.F. & HSIEH, P.A. 1985. Analysis of slug test data in a well with finite thickness skin. Tucson, Arizona. Mem. IAH. pp. 17-29.
- MUSKAT, M. 1937. *The Flow of Homogeneous Fluids through Porous Media*. New York. McGraw-Hill. 763p.
- NERETNIEKS, 1987. *Apud* Tsang et al., 1989. Flow and tracer transport in fractured media: A variable aperture channel model and its properties.
- NEUZIL, C.E. & TRACY, J.V. 1981. Flow through fractures. *Water Resour. Res.* 17(1):191-199.
- NEVES, E.T. 1979. *Curso de Hidráulica*. Editora Globo, Porto Alegre.
- NIKORA, V.I., & SAPOZHNIKOV, V.B. 1993. River network fractal geometry and its computer simulation. *Water Resour. Res.*, 29(10):3569-3575.
- NIKORA, V.I. 1994. On self-similarity and self-afinity of drainage basins. *Water Resour. Res.* 30(1):133-137.
- NORRIS, S.E. 1976. Change in drawdown caused by enlarging a well in a dolomite aquifer. *Ground Water*, 14(4):191-193.
- OLOFSSON, B. 1991. Effects on groundwater by tunnelling in hard crystalline rocks - analysis of groundwater level data from the Bolmen tunnel, S. Sweden, 1969-1987. *Royal Inst. of Technology, Stockholm (KTH), Dept. of Land and Water Resources*. (Research report , Trita-Kut, 1062).
- OLOFSSON, B. 1994. Flow of groundwater from soil to crystalline rock. *Applied hydrogeology*. 2(3):71-83.
- ONUR, M. & REYNOLDS, A. C. 1988. A new approach for constructing type curves for well test analysis. SPE Formation Evaluation, March, 197-206. s.l.
- PAPADOPULOS, I.S.; BREDEHOEFT, J.D.; COOPER, H.H. Jr. 1973. On the analysis of slug test data. *Water Resour. Res.* 9(4):1087-1089.
- PARRISH, D. R. 1963. Fluid flow in rough fractures. In: PROD. RES. SYMPOSIUM. Norman, Okla. 1963. *SPE-AIME, Univ. Oklahoma*.
- PEITGEN, H. O.; JURGENS, H.; SAUPE, D. 1992. *Fractals for the classroom. Part one: introduction to fractals and chaos*. New York, Springer Verlag. 452 p.

- PERES, A.M.M.; ONUR, M.; REYNOLDS, A.C. 1989. New analysis procedure for determining aquifer properties from slug test. *Water Resour. Res.* **25**(7):1591-1602.
- PESSOA, M.D.; MENTE, A.; LEAL, O. 1980. Províncias hidrogeológicas adotadas para o mapa hidrogeológico do Brasil, na escala 1:2.500.000. In: CONGR. BRAS. DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS. 1. Recife, 1980. *Anais...* Recife. p.461-473.
- POLUBARINOVA-KOCHINA, P. Ya. 1962 *Theory of groundwater movement*. Princeton, N.J. Princeton Univ. Press.
- RAMBOW, F.H.K. 1984. The borehole televiewer: some field examples. In: ANNUAL LOGGING SYMPOSIUM. 25. June 10-13. *SPWLA*.
- RAMEY, H.J.Jr & AGARWAL, R.G. 1972. Annulus unloading rates as influenced by wellbore storage and skin effect. *Trans. Am. Inst. Min. Metall. Pet. Eng.* v. 253. p. 453-463.
- RAMEY, H.J.Jr. 1976. Verification of the Gladfelter-Tracy-Wilsey concept for wellbore storage-dominated transient pressures during production. *J. Can. Pet. Tech.*, **15**(2):84-85.
- RAYNEAU, C. 1972. Contribution a l'étude des écoulements autour d'un forage en milieu fissuré. Montpellier, France. (Thèse - Docteur-Ing.). Univ. des Sci. et Tech. du Languedoc, Acad. de Montpellier.
- RISSLER, P. 1978. Determination of the water permeability of jointed rock. *Inst. for Found. Eng. Soil Mech. and Water Ways Constr.* Aachen Univ., Aachen, Germany, *Publ.* 5, p. 7-150.
- ROBERSON, J.A. & CROWE, C.T. 1985. *Engineering Fluid Mechanics*. Boston. Houghton Mifflin Company.
- ROBERT, A., & ROY, A.G. 1990. On the fractal interpretation of the mainstream length-drainage area relationship. *Water Resour. Res.*, **26**(5):839-842.
- ROCHA, G.A. 1996. Mega-reservatório de água subterrânea do cone sul: bases para uma política de desenvolvimento e gestão. In: SEMINÁRIO INTERN. AQUIF. GIG. MERCOSUL, 1. Curitiba, 1996. *Relatório...* Curitiba (inédito). 27p., ilustr.
- ROMM, E.S. 1966. *Flow characteristics of fractured rocks*. Moscow. (in Russian), Nedra, 283p.
- RORABAUGH, M.I. 1953. Graphical and theoretical analysis of step-drawdown tests of artesian wells. *Proc. Amer. Soc. Civ. Eng.*, **79**(362): 23-26.
- SAUVEPLANE, C. 1984. Pumping Test Analysis in Fractured Aquifer Formations: State of the Art and Some Perspectives. *Groundwater Hydraulics. Amer. Geoph. Union. Water Resour.* Monograph 9, p.171-206.
- SHARP, J.C. 1970. Fluid flow through fissured media. London. (Ph.D - thesis). Univ. London, Imp. Coll. of Sci. and Technol.
- SHARP, J.C. & MAINI, Y.N.T. 1972. Fundamental considerations on the hydraulic characteristics of joints in rocks. In: SYMPOSIUM ON PERCOLATION THROUGH FRACTURED ROCK. Stuttgart, 1972. *Proceedings ...* Stuttgart. Int. Soc. Rock Mech.

- SMECHOV, E.M. 1962. Development of fracturing in rock and fractured reservoir capacity (in Russian). In: VNIGRI, 172. Leningrad, 1962. *Proceedings*. ... Leningrad .gostoptechizdat.
- SMECHOV, E.M. 1965. Advances in fracture oil and gas reservoirs developments. In: *VNIGRI* . 242. Leningrad, 1965. *Proceedings*.... Leningrad. Hedra.
- SMITH, J.E. 1951 The creataceous limestone producing areas of the Mara and Maracaibo districts - Venezuela. In: WORLD PET. CONGR. 3. *Proceedings*... Sect. I, p. 56-71.
- SNOW, D.T. 1965. A parallel plate model of fractured permeable media. Berkeley. (Ph.D - thesis). Univ. of California, Berkeley.
- SNOW, D.T. 1968. Rock frature spacing, openings and porosities. *J. Soil Mech. Found. Div., Proc. Am. Soc. Civ. Eng.* **94**(1): 73-91.
- SNOW, D.T. 1969. Anisotropic permeability of fractured media. *Water Resour. Res.* **5**(6): 1273.
- SNOW, D.T. 1972. Fundamentals and in situ determination of permeability. In: SIMPOSIUM ON. PERCOLATION THROUGH FISSURED ROCK. Stuttgart, 1972. *Proc.* ... Stuttgart, Int. Soc. Rock Mech., G1. p. 1-6.
- STRELTSOVA-ADAMS, T.D. 1978. Well hidraulics in heterogeneous aquifer formations. In: CHOW, V.T. ed. *Advances in Hydroscience* 11. New York, Academic Press. p. 357-423.
- STRELTSOVA, T.D. 1988. *Well Testing in Heterogeneous Formations*. New York. John Wiley. 413p.
- THEIS, C.V. 1935. The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage. *Trans. Am. Geophys. Union*. v. 16, p. 239-240.
- THOMAS, H.E. 1952 Ground water regions of the United States - their storage facilities. Ins. and Ins. Affair Comm., U.S. Congress, 1952.
- TSANG, Y.W.; TSANG, C.F.; NERETNIEKS, I.; MORENO, L. 1989. Flow and tracer transport in fractured media: A variable aperture channel model and its properties. *Water Ressor. Res.* **23**(12):2049-2060.
- TURCOTTE, D.L. 1992. *Fractals and chaos in geology and geophysics*. Cambridge University Press. 221p.
- VARENICHEVA, N.J.; SHCHERBA, V.A.; KAN, E.K. 1973. Karst and fracture types of reservoirs in the Orenburg gas condensate fields. *Pet. Geol. (URSS)* **11**(2): 90-94.
- WARREN, J.E. & ROOT, P. J. 1963. The behavior of naturally fractured reservoirs. *J. Soc. Pet. Eng.* **9**, 245-255.
- WILSON, C.R. 1970. An investigation of laminar flow in fractured porous rock. Berkeley. (PhD - thesis). Univ. of California.
- WILSON, C.R. & WITHERSPOON, P.A. 1970. An investigation of laminar flow in fractured porous rocks. Pub. 70-6, Dep. Civ. Eng. Univ. California, Berkeley.

APÊNDICE A

FLUXO PARA UM POÇO EM MEIO FRATURADO DEDUÇÃO DAS EQUAÇÕES DE CÁLCULO DOS PARÂMETROS B, C, n

A clássica equação

$$s_w = BQ + CQ^n \quad (\text{A.1})$$

para o rebaixamento em um poço bombeado com vazão constante Q , foi estabelecida por Rorabaugh (1953) como uma generalização da fórmula mais simples

$$s_w = BQ + CQ^2 \quad (\text{A.2})$$

desenvolvida por Jacob (1947) para o rebaixamento total produzido em um poço bombeado em um aquífero confinado.

Quanto aos termos que aparecem no segundo membro dessas equações, o primeiro (linear), corresponde às perdas devidas ao fluxo laminar e o segundo (não linear) representa as perdas causadas pelo fluxo não laminar. E ainda:

Q = vazão constante, bombeada no poço [L^3/T]

B = um coeficiente do aquífero [T/L^2]

C = um coeficiente de perda de carga singular de dimensão [T^2/L^5] na equação (A.2) e de dimensão [T^n/L^{3n-1}] na equação (A.1)

Segundo Jacob (1947) a perda de carga singular seria proporcional ao quadrado da vazão do poço. Rorabaugh (1953), não tendo conseguido efetuar, com a fórmula de Jacob (op. cit.) ajustes satisfatórios a dados de testes de bombeamento em três etapas, concluiu que o expoente da vazão no termo de perda singular poderia ser diferente de 2 e neste sentido cita vários exemplos, chegando a sugerir como típicos, valores mais próximos de 2,5. A validade do método de Rorabaugh (1953) foi confirmada por Lennox (1966) e Norris (1976) que também obtiveram valores de n maiores do que 2 em poços completados em aquíferos sedimentares e também em poços perfurados em aquíferos nos quais uma parte da vazão do poço foi considerada oriunda de fraturas.

Atkinson et al. (1994) aplicaram a equação (A.2) para o fluxo em meio fraturado e comprovaram a validade da mesma obtendo respostas similares às observadas em testes de bombeamento em 3 etapas, em campo e em modelo de laboratório para uma única fratura, concluindo que o valor de n oscila tipicamente entre 2 e 3. Na verdade o que fizeram esses autores foi um ajuste, a dados experimentais de campo e de laboratório, de expressões polinomiais na forma da equação (A.2), usando um programa de regressão não linear denominado FASTEP (Labadie e Helweg, 1975) que em essência, é uma versão computadorizada do método de Rorabaugh (1953).

As considerações anteriores nos levam a admitir também aqui, a validade do modelo de Rorabaugh (1953) para descrever o fluxo em meio fraturado em testes de 3 etapas. Na prática, e principalmente em aquíferos fissurados, é muito difícil realizar testes de bombeamento com vazão constante, como exige a teoria e por este motivo, para aplicar com sucesso o modelo de Rorabaugh (1953) é preciso primeiro determinar o regime de fluxo integral uniforme do poço a partir da vazão fractal. Ou seja, calculando Q através da equação:

$$Q = C_p h_c \quad (\text{A.3})$$

com

$$C_p = \frac{Q^*}{h_c^D} \quad (\text{A.4})$$

Na equação (A.1) os coeficientes B e C da equação (1) assumem valores diferentes com o tempo. Para investigar o comportamento dessas constantes com o tempo a equação (A.2) deve ser escrita:

$$s_w(t) = B(t)Q + C(t)Q^n \quad (\text{A.5})$$

Para determinar o parâmetro n e os coeficientes B_i e C_i suporemos inicialmente a necessidade de três etapas de teste com vazões diferentes, em cada uma das quais deduziremos usando a equação (A.3) vazões integrais constantes $Q_1 < Q_2 < Q_3$. Isso nos leva a escrever a equação (A.3), para cada uma das etapas de bombeamento, excluindo os argumentos das variáveis com o tempo, por questões de simplificação, sob a forma do seguinte sistema:

$$\begin{aligned} s_{w1} &= BQ_1 + CQ_1^n \\ s_{w2} &= BQ_2 + CQ_2^n \\ s_{w3} &= BQ_3 + CQ_3^n \end{aligned} \quad (\text{A.6})$$

Para eliminar B do sistema (A.6) trabalhamos com os rebaixamentos específicos de cada etapa de teste e obtemos o sistema (A.7)

$$\begin{aligned} \frac{s_{w1}}{Q_1} &= B + CQ_1^{n-1} \\ \frac{s_{w2}}{Q_2} &= B + CQ_2^{n-1} \\ \frac{s_{w3}}{Q_3} &= B + CQ_3^{n-1} \end{aligned} \quad (\text{A.7})$$

Por hipótese devemos ter $Q_1 < Q_2 < Q_3$

No sistema (A.7) subtraindo a segunda da primeira equação, a terceira da segunda e a terceira da primeira, obtemos o sistema (A.6) no qual não mais aparece o parâmetro B .

$$\begin{aligned} \frac{s_{w2}}{Q_2} - \frac{s_{w1}}{Q_1} &= CQ_2^{n-1} - CQ_1^{n-1} \\ \frac{s_{w3}}{Q_3} - \frac{s_{w2}}{Q_2} &= CQ_3^{n-1} - CQ_2^{n-1} \\ \frac{s_{w3}}{Q_3} - \frac{s_{w1}}{Q_1} &= CQ_3^{n-1} - CQ_1^{n-1} \end{aligned} \quad (\text{A.8})$$

Para eliminar o coeficiente C , dividimos no sistema (A.8) a diferença entre a terceira e a primeira equações, pela diferença entre a terceira e a segunda equações, o que conduz à equação (A.9) na qual a única incognita é o expoente n .

$$M = \frac{\left(\frac{s_{w3}}{Q_3} - \frac{s_{w1}}{Q_1}\right) - \left(\frac{s_{w2}}{Q_2} - \frac{s_{w1}}{Q_1}\right)}{\left(\frac{s_{w3}}{Q_3} - \frac{s_{w1}}{Q_1}\right) - \left(\frac{s_{w3}}{Q_3} - \frac{s_{w2}}{Q_2}\right)} = \frac{Q_3^{n-1} - Q_2^{n-1}}{Q_2^{n-1} - Q_1^{n-1}} \quad (\text{A.9})$$

Ou seja

$$MQ_2^{n-1} - MQ_1^{n-1} = Q_3^{n-1} - Q_2^{n-1}$$

$$(M+1)Q_2^{n-1} - MQ_1^{n-1} - Q_3^{n-1} = 0 \quad (\text{A.10})$$

Dividindo (A.10) por Q_1^{n-1} , obtemos a equação (A.11)

$$(M+1)\left(\frac{Q_2}{Q_1}\right)^{n-1} - M - \left(\frac{Q_3}{Q_1}\right)^{n-1} = 0 \quad (\text{A.11})$$

Por hipótese $\frac{Q_3}{Q_1} > \frac{Q_2}{Q_1}$

Assim, podemos fazer

$$\frac{Q_3}{Q_1} = \left(\frac{Q_2}{Q_1}\right)^K \quad \text{onde } K > 1 \quad (\text{A.12})$$

E disso resulta $\log\left(\frac{Q_3}{Q_1}\right) = K \log\left(\frac{Q_2}{Q_1}\right)$

O valor do parâmetro K fica determinado pela equação (A.13)

$$K = \frac{\log\left(\frac{Q_3}{Q_1}\right)}{\log\left(\frac{Q_2}{Q_1}\right)} \quad (\text{A.13})$$

Fazendo a substituição proposta na forma da equação (A.12), em (A.11), obtemos

$$(M+1)\left(\frac{Q_2}{Q_1}\right)^{n-1} - M - \left[\left(\frac{Q_2}{Q_1}\right)^{n-1}\right]^K = 0 \quad (\text{A.14})$$

Fazendo, em (A.14)

$$\left(\frac{Q_2}{Q_1}\right)^{n-1} = Z \quad (\text{A.15})$$

chegamos à equação (A.16) cuja solução fornece por iteração o parâmetro Z , com o qual determinamos facilmente o expoente n usando a equação (A.17)

$$Z^K - (M+1)Z + M = 0 \quad (\text{A.16})$$

Da equação (A.13), usando logaritmos, obtemos

$$\log Z = (n-1) \log \left(\frac{Q_2}{Q_1} \right)$$

e finalmente calculamos n usando:

$$n = \frac{\log Z}{\log \frac{Q_2}{Q_1}} + 1 \quad (\text{A.17})$$

O coeficiente C é obtido somando membro a membro as equações do sistema (A.8), o que conduz à equação (A.18)

$$\frac{\left(\frac{S_{w2}}{Q_2} - \frac{S_{w1}}{Q_1}\right) + \left(\frac{S_{w3}}{Q_3} - \frac{S_{w2}}{Q_2}\right) + \left(\frac{S_{w3}}{Q_3} - \frac{S_{w1}}{Q_1}\right)}{(Q_2^{n-1} - Q_1^{n-1}) + (Q_3^{n-1} - Q_2^{n-1}) + (Q_3^{n-1} - Q_1^{n-1})} = C \quad (\text{A.18})$$

O coeficiente B é obtido somando membro a membro as equações do sistema (A.7), o que leva à equação (A.19)

$$B = \frac{1}{3} \left[\frac{S_{w1}}{Q_1} + \frac{S_{w2}}{Q_2} + \frac{S_{w3}}{Q_3} - C(Q_1^{n-1} + Q_2^{n-1} + Q_3^{n-1}) \right] \quad (\text{A.19})$$