

CONTRIBUIÇÃO AO CONHECIMENTO DO SISTEMA CRISTALINO DO ESTADO DA PARAÍBA COMO MEIO AQUÍFERO

POR

José do Patrocínio Tomaz Albuquerque<sup>1</sup>

RESUMO -- O sistema cristalino é um meio fraturado, do tipo livre, de dimensões limitadas às zonas fendilhadas, heterogêneo, anisotrópico, onde existe recarga mas não existe circulação e descarga na zona de saturação, a qual é definida por uma superfície piezométrica virtual, onde as cargas hidráulicas devem ser as mesmas, isto é, iguais. O potencial deste sistema é nulo, residindo a sua oferta na captação das reservas acumuladas no seio das fraturas à profundidades via de regra superiores a dos talvegues da rede de drenagem superficial. A produção dos poços, estritamente dependente da intercepção de fraturas produtoras, é determinada por testes que, geralmente, não leva em consideração as condições determinantes da vazão, ou seja, duração do teste, rebaixamento, posição do nível dinâmico, etc., já que tal determinação ainda não encontra guarida na hidráulica de poços de meios porosos ou fraturados contidos em meios porosos. Uma proposta de cálculo desta produção é apresentada.

INTRODUÇÃO

Os recursos hídricos superficiais de uma região ou bacia hidrográfica são, por suas características naturais de ocorrência e circulação, os mais acessíveis à captação e ao manejo. Ocorre que tais recursos, no domínio do semi-árido paraibano, que constitui 95% da área do Estado, são escassos. Isto, devido à sua grande vulnerabilidade aos rigores do clima, traduzidos por uma evapotranspiração potencial muito superior à pluviometria, extremamente irregular em termos de distribuição espaço-temporal.

Como consequência direta deste fato, os recursos de água subterrânea estão sendo cada vez mais explorados. Só na década de 70 (setenta) cerca de 2.000 poços tubulares foram abertos no semi-árido paraibano, 90% deles, no mínimo, no Sistema Cristalino.

Este sistema constitui um meio do tipo fraturado que, a despeito do grande número de poços perfurados, continua tendo um grau de conhecimento, ainda incipiente, seja em termos estritamente hidrogeológicos, seja de comportamento hidráulico. Poucos são os pontos consensuais e muitas as controvérsias, resultantes justamente do reduzido domínio sobre a natureza, condições de jazimento e circulação (natural e forçada), etc., do sistema cristalino, o que se reflete na aleatoriedade de locação e resultados de produção de poços.

Desta forma, a caracterização quantitativa e qualitativa deste sistema, passa, inevitavelmente, por uma discussão das proposituras até agora formuladas sobre tais matérias para, à luz dos conhecimen

<sup>1</sup> Professor de Hidrogeologia da Universidade Federal da Paraíba, Campus de Campina Grande, PB.

tos e informações adquiridas em todos estes anos, estabelecer pontos consensuais e reformular ou formular proposições. Neste sentido, este trabalho pretende dar uma pequena contribuição a um melhor conhecimento do sistema cristalino como meio aquífero.

#### CARACTERIZAÇÃO QUANTITATIVA DO SISTEMA AQUÍFERO

Foi realizada com base na bibliografia revisada, nas informações complementares constantes dos quadros de poços selecionados e nas observações por nós colhidas em campo.

Esta caracterização é feita, do ponto de vista quantitativo, à luz dos conceitos e definições lançados pelo Plano de Aproveitamento Integrado dos Recursos Hídricos do Nordeste Fase I.

#### Sistema cristalino

A caracterização quantitativa deste sistema envolve, antes, a compreensão da natureza do meio aquífero no que concerne as condições geológicas que originam e determinam a existência desse meio. Assim, a avaliação começa com uma ampla discussão das proposições até aqui formuladas sobre estes aspectos de origem, dimensões, ocorrência, para, apoiado nas novas informações disponíveis, basicamente, o quadro de poços selecionados e algumas evidências colhidas em campo, passar a analisar os atributos quantitativos do meio, ou seja, potencial, reservas e disponibilidades, na medida em que for possível.

Natureza e tipos de fraturas -- É parte consensual que as fraturas podem se constituir em reservatórios subterrâneos, independentemente dos corpos rochosos que as contenham serem permeáveis ou não. Todos os autores avaliam esta condição para que o cristalino, naturalmente impermeável e não alterado, constitua reservatórios. Isto é ponto pacífico no caso do Nordeste. Mas, desde os trabalhos de Siqueira, Costa e outros hidrogeológicos egressos da SUDENE, um problema persiste: a relação entre fraturas e a produção.

Siqueira (26) e Costa (15), (16) e (17) subordinam aos tipos de fraturas transversais, longitudinais e angulares a obtenção de vazões decrescentes na ordem desta classificação, no caso de apresentarem as mesmas dimensões superficiais. Para um mesmo tipo de fratura, a de maior dimensão daria maior vazão.

Uma outra regra seguida é a rede de drenagem, quanto maior a rede de drenagem à montante da fratura, maior a recarga, maior a vazão dos poços. Aliás, segundo Siqueira (op. cit.), a drenagem já é o elemento preponderantemente indicador de fendilhamento, o que é uma regra praticamente aceita por todos aqueles que trabalham em perfuração de poços no cristalino. Somente Cederstron e Assad (13) se opõem a esta idéia, mas sem maiores argumentos a não ser aquele de que outros acidentes geológicos (lineação, xistosidade) também marcam os cursos de rios e riachos. Isto, igualmente, é verdade, mas não exclui a outra regra e é justamente por isso que é necessário um levantamento geológico para identificação de fraturas a partir de foto-interpretação e estudo de campo do local das fendas. Ademais, Larsson (22) também reconhece a importância da drenagem no estudo para identificação de fraturas.

Ainda em relação a produtividade de poços construídos em fendas, todos os autores concordam que o tipo de rocha influi na produção de poços na medida em que reagem diversamente à tectônica rutural. Assim, granitos e migmatitos devem produzir menos que gnaisses que devem produzir mais que xistos e filitos. Mas também esta não é uma verdade retilínea, direta, porque o fraturamento depende de vários fatores: intensidade, direção, sentido e ângulo de incidência dos esforços, profundidade em que eles atuaram e muitos outros. Ebert (19), por sinal, reconhece esta relação indiretamente quando diz que as rochas Arqueanas são menos fraturadas que as Algonquianas. As arqueanas, mais antigas, via de regra, são migmatitos, chornoquitos e outros tipos de rochas de alto grau de metamorfismo. Por isso, formam maciços pouco fraturados, em razão da sua alta competência aos esforços raturais.

Outro fato analisado por diversos autores é a coesão intergranular das rochas: rochas finas são mais coesas que as rochas de granulção grosseira. Por esta razão, estas últimas tendem a se fraturarem mais que as primeiras.

Os registros de perfuração de poços executados pelo CONESP e pela CDRM no cristalino, também não lançam muita luz sobre o problema: não há ligação entre o número de entradas d'água interceptadas e as suas aberturas com a produção de poço. Realmente, poços com só uma interceptação de fratura produzem mais que poços com duas ou três, ou quatro entradas d'água e poços com entradas mais abertas produzem menos água que outros com aberturas menores.

Com respeito à relação fratura/tipo de rocha, os dados constantes do quadro de poços selecionados deixam transparecer o óbvio: a densidade de fraturamento (número total de fraturas interceptadas por número total de poços por tipo de rochas) decresce na seguinte ordem: gnaisses, granitos, migmatitos, micaxistos, filitos e quartzitos, conforme a Tabela 1. O que parece contrastante é a posição dos quartzitos em relação a todas as rochas. Todavia, o número de poços é pequeno para que o fato se torne relevante. De qualquer forma, a produção dos quartzitos restringe-se à presença de fraturas e o seu grau de ocorrência depende de muitos fatores.

Um outro fato facilmente constatável é que o maior número de entradas d'água (E) ocorre, para qualquer tipo de rocha, no intervalo  $10 < E < 20$ . Apenas os granitos têm uma percentagem de entradas d'água relativamente alta no intervalo  $40 < E < 50$  e os xistos, no intervalo  $0 < E < 10$ , fugindo um pouco à regra geral, mas revelando uma lógica surpreendente: os granitos quando chegam a se fraturar é porque os esforços são enormes e, portanto, as fraturas podem ser mais profundas embora menos densas; os xistos, por sua plasticidade, apresentam maior densidade de fraturamento a menores profundidades, quando se apresentam mais consolidados.

Esta relação densidade de fraturamento/tipo de rocha, contudo não é obedecida em termos de produção dos poços, avaliada em função da vazão específica, conforme se pode verificar no quadro da Tabela 1. Isto revela a influência de outras variáveis na capacidade de armazenamento e, por extensão, de produção de poços do cristalino.

Queremos frisar que os dados de vazão específica analisados não incluem as rochas alteradas quimicamente, nem as que estão atapeta

"Tabela 1. Frequência de Profundidade de Entrada d'Água (E), Densidade de Fraturamento e Vazão Específica (média e desvio padrão) por tipo de rocha".

| Tipos de Rochas                      | Gnaisses          |        | Migmatitos |        | Granitóides |        | Mícaxistos |        | Filitos    |        | Quartzitos |        |  |
|--------------------------------------|-------------------|--------|------------|--------|-------------|--------|------------|--------|------------|--------|------------|--------|--|
|                                      | Frequência        |        | Frequência |        | Frequência  |        | Frequência |        | Frequência |        | Frequência |        |  |
|                                      | Nº                | %      | Nº         | %      | Nº          | %      | Nº         | %      | Nº         | %      | Nº         | %      |  |
| 0 < E < 10                           | 19                | 10,49  | 5          | 8,33   | 2           | 5,00   | 6          | 16,22  | 2          | 7,69   | 0          | 0      |  |
| 10 < E < 20                          | 85                | 45,68  | 24         | 40,00  | 14          | 35,00  | 17         | 45,95  | 9          | 34,62  | 5          | 45,45  |  |
| 20 < E < 30                          | 37                | 19,75  | 17         | 28,33  | 9           | 22,50  | 4          | 10,81  | 7          | 26,92  | 6          | 54,55  |  |
| 30 < E < 40                          | 25                | 13,58  | 10         | 16,67  | 5           | 12,50  | 7          | 18,82  | 6          | 23,08  | 0          | 0      |  |
| 40 < E < 50                          | 16                | 8,64   | 4          | 0,67   | 9           | 22,50  | 2          | 5,41   | 2          | 7,69   | 0          | 0      |  |
| 50 < E < 60                          | 3                 | 1,85   | 0          | 0      | 1           | 2,50   | 1          | 2,70   | 0          | 0      | 0          | 0      |  |
| E < 60                               | 0                 | 0      | 0          | 0      | 0           | 0      | 0          | 0      | 0          | 0      | 0          | 0      |  |
| T O T A L                            | 185               | 100,00 | 60         | 100,00 | 40          | 100,00 | 37         | 100,00 | 26         | 100,00 | 11         | 100,00 |  |
| Nº de Poços                          | 110               |        | 43         |        | 27          |        | 29         |        | 22         |        | 10         |        |  |
| Densidade de Fraturamento            | 1,68              |        | 1,40       |        | 1,48        |        | 1,28       |        | 1,18       |        | 1,10       |        |  |
| Vazão Específ. (m <sup>3</sup> /h/m) | Média (x)         | 0,389  |            | 0,118  |             | 0,132  |            | 0,235  |            | 0,350  |            | 0,200  |  |
|                                      | desvio padrão (S) | 0,519  |            | 0,199  |             | 0,197  |            | 0,389  |            | 0,450  |            | 0,217  |  |

das por um pacote de aluviões espesso, da ordem de 8m ou mais, pois é visível a influência de tais coberturas na vazão dos poços. A sua inclusão exarcebaria a vazão específica média dos xistos (que frequentemente capeiam) para 0,730 m<sup>3</sup>/h/m com desvio padrão (s) de 1,734, o que seria um tremendo contrasenso. Todavia, tais poços são

considerados na avaliação das disponibilidades do cristalino por poço, o que eleva a média para 0,400 m<sup>3</sup>/h/m (desvio padrão de s = 0,942) para os 265 (duzentos e sessenta e cinco) poços constantes do quadro de poços selecionados do Sistema Cristalino.

Mas todos estes fatores que influenciam no fraturamento não esclarecem, isolada ou, mesmo, conjuntamente, a relação fraturamento x vazão. Algo, ainda não analisado, precisa ser feito.

A interconexão de fraturas em maior ou menor densidade é um fator que, segundo Larsson (22), pode ser transcendental na produtividade de poços.

Em relação à hidrogeologia de terrenos cristalinos, em seus aspectos mais ligados ao conhecimento do próprio meio aquífero, isto é, natureza, origem das fraturas, condições de armazenamento, etc., é de bom alvitre verificar o que existe sobre o assunto em outros países, além das informações que já são de conhecimento dos técnicos nacionais através da bibliografia já consagrada internacionalmente. Neste sentido, o evento que reuniu mais recentemente os profissionais ligados a água subterrânea dos meios fraturados, para discussão dos mais diversos assuntos, foi o Seminário Internacional "Água Subterrânea em Rochas Cristalinas" realizado cumulativamente na Suécia e na Itália no período entre 22 de setembro e 7 de outubro de 1977, patrocinado pelo Department of Land Improvement and Drainage - Royal Institute of Technology, Estocolmo - Suécia, e pela Faculty of Engineering - University of Cagliari, Sardenha - Itália.

Deste Seminário, há a destacar o trabalho de Ingemar Larsson "Ground Water in Hard Rocks". Neste trabalho Larsson discorre sobre a origem das fraturas analisando a capacidade que cada tipo tem, potencialmente, de armazenar água. Assim, Larsson afirma que a quantidade d'água armazenada numa fratura depende do tipo e de sua origem. Apresenta uma classificação extensa e bastante detalhada das fraturas que é, resumidamente, a seguinte:

1. Fraturas tectônicas desenvolvidas no estado plástico ou semi-plástico (ligadas a processos orogênicos) a da rocha:
  - 1.1. juntas de tensão,
  - 1.2. juntas de cisalhamento,
  - 1.3. juntas do tipo S tectônico,
  - 1.4. juntas do tipo B tectônico,
  - 1.5. juntas ligadas a domos e batólitos de rochas graníticas,
    - 1.5.1. concordantes com a estrutura circular dos granitos,
    - 1.5.2. discordantes em relação a estrutura granítica.
2. Fraturas de cisalhamento uniplanares:
  - 2.1. fraturas de cisalhamento conjugadas,
  - 2.2. fraturas de arrasto,
  - 2.3. fraturas normais,
  - 2.4. fraturas de rejeito direcional,
  - 2.5. fraturas de tensão.
3. Fraturas não tectônicas.

A Figura 1, traduzindo experiências uniaxiais ou tri-axiais de laboratório explicam a origem da maioria dos tipos de fratura à luz da mecânica das rochas, conforme está explanada por Larsson (op. cit.).

As fraturas tectônicas têm como agente as forças resultantes de pressões compressivas, enquanto que em relação às fraturas não tectônicas há controvérsias sobre os agentes. Alguns acham que somente a contração termal seria responsável pelo fraturamento de rochas já consolidadas e expostas ao intemperismo. Entre estes Wolter (1969), in Larsson (op. cit.), para quem uma variação de 100°C produz mais esforços do que a erosão de 10.000 m de rochas a ela expostas por alívio de pressão, este o outro agente das fraturas chama das não tectônicas.

As características dimensionais destes tipos de fraturas estão ligadas à sua origem. Um reconhecimento desta origem significa um reconhecimento qualitativo das dimensões e da disposição superficial e volumétrica das fraturas. Segundo Larsson (op. cit.), tanto as juntas de tensão como as de cisalhamento usualmente não são interconectadas, apresentando dimensões reduzidas, sendo que a largura não passa de 10-15 m. Nas suas extremidades elas são fechadas, porém abertas na parte média (grifo nosso), sendo transversais à lineação das rochas.

Os tipos de juntas S e B tectônicas apresentam-se planares, sendo a primeira controlada pelos elementos fabris granulares da rocha e, a segunda, pelo eixo de dobramento. Em consequência, as primeiras são paralelas ou estão contidas nos planos de deformação da rocha, enquanto que as segundas são perpendiculares aos planos axiais. Segundo Larsson (op. cit.), estes últimos tipos de juntas têm especial qualidade como zonas aquíferas, se forem do tipo ac<sup>2</sup> (compressão lateral) em razão de serem abertas, profundas, compridas e livres de movimentos cisalhantes (ver Figura 2); se forem do tipo ac<sup>1</sup> (Figura 2) têm pobre capacidade de armazenamento, em razão de serem juntas de padrão local, de fraca interconexão e natureza cisalhante. Os tipos S tectonitos não têm capacidade nenhuma de armazenamento, por serem os próprios planos de deformação da rocha resultantes de esforços compressivos.

Segundo Larsson (op. cit.), as juntas ligadas a domos e batólitos graníticos são pouco conhecidas, hidrogeologicamente.

Já as fraturas de cisalhamento uniplanares ou conjugadas segundo o mesmo autor têm pobre capacidade de armazenamento, juntamente com as fraturas de rejeito direcional, principalmente quando acompanhadas da formação de brechas e milonitos.

As fraturas de arrasto, contrariamente às anteriores têm, segundo Larsson (op. cit.), "alta capacidade de armazenamento, não somente por razões tectônicas mas porque sua posição usualmente inclinada favorece a infiltração da água superficial".

Em relação às fraturas de tensão elas, segundo Larsson, constituem igualmente, grandes reservatórios de água subterrânea por serem fraturas de dimensões consideráveis, persistentemente longas, cruzando diferentes tipos de rochas e dobras, independentemente de estruturas prévias. São fraturas muito retas e abertas, com bom grau de interconexão e que ou são preenchidas por diques, ou servem de drenos para águas superficiais (o grifo é nosso).

Finalmente, as fraturas não tectônicas não foram analisadas por Larsson do ponto de vista hidrogeológico neste seu trabalho em

apreço.

A identificação destes tipos de juntas e fraturas, reconhece Larsson, nem sempre é fácil, em razão das rochas cristalinas terem sofrido várias gerações de pressões, causando distorções ou variações no padrão primordial que, no entanto, muitas vezes, comanda a deformação ratural posterior. É a rede de fraturas de origens diversas. Apesar disso, investigações geológicas regionais e locais podem permitir a sua identificação e a sua disposição superficial. Larsson (op. cit.), idealizou um modelo de estudo do sistema de fendas baseado no aparecimento de diques preenchendo fraturas de ten são os quais são admitidos como guias de vales encaixados em fraturas deste tipo, os quais se apresentam paralelos a estes mesmos diques.

Evidentemente que a ocorrência de um sistema de fraturas aumenta a capacidade potencial de armazenamento de águas subterrâneas no cristalino. Se a interconexão entre as fraturas de um sistema é boa, diz Larsson (op. cit.), a rocha cristalina pode ser vista quase como um meio poroso. Neste caso, a fratura maior deve funcionar como dreno das fraturas imediatamente menores e assim sucessivamente. Larsson destaca que as dimensões superficiais das fraturas estão ligadas às dimensões de cada rede de drenagem afirmando que "a drenagem é a área natural para o estudo dos terrenos cristalinos por técnicos especializados".

Neste sentido, acreditamos, a interpretação de fotografias e de imagens de satélite sucedidas de levantamento geológico detalhado de campo ainda é o caminho a ser seguido para a identificação de fraturas e determinação do grau de conexão, por ser o mais acessível em razão das características físicas favoráveis do Nordeste.

Larsson sugere, para identificação desta conexão, o emprego de métodos de prospecção geofísica que, para o Nordeste, pode ser anti-econômico e pouco eficiente, dado a freqüente inalterabilidade das paredes rochosas da fenda, conforme, inclusive, foi testado pelo professor H.D. Schuster (comunicação oral), na locação do poço na Mina-Escola do DMG da UFPB.

Outro caminho de relevante importância na identificação do grau de interconexão de fraturas e, conseqüentemente, na estimativa da produtividade potencial de poços é a identificação do seu tipo e origem. Este caminho na realidade foi trilhado pioneiramente por Siqueira (1963: 51), Costa (1953: 23) e (1965: 24) in *Água Subterrânea* (1965: 52) e, na prática, por quase todos os hidrogeólogos da SUDENE, mas de forma parcial, incompleta. A classificação de fraturas em transversal, angular, longitudinal, etc., conforme elas se situam em relação à direção da estratificação ou da xistosidade ou da li neação de rocha é, indiretamente, uma referência ao seu tipo e origem. Mas, hoje, com os conhecimentos que se tem sobre a origem de fraturas e a sua análise à luz da mecânica das rochas é possível identificar mais detalhadamente os tipos de acordo com o que propõe Larsson. Porque a experiência comprova: nem toda fenda transversal tem a mesma origem. Algumas são de tensão, outras são de cisalhamento (esta a explicação de Siqueira para todas elas), outras são desenvolvidas no estado plástico, outras, no estado consolidado da rocha, outras são de origem tectônica e outras são de origem atectônica. Isto pode explicar as surpresas boas e más obtidas em perfura

ções.

Talvez, aí esteja o caminho a ser trilhado para determinação da relação fratura x vazão, pelo menos em termos de certos intervalos de confiança, desde que associem-se as características geológicas às dimensionais do sistema.

Os parâmetros fundamentais -- Porosidade, porosidade eficaz ou coeficiente de armazenamento, transmissibilidade são também os parâmetros fundamentais necessários ao cálculo dos volumes armazenado e escoado. Só que, no caso do cristalino, dependem, fundamentalmente, das características do fraturamento, ou seja, das suas dimensões como reconhece Rebouças (24), Siqueira (op. cit.) e outros autores, e do grau de abertura e conexão destas fraturas. Se se pode determinar estes parâmetros em poços captando um fraturamento, tais parâmetros referem-se, não a uma fenda isolada com suas características dimensionais, mas ao conjunto de fendas que constitui a zona fraturada, por menor que seja o volume deste corpo.

Siqueira (op. cit.) credita aos quartzitos e meta-arcósios uma certa porosidade, não diferenciando a mesma da porosidade eficaz. A porosidade total não é tão importante em água subterrânea. O que vale é a interligação entre os poros e isto parece não existir no cristalino da Paraíba e do Nordeste. Tanto assim que a produção dos poços até aqui perfurados depende, única e exclusivamente, da existência de fraturas, qualquer que seja a sua origem, o seu tipo, excluindo daqui, é claro, o cristalino quimicamente alterado que se comporta hidraulicamente como um meio poroso.

Siqueira (op. cit.) reconhece que a permeabilidade de fraturas é extremamente importante na hidrologia do cristalino mas exagera esta importância ao afirmar que o pré-cambriano do Cariri tem permeabilidade regional. Não tem: a permeabilidade de fraturas é localizada, restringindo-se à área afetada da rocha que fora dela tem permeabilidade praticamente nula. Igual raciocínio vale para a porosidade eficaz.

Carol Braester, professor da Universidade de Trondheim, na Noruega, em seu artigo Theory of Flow Through Fractured Rocks (5), estabeleceu a relação entre a porosidade eficaz e a abertura da fratura, comparando o fluxo através de uma fenda com aquele através de um modelo tipo Hele-Shaw de placas paralelas verticais (ver Figura 3), admitindo ambos serem laminares e regidos pelas seguintes equações:

Fluxo de Darcy

$$V_x = -K \frac{\partial h}{\partial x} = -\frac{k\gamma}{\mu} \frac{\partial h}{\partial x}$$

$$V_z = -K \frac{\partial h}{\partial z} = -\frac{k}{\mu} \frac{\partial h}{\partial z}$$

Por comparação:  $k = \frac{b^2}{12}$  e  $K = k \frac{\gamma}{\mu}$

Fluxo de Hele-Shaw

$$V_x = \frac{b^2}{12} \cdot \frac{\gamma}{\mu} \cdot \frac{\partial h}{\partial x} \quad (1)$$

$$V_z = -\frac{b^2}{12} \cdot \frac{\gamma}{\mu} \cdot \frac{\partial h}{\partial z}$$

A partir daí Braester (op. cit.) admite valores padrões para o peso específico da água ( $\gamma = 1 \text{ g/cm}^3$ ) e para a viscosidade ( $\mu = 1 \text{ cp}$ )

e, considerando uma rocha de  $l$  de permeabilidade intrínseca,  $\phi$  a cula, assim, a condutividade hidráulica (permeabilidade). Mas resalva que o seu propósito é obter uma ordem de grandeza destes parâmetros.

Braester (op. cit.), mostra como utilizar tais parâmetros na avaliação da porosidade eficaz e da condutividade hidráulica, não da fratura, mas do corpo fraturado, constituído de blocos não fraturados separados por fendas conforme o esquema da Figura 4.

A porosidade eficaz do corpo fraturado representado na Figura (4) é dado por:

$$\phi = \frac{V_v}{V_t} = \frac{(L + b)^3 - L^3}{(L + b)^3} = 1 - \frac{L^3}{(L + b)^3} \quad (2)$$

Para um bloco de  $1$  m de comprimento e abertura de fratura =  $1$  mm, obtém-se:

$$\phi = 1 - \frac{1^3}{(1,001)^3} = 1 - 0,997 = 0,003, \text{ ou seja, } 0,3\%$$

Já a condutividade hidráulica do bloco é dada por:

$$K = \frac{k\gamma}{\mu} \quad \text{com} \quad \begin{aligned} \gamma &= 10^{-3} \text{ kg/cm}^3 \\ \mu &= 10^{-2} \cdot \frac{10^{-3}}{981} \text{ kg} \frac{\text{s}}{\text{cm}^2} \end{aligned} \quad (3)$$

Substituindo os valores tem-se:

$$K = \frac{10^{-2} \cdot 10^{-3}}{10^{-2} \cdot \frac{10^{-3}}{981}} = \frac{10^{-5}}{\frac{10^{-5}}{98}} = 981 \text{ cm/s}$$

Isto revelaria uma alta permeabilidade e um baixo coeficiente de armazenamento, coisa que, parece-me, não se coaduna com a situação real, a julgar pelas condições de jazimento e pela produção dos poços obtidos.

De mais a mais, existe uma enorme distância entre as condições analisadas em laboratório e aquelas ocorrentes na natureza, seja em termos de dimensões, inclinação, conexão, etc., seja pela dificuldade de avaliação das aberturas das fraturas.

Características dimensionais -- O cristalino no Estado da Paraíba domina quase que totalmente a sua área semi-árida conforme vimos anteriormente (ver mapa hidrogeológico anexo). Todavia, toda esta área não se constitui em aquíferos. Pelo contrário, regionalmente o cristalino apresenta fraquíssima capacidade de armazenamento e circulação, constituindo-se um verdadeiro aquífugo. Realmente, é o cristalino o embasamento impermeável dos sistemas aquíferos porosos do Rio do Peixe, Serra do Martins e Aluvial. Somente na área de influência de fraturas ele constitui zonas aquíferas. Rebouças (op. cit.) acha que em relação a área total do cristalino do Nordeste,

1/3 se constitui de zonas aquíferas. Siqueira (op. cit.), ao propor a fórmula para cálculo do volume d'água contida numa área fraturada, acredita que o volume que influencia a produção d'água é de 50% do volume total. De nossa parte acreditamos que isto seja muito variável de ponto para ponto, de fratura para fratura, já que o grau de interconexão e as próprias dimensões dos parâmetros definidores do volume (comprimento, largura e profundidade) são função de n variáveis concernentes à rocha, ao tipo de esforço, ao tipo de desenvolvimento, à profundidade de origem, à intensidade do esforço, etc. Desta forma, não achamos que 1/3 da área cristalina do Nordeste e, por inserção, da Paraíba, constitua zonas aquíferas. Muito menos 50%. Basta para isto tomar como parâmetro a rede de drenagem que, como sabemos, não é totalmente encaixada em fraturas. Assim, acreditamos ser melhor falar das características dimensionais de cada zona fraturada, definidas em superfície pelo seu comprimento e sua largura, tendo a drenagem superficial papel importante neste dimensionamento, conforme Siqueira (op. cit.), e o PLIRHINE "trechos retilíneos de rios - uma anomalia - geralmente coincidem com fendas e fissuras", por conseguinte "suas dimensões coincidem com aquelas em superfície, das fraturas e fissuras". O comportamento da largura em profundidade não é conhecido, sendo objeto de controvérsias, de elocubrações. Uns imaginam um corpo tabular, outros, cuneiforme. Larsson (op. cit.) afirma que, no caso das fraturas de tensão desenvolvidas no estado plástico ou semi-plástico da rocha, a abertura é maior na parte central do corpo fendilhado, para ir se fechando para as extremidades, não se referindo no comportamento das fraturas em profundidade.

Em relação a profundidade de ocorrência, o terceiro elemento necessário à quantificação volumétrica do corpo fendilhado, este é também um assunto controverso. Siqueira (op. cit.) relaciona empiricamente "dimensão da profundidade à medida da extensão (comprimento): uma (profundidade) seria 1/20 da outra. Só que o referido autor não esclarece o empirismo utilizado. Até o momento parece correto considerar, como Rebouças (op. cit.) e o PLIRHINE (op. cit.), que a profundidade das fraturas, estimada pela profundidade das entradas d'água, deve se situar em torno dos 50-60 metros, também na Paraíba conforme o quadro da Tabela 1. Esta é uma afirmativa válida para o nível dos conhecimentos atuais, de vez que existe a possibilidade de, raramente, os poços terem interceptados a própria fratura principal objeto da perfuração em si, mas apenas as fraturas acessórias, secundárias.

Comportamento hidráulico -- A recarga -- Não há muita controvérsia em relação à recarga das zonas aquíferas do sistema cristalino: ela se processa normalmente a partir da infiltração de uma taxa das precipitações atmosféricas. O que não se sabe é que taxa é esta. Alguns autores como Taltasse et alii (29) acham que uma taxa de 3% é para condições muito favoráveis. Outros autores como Rebouças (op. cit.) e Albuquerque (1) admitem taxas inferiores a 1%, tomando por base as restituições dos aluviões que, assim, teriam uma porosidade semelhante a das fraturas, na suposição de que seus espaços estariam preenchidos por materiais aluviais/eluviais. Outros, passam ao largo do problema, nada afirmando ou negando. Todos concordam que as condições de recarga normalmente são difíceis. Ebert (19) chega a acreditar que, em muitos casos, a água contida nas fraturas é fósil, o que significa falta de recarga por falta de circulação e, conseqüentemente, alto índice de salinização. Costa (op. cit.) afirma

que apenas os cursos d'água oferecem condições de alimentar as fraturas, sendo esta alimentação tanto maior quanto maior coincidência houver entre as direções de drenagem e das fendas, achando que as fraturas transversais são as mais favoráveis por serem as mais abertas.

Não há como, realmente, ao nível da disponibilidade tecnológica atual, avaliar esta taxa de recarga. Apenas pode-se afirmar que ela se processa com as precipitações, diretamente através da superfície das fraturas nuas (desprovidas de capeamento aluvial/eluvial), conforme podemos constatar através de esvaziamento dos reservatórios de dois açudes cujas barragens construídas transversalmente a fraturas expostas no leito dos riachos respectivos (açude da fazenda Tapera), município de Cabaceiras, PB; e açude da fazenda Olho d'Água Sal Salgado, no município de Queimadas, PB. Estes reservatórios sofreram um rebaixamento rápido, acentuado, logo após sangrarem, praticamente esvaziando-se em menos de 30 dias, sem se constatar qualquer filtração no corpo das barragens, enquanto que outros açudes menores, em terrenos vizinhos, asseguraram o suprimento por meses e meses após as chuvas atravessando o período da estiagem. Por outro lado, acreditamos que tais casos de fraturas tão abertas são raros, já que, na realidade, como a rede hidrográfica tributária, quase toda, acha-se encaixada em fraturas, era de se esperar que isto ocorresse mais freqüentemente, o que não é verdade.

Finalmente, como afirmam diversos autores de trabalhos aqui revisados, acreditamos que uma cobertura aluvial de fendas facilite a recarga das fraturas, já que neste caso a circulação das águas superficiais é mais lenta e, na dependência das dimensões da carga hidráulica conjunta de rios e aquíferos aluviais em relação à capacidade de infiltração das fraturas possa haver a circulação descendente conforme constatou o PLIRHINE, Recursos Hídricos I, Águas Subterrâneas, volume 7, Recife, SUDENE, 1980 (10). Outra não pode ser a explicação para altas vazões específicas, só condizentes com a de meios porosos como os aluviões e manto de intemperismo, encontradas em alguns poços captando fraturas.

Acrescentamos aqui que esta recarga só se processa com as chuvas. Uma vez cessadas, as condições de carga parecem não favorecer mais a alimentação, pois os níveis hidrostáticos imediatamente tendem a uma unificação. Infelizmente, tais dados de recarga resultantes de observações realizadas com linígrafos de poços instalados na região de Monteiro-Sumé e observados entre 1972 e 1974, já não mais existem na SUDENE a quem pertenciam tais dados e onde os procuramos. A circulação e a descarga naturais -- A circulação das águas subterrâneas acumuladas nas zonas fraturadas do sistema cristalino tem sido admitida existir por uns autores e por outros, não. Taltasse et alii (op. cit.) afirmaram taxativamente: "As zonas aquíferas localizadas em fendas são desprovidas de circulação horizontal". Ebert (op. cit.) também concorda com esta afirmação devido ao fato de considerar as fraturas como reservatórios isolados. Mas, ressalva: "se existir alguma circulação esta é episódica, dependente da existência de coberturas aluviais e restritas a poucas semanas de um período normal de chuvas.

Albuquerque (op. cit.) registra no "Inventário" que a circulação existe, apresentando como base da afirmação a variação do nível estático de alguns poços, da ordem de 0,78 m, em média, em poços

não explorados, cujos níveis estáticos foram medidos entre o fim da estação das chuvas e o término da estação das estiagens. Esta variação era acompanhada do aumento dos índices de salinidade.

Rebouças (op. cit.) também admitiu o movimento das águas subterâneas do sistema cristalino escrevendo que este movimento varia muito durante seu caminhar, seguindo o grau de abertura e de continuidade dos pontos, nos sentidos horizontal e vertical.

O Plano de Aproveitamento Integrado (op. cit.), como vimos, retem Albuquerque e Rebouças (op. cit.), no que diz respeito à circulação, que se infere, segundo o trabalho, pelas fontes intermitentes que costumam ocorrer nas encostas de vales e cortes de estradas da região.

O comportamento hidráulico do sistema cristalino em outros países somente pode ser analisado através da obra de Custódio e Llamas (18).

O meio fraturado objeto da avaliação deste comportamento é também um meio permeável. Esta é a condição fundamental: a rocha existente tem uma permeabilidade intersticial que pode ser fraca mas que pode ter, também, uma permeabilidade de vazios normal, de tal forma que a fratura ou a rede de fraturas funciona como um poço natural, um dreno natural em relação a água contida no corpo rochoso permeável que a encaixa. Por isso o movimento natural e a circulação radial para poços seguem as mesmas leis que regem os escoamentos de meios porosos. A partir daí, se o corpo rochoso encaixante tem permeabilidade, mesmo baixa, o escoamento radial merece o tratamento que foi transcrito por Custódio e Llamas (op. cit.).

No caso de rochas absolutamente impermeáveis como as que ocorrem na Paraíba e no Nordeste os autores visualizam a existência de um nível d'água correspondente a cada fratura que, pela reunião, pode fornecer linhas iso-piezométricas, na dependência de uma rede ou malha de fraturas interconectadas contida em meio poroso e ligadas a uma fonte de recarga permanente, conforme ilustra a Figura 5. O nível das águas nas fendas fornece uma superfície piezométrica virtual. Neste caso, também, o movimento seguiria a lei de Darcy, isto é, o escoamento seria laminar, de meio poroso, não obstante as suas heterogeneidade e anisotropia que, somente seria admitido como homogeneo no caso de densamente fraturado (blocos de volume inferior a 1 m<sup>3</sup>).

Todas estas afirmações foram aqui transcritas em função da importância que tem na elucidação da problemática da circulação da água em meios fraturados como o nosso e da análise da aplicabilidade dos axiomas contidos na hidráulica dos escoamentos, natural e radial, dos meios porosos.

Uma análise reflexiva das afirmações contidas neste texto emitidas nos vários trabalhos realizados aqui na Paraíba, no Nordeste e no Brasil, à luz dos conhecimentos que se tem sobre reservatórios fendilhados do sistema cristalino permite afirmar, hoje, que a circulação horizontal no seio de tais meios, não existe, ou se existe, é mínimo e vertical descendente, verificando-se, conforme Ebert (op. cit.), num curto período de tempo, justamente durante algumas semanas do período chuvoso (quando se processa a recarga) pelas razões

seguintes:

- a. trata-se, em geral, de um meio finito, constituindo um reservatório enterrado, que, mesmo quando forma uma rede de fraturas não oferece condições de produção fora da fratura ou da rede, salvo raras e possíveis exceções;
- b. a circulação vertical de Albuquerque (op. cit.) e Rebouças (op. cit.) não é um movimento realizado na zona de saturação, mas uma perda d'água por evapotranspiração (já que há um conseqüente aumento da salinização) procedida através da zona de subsaturação, freqüentemente pouco espessa e pouco profunda, por ação do sol e das plantas;
- c. as fontes citadas no PLIRHINE (op. cit.), hoje sabemos, são fontes de contato entre o manto de intemperismo ou o solo poroso e o cristalino impermeável, assim mesmo, intermitentes;
- d. a condição de permeabilidade, citada por Custódio e Llamas, da rocha que contém a fratura, inexistente na Paraíba e no Nordeste, ficando a obtenção d'água na dependência única e exclusiva de sua existência no interior da própria fratura, resultando seco um poço locado fora de seus limites dimensionais (comprimento, largura e profundidade);
- e. inexistente, igualmente, uma parte de recarga permanente, que assegure uma disposição de cargas diferenciais ao longo da rede de fraturas ou de uma fratura;
- f. as águas do cristalino são, pois, reservas das quais são uma parcela não quantificável e renovável anualmente por recarga direta ou indireta (através dos aluviões ou dos cursos dos rios), sendo a outra, reservas mortas, no sentido de Mandell (1967 : 7), não participando do ciclo hidrológico e, portanto, não tendo movimento;
- g. neste caso, a superfície virtual em cada ponto de uma rede de fraturas, deve ter a mesma carga, o que só pode ser comprovado com pesquisas adicionais que envolvam a identificação de uma rede, a execução de sondagens e o nivelamento topográfico de detalhe das mesmas;
- h. a inclinação e abertura de fraturas, como condicionamento do movimento, Custódio e Llamas (op. cit.), somente tem influência no caso do Nordeste, no escoamento provocado para os poços;
- i. dada às características dimensionais das fraturas isoladas e, mesmo, de uma rede de fraturas (comprimento  $\gg$  largura), devido à sua heterogeneidade e anisotropia, não é possível visualizar "cones" de rebaixamento, devendo se falar, talvez de elipses, ou coisa que o valha, de rebaixamento.

Quanto ao movimento vertical, pelas mesmas razões, também não existe. O que deve existir é um movimento tipicamente capilar dada a proximidade da superfície do terreno (no caso, o leito do curso d'água), logo após a recarga, do nível hidrostático, logo rebaixado pela ação da evapotranspiração.

Como consequência, se não existe movimento, não existe igualmente, descarga natural. Realmente, os "olhos d'água" sempre se encontram nas encostas do manto de intemperismo (elúvios) ou de pedimentos (colúvios) com o embasamento impermeável de natureza cristalina. A hidráulica de poços -- No que diz respeito à bibliografia revisada, que é a disponível nos dias atuais, nada há sobre a hidráulica dos poços, a não ser as formulações expressas por Custódio e Llamas (1976 : 2359) de autores citados na aludida obra.

A análise das formulações propostas revela que as mesmas são inaplicáveis ao sistema cristalino paraibano e nordestino; aqui, as condições são outras.

Todos os axiomas partem do princípio de que a rocha que contém a fratura ou rede de fraturas é permeável ou ligeiramente permeável, seja através de uma rede de fraturas extremamente densa, tridimensional, interconectada, vasta, homogênea, seja porque a rocha encaixante tem porosidade eficaz própria, que são condições dificilmente encontráveis na Paraíba e, de resto, no Nordeste, conforme está claro nos capítulos anteriores.

Para o primeiro caso, há a remota possibilidade de serem aplicadas aos poços nos quartzitos, as formulações de Greengarten e Ramsey e Greengarten et alii, já que estas rochas podem ter alguma porosidade eficaz. Todavia, ao nível dos conhecimentos atuais, tal porosidade inexiste, seja porque a produção d'água nestes poços em termos de vazão específica em nada difere da de outras rochas (consultar o quadro de poços selecionados) do cristalino, seja porque estas rochas não são horizontais, seja porque faltam testes de bombeamento empregando as equações formuladas para este caso, ou mesmo aplicando a equação de Theis com as condições pertinentes aos tipos de aquífero e de captação, expostas por Custódio e Llamas (op. cit.) e transcritas no capítulo da revisão bibliográfica.

Não concordamos com Siqueira (op. cit.) no que diz respeito à porosidade dos quartzitos da região e muito menos dos meta-arsios. Ambos têm feldspato em sua composição alterando para caulim (um tipo de argila) que, portanto, só faz impermeabilizá-las ainda mais.

Para o segundo caso, ou seja, de permeabilidade do corpo da rocha ser resultante de uma densa rede tridimensional de fraturas (blocos menores que 1 m e permeabilidade da encaixante maior que  $10^{-5}$  dia), a aplicabilidade é ainda mais remota. As rochas da Paraíba (e do Nordeste também) não estão tão fraturadas. Tanto é que o número de entradas d'água, que são apófises do fraturamento principal, raramente ultrapassa de quatro em perfuração de 50 m. E, parece, não adianta aprofundar muito um poço além dos 60 m, pois elas, as fraturas adventícias, escasseiam, conforme se pode verificar na Tabela 1. A não ser que se queira atingir o fraturamento principal a grandes profundidades, se esta fratura tem grande inclinação, o que aliás quase nunca é realizado.

O nosso caso, o de fendas e fissuras de extensão limitada, de conexão precária ou sem conexão nenhuma, se constitui num problema de difícil solução, conforme, aliás, Custódio e Llamas, reconhecem para situações similares: "pode suceder que só se possa extrair a água contida nestas fraturas, ficando seca depois, a não ser que receba um débil aporte de recarga superficial se aflora em superfície".

Exatamente isto o que pensamos. Os testes de produção -- Na impraticabilidade de calcular vazões exploráveis de poços a partir de testes de aquífero do sistema fraturado, resta ao profissional que lida com o setor realizar, ao menos, um teste de produção tecnicamente correto que ofereça uma certa confiabilidade da vazão em termos prováveis, práticos.

Os testes utilizados mundialmente são aqueles já aludidos neste trabalho qual seja o ensaio de vazões escalonadas e crescentes correspondentes a etapas contínuas de bombeamento, em número de, pelo menos, três, a fim de se determinar a vazão crítica e, a partir daí, a vazão de exploração. O segundo tipo de teste, por Custódio e Llamas (op. cit.), é aquele baseado na recuperação do nível hidrostático em função da velocidade de subida da água num poço de secção conhecida, calculando-se a vazão do poço pela equação da continuidade de sua fórmula mais simples, aplicadas a condutos livres.

O primeiro destes métodos não é aplicado por nossas firmas de perfuração de poços. Segundo a CDRM (comunicação oral), isto se deve à dificuldade de, com os equipamentos disponíveis, conseguir tal escalonamento.

O segundo destes métodos igualmente jamais foi testado.

Com base nos dados dos testes de bombeamento realizado pela CDRM, na parte de dados de recuperação, procedemos a aplicação deste último método, para poços de vazão superior à média, para poços na média e para poços abaixo da média. O resultado revelou a tremenda discrepância entre os dados de produção calculados pelo método de extrapolação da vazão específica, a ser explanado adiante, e as vazões obtidas pelo método em apreço, em virtude da velocidade de subida ser baixíssima, variando entre 0,01 m/min a 0,200 m/min para diâmetro de 4 1/2", do que resulta vazão baixíssima, de, no máximo, 250 l/h quando os testes revelam vazões de 5.000, 6.000 e 9.000 l/h. Como as dos poços nº 184 - Ligeiro de Baixo, em Serra Branca, nº 176 - Cardoso de Baixo, em São José dos Cordeiros; nº 104 - São Bento, em Patos, nº 27 - Divinópolis, em Cajazeiras; e, nº 24 - Malhada do Meio, em Cabaceiras.

Isto pode significar uma permeabilidade baixa da fratura, apesar da entrada d'água ser mais ou menos livre. Ou pode significar alta perda de carga (neste caso, o escoamento forçado através da bomba será turbulento, razão, talvez, dos rebaixamentos rápidos, violentos) ou pode significar que a vazão resultante da recuperação do nível seja uma fração da descarga bombeada, com esta recuperação voltando a preencher outros condutos do corpo fendilhado captados indiretamente pelo poço. A Figura 6 (anexo) pretende esclarecer estas hipóteses.

A dificuldade de se obter vazões de produção condizentes com a capacidade de produção do sistema foi uma das primeiras preocupações dos hidrogeólogos que trabalharam na SUDENE. De início, introduziu-se o elemento duração do teste como um dos requisitos fundamentais para sua validade, conforme recomendações de especialistas de outras paragens. Neste sentido, o hidrogeólogo procurava um nível dinâmico tal que se tornasse estável após um certo tempo de bombeamento (no caso 24 horas), na suposição de que a vazão explorada correspondia

ã vazão fornecida pela fratura àquele nível. Em outras palavras, a vazão explorada era compensada pelo volume d'água fornecido ao poço pelo corpo fraturado.

A estabilidade, contudo, raramente acontecia. O que ocorria e ocorre é uma tendência à estabilidade que não assegurava a continuidade da exploração. Ou seja, o regime de escoamento para o poço é transitório, não há a interceptação de fontes de recarga permanentes.

De passo em passo, a qualidade do teste melhorou com a introdução da análise, não da vazão, mas da vazão específica. Na medida em que se introduziu a dimensão do rebaixamento no teste isto significou uma relação que, a exemplo do que ocorre nos meios porosos, tem uma representatividade dos parâmetros hidráulicos do meio fraturado.

Assim, os testes são analisados pela construção de curvas vazão específica (Q/s) x tempo (t) de bombeamento em papel semi-logarítmico conforme pode-se constatar na Figura 7. A partir daí calculou-se o diferencial de vazão específica para um ciclo logarítmico, procurando-se este diferencial no ramo mais representativo da curva; extrapolando-se no tempo tal diferencial, obtém-se uma vazão específica projetada que multiplicada pelo rebaixamento máximo admissível, dado pela profundidade da última ou da entrada d'água mais produtora (o teste revela este fato), fornece a vazão máxima de exploração do poço. A vazão de exploração recomendada é, sempre, inferior a esta, situando-se entre 50% e 70%.

Que seja do nosso conhecimento, na Paraíba, somente a CDRM adota este método que é o mais correto, o único que tem algum respaldo técnico-científico, o mais realista. Por isso, as vazões de produção da CDRM são inferiores aos de outros órgãos, que ainda incorrem em erros de omissão e desconhecimento de causa quando colocam o nível dinâmico no fundo do poço, abaixo das entradas d'água, entre outras falhas.

Potencial, reservas e disponibilidades -- A avaliação destes atributos é feita com base nos conceitos e definições do PLIRHINE, já comentados no capítulo da Revisão Bibliográfica.

Assim, o potencial do sistema cristalino é, senão nulo, mínimo, não podendo ser quantificado ao nível dos conhecimentos atuais, o que talvez nem valha à pena. Alguns autores têm confundido o potencial do sistema fraturado com o do sistema aluvial, na suposição de que eles, quando se estratificam, fornecem restituições conjuntamente. Isto, pelos motivos expostos, não é verdade. A carga hidráulica do sistema cristalino sempre é inferior à do sistema aluvial, que por sua vez, só periodicamente tem maior carga que os rios, só então havendo condições de restituição.

As reservas constituem, na realidade, o único contingente hídrico do sistema cristalino. Elas dependem, portanto, das suas características dimensionais e da porosidade eficaz. No estágio atual de conhecimento tais características são inquantificáveis, mesmo as suas dimensões.

Quanto às disponibilidades estas só podem ser analisadas a nível de poço, através de sua capacidade de produção, que, de resto, é um espelho da quantidade d'água disponível no sistema visto como

um todo.

O parâmetro que serve para análise desta disponibilidade é, justamente, a vazão específica. Os 265 (duzentos e sessenta e cinco) poços cujos dados e testes merecem crédito apresentaram uma vazão específica média de  $0,400 \text{ m}^3/\text{h/m}$ , para rebaixamento máximo de 12,60 m, em média, desvio padrão de 0,942 e coeficiente de variação de 2,36, com 15 (quinze) poços (5,66%) dos casos apresentando vazões específicas superiores a  $1 \text{ m}^3/\text{h/m}$  e 8 (oito) poços (3%) com vazões específicas superiores a  $2 \text{ m}^3/\text{h/m}$ . O mínimo verificado foi de  $0,006 \text{ m}^3/\text{h/m}$  em poço aberto na cidade de Teixeira, localizada sobre a serra homônima.

Isto, em relação aos resultados encontrados por Rebouças (op. cit.) representa condições mais alentadoras para o cristalino. Mas, ainda assim, são zonas aquíferas de fraca disponibilidade, quando, estendendo-se um pouco além a análise estatística, verifica-se que dos 265 poços, 207, ou seja, 78,11% apresentam vazão específica inferior à média, 186 ou 72,66% produzem menos que  $0,300 \text{ m}^3/\text{h/m}$  e 149 captações ou 56,23% produzem menos que  $0,200 \text{ m}^3/\text{h/m}$  de rebaixamento.

Por outro lado, apenas 21,89% (58) das perfurações acusam produção individual superior à média, sendo que 45 (16,98%) apresentam vazão específica superior aos  $0,500 \text{ m}^3/\text{h/m}$ , decrescendo para 13,21% (35 poços) quando se considera vazões superiores a  $0,600 \text{ m}^3/\text{h/m}$ .

Destes números fica patente que uns poucos poços de vazão relativamente alta tem participação ponderável na média e no desvio padrão, elevando-os consideravelmente. Tais poços são justamente aqueles que, ou captaram espessuras consideráveis de aluviões, ou potências incomuns do manto de intemperismo, conforme analisado anteriormente.

Com respeito à localização dos poços selecionados relativamente a bacias hidrográficas que são também unidades hidrogeológicas quando se trata do Sistema Cristalino, os resultados são apresentados no quadro abaixo:

| Bacia   |                             | Piranhas | Paraíba | Mamanguape |
|---|-----------------------------|----------|---------|------------|
| Vazão específica<br>( $\text{m}^3/\text{h/m}$ ) | Média ( $\bar{x}$ )         | 0,370    | 0,491   | 0,177      |
|   | Desvio padrão ( $s$ )       | 0,905    | 0,468   | 0,131      |
|   | Coef. de variação ( $C_v$ ) | 2,446    | 0,953   | 0,740      |

Este quadro revela que a vazão específica média de poços perfurados na bacia do rio Paraíba são 30% superiores à média verificada no Piranhas. O que parece significar que o fraturamento naquela bacia está mais preservado, ou é mais aberto e mais interconectado que a do Piranhas.

Em relação à bacia do Mamanguape, o número de poços selecionados, mui reduzido (apenas 7), não deixa grandes margens a reflexões deste tipo.

CONTRIBUIÇÃO AO CONHECIMENTO DO SISTEMA CRISTALINO DO ESTADO DA PARAÍBA COMO MEIO AQUÍFERO

ABSTRACT

The Crystalline System prevails over 95% of the semi-arid region of the Paraíba State. A great number of wells have been drilled in the last twenty years (about 3.000) in this area. However the level of understanding of the system obtained so far remains inadequate. There are considerable discrepancies that remain.

This work discusses the various aspects of the studies already carried out in terms of the nature, dimension, basic parameters and hydraulic behaviour of the fractured natural medium of the system in the light of new data and recent observations. Also presented are methods of evaluation for a better knowledge of the Crystalline System as an aquifer medium in Paraíba and Northeast of Brazil.

#### BIBLIOGRAFIA

- ( 1 ) ALBUQUERQUE, J. do P.T. Inventário Hidrogeológico Básico do Nordeste - Folha nº 15 -, Jaguaribe, SE, SUDENE, Divisão de Documentação, HG-32, Recife, 1970 : 187.
- ( 2 ) ALVES ALBUQUERQUE, G. Relatório de Atuação da CDRM, PB na Perforação de Poços Tubulares no Cristalino. Campina Grande, (circulação interna), 1983 : 7.
- ( 3 ) AZEVEDO, P.V.; VAREJÃO SILVA, M.A.; VARGAS, G.A.O. Zoneamento do Potencial de Energia Solar no Nordeste. UFPB, Coleção Politécnica (série técnica), 2, 1981 : 51.
- ( 4 ) BOA NOVA, F. de P. Águas Termais de Brejo das Freiras. Rev. Mineração e Metalurgia, Rio de Janeiro, Vol. V, nº 28, 1940, pp. 176-177.
- ( 5 ) BRAESTER, C. Theory of Flow Through Fractural Rocks. International Seminar, Stockholm - Cagliari, 1977 : 47.
- ( 6 ) BRASIL, DNOCS/MVOP - Boletim nº 6, Vol. 20 - Novembro de 1959.
- ( 7 ) BRASIL/DNRM - Geologia e Sondagens. O Furo Estratigráfico de Lagoa do Forno, Rio do Peixe, Sousa, PB. Rio de Janeiro, 1970 : 34 (inédito).
- ( 8 ) BRASIL/SUDENE - HIDROSERVICE. Levantamento e Análise dos Dados Fluviométricos Disponíveis. Relatório HE-48 - R16-668, São Paulo, 1968 : 62.
- ( 9 ) ————. Prestação de Serviços de Consultoria Técnica para o Planejamento Múltiplo da Bacia do Rio Piranhas nos Estados da Paraíba e Rio Grande do Norte. Relatório HE-48-R13-168, São Paulo, 1968 : 22.
- (10) BRASIL/SUDENE - GEOTÉCNICA S.A. Plano de Aproveitamento Integrado dos Recursos Hídricos do Nordeste - PLIRHINE, Fase I. Recursos Hídricos I e II, Águas Subterrâneas e Águas de Superfície, Vol. VII e VIII, Recife, 1980.
- (11) BRASIL/SUDENE - Projeto Nordeste, Segmento Utilização dos Recursos Hídricos. Relatório Final, Recife, 1983 : 177.
- (12) BRAUN, O.P.G. Geologia da Bacia do Rio do Peixe, Nordeste do Brasil. Recife, DNRM-PROSPEC, 1969 : 23 (inédito).
- (13) CEDERSTROM, D.J.; ASSED, J.C. Observações Hidrológicas no Nordeste do Brasil. DNRM, DGM, nº 120, Rio de Janeiro, 1964 : 42.
- (14) CHADA FILHO, L.G.; PESSOA, M.D.; SINCLAIR, W.C. Hidrogeology of the Upper Capibaribe Basin, Pernambuco, Brasil - A Reconnaissance in an Area of Crystalline Rocks. U.S. Geological Survey Water - Supply Paper 1663-E, Washington, 1966 : 44.
- (15) COSTA, W.D. Análise dos Fatores que Influencia na Hidrogeologia do Cristalino. CONESP, Recife, Set./Dez., 1965, pp. 44-45.

- (16) \_\_\_\_\_ . Hidrogeologia no Cristalino - Região Monteiro/Sumé, PB. XVII Congr. Bras. de Geologia, Recife, 1963 : 23.
- (17) \_\_\_\_\_ . A Hidrogeologia do Cristalino à Luz da Mecânica das Rochas. In Anais do 1º Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, Recife, 1980, pp. 375-383.
- (18) CUSTÓDIO, E.; LLAMAS, M.R. Hidrologia Subterrânea. Editora Ômega, Barcelona, Espanha, Tomos I e II, 1976 : 2.359.
- (19) EBERT, H. O Embasamento Cristalino do Nordeste com Eventual Base de Abastecimento com Águas Subterrâneas. Estudo Baseado no Levantamento Hidrogeológico de uma parte do Cariri Paraibano. Relatório Interno, SUDENE, Recife, 1961 : 15.
- (20) Governo do Estado/SUPLAN/UFPB/CCT/ATECEL. Estimativa Preliminar da Potencialidade dos Recursos Hídricos do Curimataú. Campina Grande, Relatório, 1978 : 156.
- (21) Governo do Estado/SAA/UFPB/ATECEL. Recursos de Água Subterrânea na Bacia do Rio Piancó. Campina Grande, Relatório, 1978 : 27.
- (22) LARSSON, I. Ground Water in Hard Rocks. International Seminar, Stockholm - Cagliari, 1977 : 40.
- (23) MANOEL FILHO, J. Produtividade de Drenos Horizontais e Potencialidade de Aquíferos Aluviais. In Anais do 1º Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, Recife, 1980, pp. 451-459.
- (24) REBOUÇAS, A. da C. Le Probleme de L'Eau Dans le Zone Semi-Aride du Brésil. Memoire de l'Université de Strasbourg, nº CRNG-Ao 8.639, Strasbourg, França, 1973 : 287.
- (25) SCHOFF, S.L. Hidrogeologia e Pesquisa Hidrogeológica no Nordeste Brasileiro. 5a. Semana de Estudos de Hidrogeologia, Águas no Nordeste, SICEG, nº 5, Ouro Preto, 1965, pp. 121-150.
- (26) SIQUEIRA, Luis. Aspectos Hidrogeológicos do Cariri Paraibano. SUDENE, Boletim de Recursos Naturais, Vol. 1, nº 1, p. 156, Recife, 1963 : 51.
- (27) SOUTO MAIOR, J. Ground Water in Northeastern Brasil. SUDENE, Divisão de Documentação, HG-21, Recife, 1969 : 82.
- (28) SOUZA, M.F. de; ALVES DE ALBUQUERQUE, G.; BARRETO, C.A.R. Pesquisa de Manancial Subterrâneo. Captação da CAGEPA, Catolé do Rocha, Relatório da CDRM, Campina Grande, 1980 : 96.
- (29) TALTASSE et alii. Relatório sobre Pesquisa de Água em Curso no Cariri (Paraíba). Relatório Interno, Grupo Cariri, Campina Grande, 1961 : 4.
- (30) VAREJÃO SILVA, M.A.; CEBALLOS, J.C. Critérios Climatológicos para a Delimitação do Semi-Árido do Estado da Paraíba. I Congresso Brasileiro do Tópico Semi-Árido, EMBRAPA, Recife, 1982 : 18.

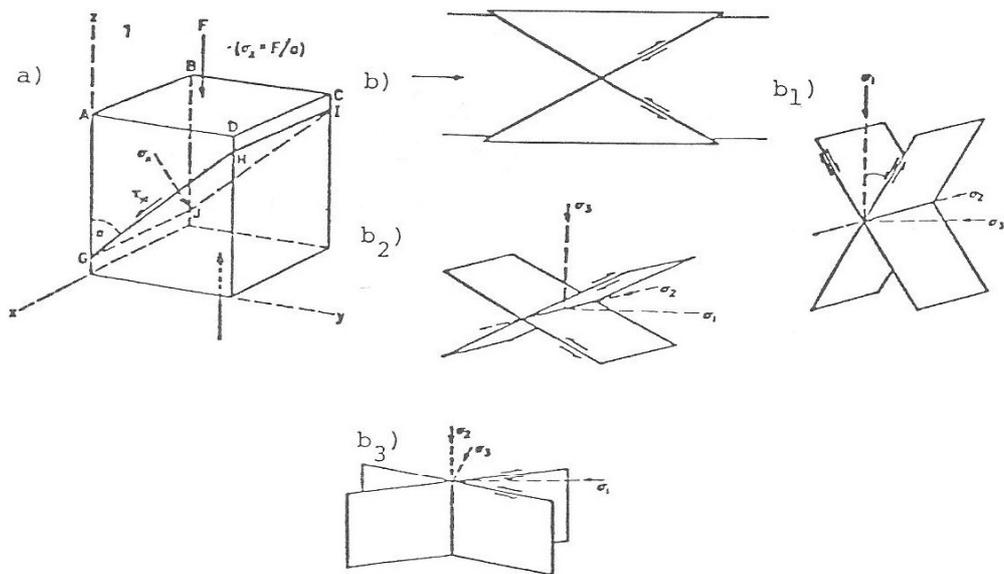


Figura 1. "Juntas ou fraturas de tensã̃o (a); cisalhamento conjugadas (b); tipo de empurrã̃o ou inversa (b<sub>1</sub>); tipo gravidade ou direta (b<sub>2</sub>) e tipo rejeito direcional (b<sub>3</sub>)".

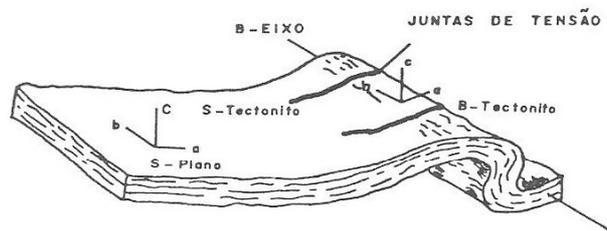


Figura 2. "Diagrama de deformaçã̃o plano e axial (Larsson, 1976)".

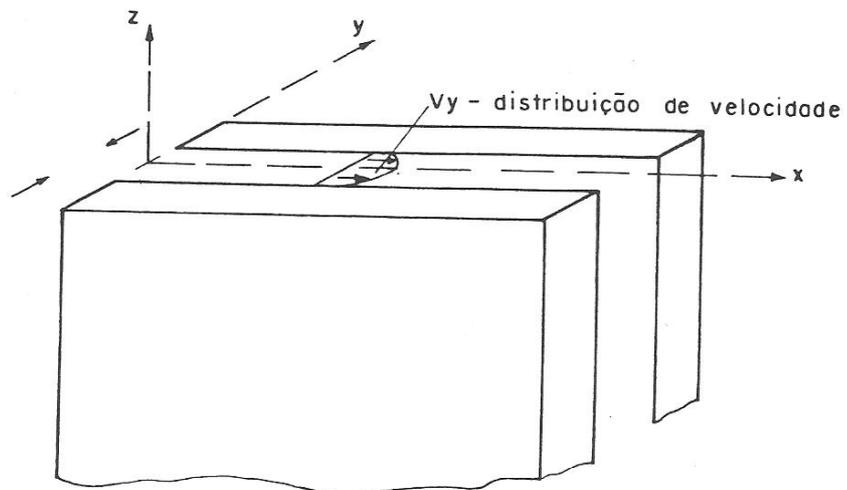
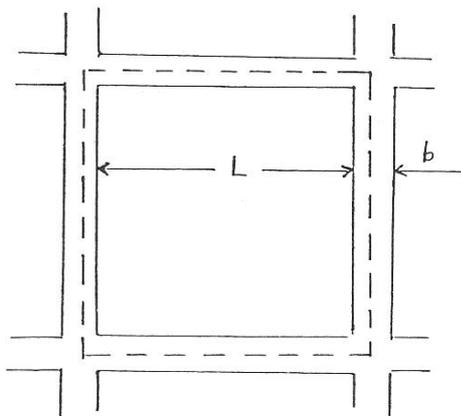


Figura 3. "Modelo Hele-Shaw para estudo de escoamento em fraturas, (Braester, 1977)".



$L$  = comprimento do bloco impermeável;

$b$  = abertura da fratura.

Figura 4. "Modelo de corpo fraturado, (Braester, 1977)".

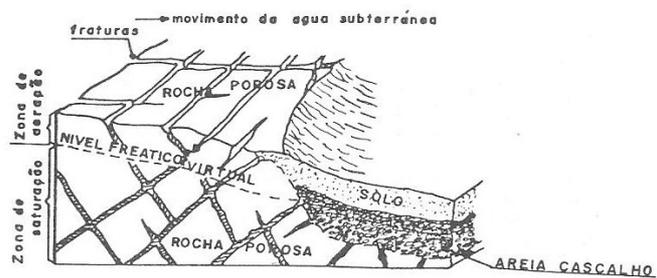


Figura 5. "Esquema de circulação da água subterrânea em rochas porosas, (Custódio e Llamas, 1976)".

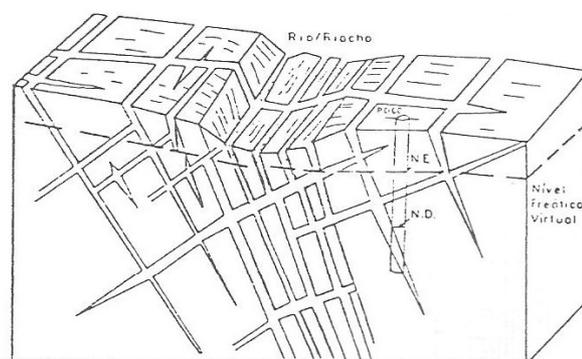


Figura 6. "Esquema de fraturamento e de circulação forçada (bombeamento) num poço do cristalino da Paraíba".

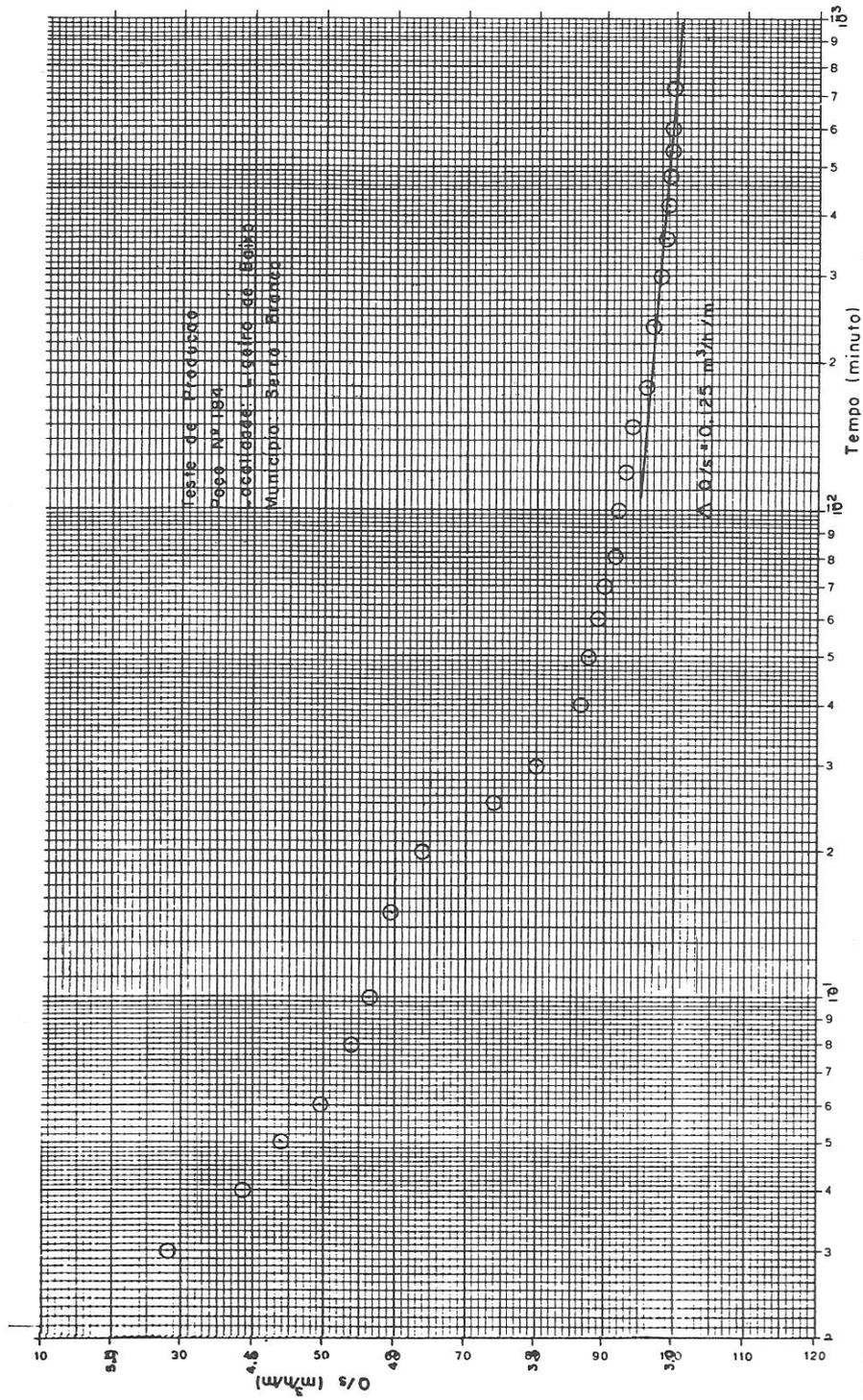


Figura 7. "Curva vazão específica x tempo".

