

ANÁLISE DOS CONDICIONANTES ESTRUTURAIS DOS AQUÍFEROS FRATURADOS

- APLICAÇÃO À REGIÃO DE JUNDIAÍ - SP -

Antonio Carlos Bertachini (*)

RESUMO

Foram utilizadas técnicas de análise hidrogeológica, geológica-estrutural e morfológica para compreender a influência dos condicionantes geológicos-estruturais no comportamento hidrogeológico dos terrenos cristalinos da região de Jundiaí - SP. Os resultados obtidos demonstraram que a condutividade hidráulica do meio fraturado está diretamente associada à gênese do fraturamento, com as fraturas de tração, R1 e Y do modelo de Riedel e as fraturas abertas por alívio de tensão associadas aos poços tubulares de maior produtividade.

1. INTRODUÇÃO

Este trabalho tem por objetivo colocar em discussão os procedimentos metodológicos empregados na análise dos condicionantes estruturais dos aquíferos fraturados em terrenos cristalinos da região de Jundiaí - SP. Para realizá-lo foram analisadas informações de 189 poços tubulares com dados hidrogeológicos básicos devidamente consistidos, a saber: níveis estático e dinâmicos, vazão e perfil geológico-constutivo. A análise do fraturamento foi obtida através da fotointerpretação, de levantamentos de campo e da análise da bibliografia existente sobre a evolução geotectônica da área. Nos trabalhos de fotointerpretação procurou-se associar cada um dos poços com os dados hidrogeológicos básicos às morfoestruturas caracterizadas. Estes procedimentos foram aplicados no desenvolvimento da Dissertação de Mestrado: "Estudos das Características Hidrogeológicas dos Terrenos Cristalinos sob Clima Úmido, na Região de Jundiaí-SP". (Bertachini, 1987).

2. GEOLOGIA

As litologias predominantes na região de Jundiaí são os xistos, gnaisses, quartzitos, migmatitos e granitos. Os metamorfitos são as litologias mais antigas da área e foram designados por Batista et al (1986) como pertencentes ao Grupo Itapira do Proterozóico Médio. Os granitos e demais intrusivas foram relacionadas principalmente aos eventos termais do Ciclo Brasileiro e diversos autores as subdividem em: intrusivas pré-tectônicas, sin-tectônicas e pós-tectônicas.

A foliação principal observada em todos os metamorfitos da área estudada foi denominada de "Sn" e atribuída a uma fase de dobramentos "Dn", ela pode ser observada nos metamorfitos do Grupo Itapira e nas rochas intrusivas pré ou sin-tectônicas. A fase "Dn" gerou dobras apertadas e isoclinais, observadas desde a escala microscópica até a escala métrica. A foliação "Sn" apresenta orien-

(*) Geólogo

tação preferencial na direção N45W/32SW com dispersão em várias direções (Figura 1a), que refletem um efeito de interferência sobre "Sn" causado por duas fases de dobramentos "pós-Dn" com eixos N-S e NW-W (Figura b).

As falhas, fraturas, juntas e demais estruturas de ruptura que truncam as rochas existentes, tem sua evolução inicial na fase de dobramentos "Dn", a qual pela sua intensidade mascarou as estruturas rúpteis de possíveis eventos anteriores. Assim parte das falhas e fraturas encontradas no campo podem ser correlacionadas a esta fase de deformação.

As grandes falhas transcorrentes, caracterizadas pela extensão de centenas de quilômetros e pelas espessas zonas de rochas cataclásticas, constituem importante feição estrutural, muito bem definidas a nível regional. Desenvolvidas no final do Ciclo Brasileiro, estas falhas truncam todas as rochas do Pré-Cambriano, inclusive os granitos pós-tectônicos. Na área de estudos, a principal feição é a falha de Jundiuvira, com atitude média regional na direção NE (Bistrichi et al 1981), oscilando localmente entre N80E e N60E. Dentro deste domínio ocorrem ainda outras falhas transcorrentes, com pequenos deslocamentos como as falhas de Cachoeira, Pirai e do Cururu, estas orientadas segundo a direção noroeste. O caráter do movimento da falha de Jundiuvira teria sido dextral e para as falhas de Cururu, Pirai e Cachoeira, o movimento teria sido sinistral (Hasui et al, 1978).

Em análise estrutural na zona do falhamento de Jundiuvira, no extremo sudeste da folha de Jundiá, Batista et al (1986) associaram a este evento duas fases de dobramentos: "Dn + 1" e "Dn + 2". Sendo "Dn + 1" correlacionada à foliação milonítica dominante na zona de falha observada, identificada pelos autores como Sn + 1. A fase "Dn + 2", deforma a foliação milonítica "Sn + 1".

3. ANÁLISE GEOMÉTRICA DO FRATURAMENTO

Nos trabalhos de campo os planos de ruptura foram classificados em função de sua ocorrência e extensão, nos seguintes conjuntos de estruturas:

- . Fraturas de primeira ordem: as que se estendem por todo o afloramento sem serem interrompidas.
- . Fraturas de segunda ordem: as que se interrompem na escala de afloramento.
- . Fraturas de terceira ordem: as de pequena extensão, delimitadas no afloramento.
- . Falhas: fraturas de primeira ordem com grande deslocamento entre capa e lapa.

Na Figura 2 encontram-se os diagramas de projeção estereográfica destas estruturas, onde verifica-se que a maior incidência de descontinuidade é encontrada na direção N45°E com mergulhos subverticais, predominantes no quadrante sudeste. Esta atitude espacial é a mais frequente nos diagramas do conjunto total de falhas e fraturas e naquela com fraturas de primeira ordem. Observa-se também que esta atitude espacial está praticamente ausente nos

diagramas com fraturas de segunda ordem.

A direção N50W é a segunda em frequência nos diagramas para o conjunto total de falhas de fraturas e para fraturas de primeira ordem; nos diagramas com fraturas de segunda ordem é a direção predominante.

Com menor frequência dos diagramas de projeção estereográfica estão as direções N70°E/vertical e N55°E/80°NW, evidenciados em todos os diagramas de projeção estereográfica utilizados. Finalmente, com menor evidência, foram observados planos de ruptura nas direções N15°E/60°SW, N25°NE, N15°W/vertical e EW/vertical.

Para um melhor entendimento do mecanismo do fraturamento, procurou-se comparar os resultados obtidos no campo com a distribuição dos esforços nos principais eventos geológicos-estruturais, ou seja: a fase de deformação "Dn" e os falhamentos transcorrentes.

a. Fase de Deformação "Dn"

Sabendo-se que a foliação "Sn" apresenta máximo na direção N45°W, as fraturas com direção em torno de 45°E correspondem às fraturas de tração da fase Dn. De acordo com o proposto por Larson (1977), dentre as fraturas desenvolvidas no estado plástico com importância hidrogeológica destacam-se as fraturas de tração designadas pelo autor como fraturas "ac¹", que são aquelas desenvolvidas em planos que contêm a direção de máximo esforço, os eixos de máximo estiramento "a" é de máximo encurtamento "c" de um dobramento.

A direção N45°E é a predominante no conjunto total de falhas e fraturas observadas e nas fraturas de primeira ordem. Esta congruência geométrica sugere que durante a fase de dobramentos "Dn" foi desenvolvido um forte sistema de fraturas "ac¹" orientado ortogonalmente à foliação com a qual ainda guarda tal relação. O Predomínio desta direção entre fraturas mais extensas (fraturas de primeira ordem) converge também para a descrição de Larson (1977) das fraturas de tração como sendo as mais extensas.

A fase de dobramentos "Dn" ainda poderia ser responsável pelo desenvolvimento de sistemas de fraturas de cisalhamentos, cuja identificação fica dificultada pelos eventos posteriores.

b. Falhamentos Transcorrentes

O falhamento transcorrente de Jundiuvira é o evento mais significativo da tectônica rúptil local. Ele está superimposto aos dobramentos da fase "Dn", o que significa que descontinuidades geradas na fase Dn foram afetadas ou reativadas durante esse evento. O falhamento de Jundiuvira, propriamente dito está associado aos sistemas de falhamentos transcorrentes de menor expressão que cortam toda a região estudada.

Admitindo-se os modelos de desenvolvimento de falhas e fraturas em uma zona de transcorrência proposto por Riedel (1929 in Sadowski, 1984) e Harding (1974), verificamos que existe uma boa correlação geométrica destes com as fraturas e falhas observadas no campo a saber:

- . Fraturas R₁ (antitéticas): falhas e fraturas de primeira, segunda e terceira ordem com direção próxima a N50°W;
- . Fraturas R (sintéticas): falhas e fraturas de primeira ordem com

direção próxima a N70°E;

- . Fraturas Y (falhamento principal): falhas e fraturas de primeira ordem com direção próxima a N55°E;
- . Fraturas de tração: corresponderiam a planos de fraturas com direção próxima a N80°W com frequência baixa.

As fraturas R₁ são os elementos mais marcantes destes modelos, sendo caracterizados tanto nas falhas de Cururu, Pirai e Cachoeira como em juntas de pequena extensão, todas com direção em torno de N50°W. Além de ser esta a única direção de fraturamento preenchida pelos diques de rochas ácidas, revela estarem mais abertas ao menos durante o período das intrusões.

c. Modelo de Desenvolvimento do Fraturamento

Na figura 3 tem-se o modelo do desenvolvimento das principais estruturas rúpteis da área estudada, cuja evolução deu-se a partir de uma fase de dobramentos (Dn) a qual mascarou as descontinuidades anteriores. Nessa fase de dobramentos desenvolveram-se, principalmente, fraturas de tração ortogonais à foliação plano axial, que correspondem atualmente na região de Jundiá às fraturas com direção em torno de N45E. Sobre as rochas previamente fraturadas, deu-se o desenvolvimento do falhamento transcorrente de Jundiuvira, o qual supõe-se ter-se dado em duas fases: "Dn + 1" e "Dn + 2". A fase "Dn + 1" é de difícil reconstituição do ponto de vista do fraturamento, já a fase "Dn + 2" apresenta boa reconstituição tanto do ponto de vista do fraturamento como dos dobramentos.

Após o falhamento transcorrente, a área deve ter sido afetada por outros eventos, mas não foi possível identificar sistemas de fraturas mais jovens, nem mesmo nos sedimentos Permo-Carbôníferos que ocorrem em áreas restritas.

4. HIDROGEOLOGIA

Dentre os poços tubulares inventariados na região estudada foram selecionados 189 poços com informações confiáveis. Estes poços foram associados aos lineamentos de fraturas gerando um conjunto de dados com as seguintes informações:

- . profundidade, vazão, níveis estático e dinâmico e capacidade específica;
- . a orientação do lineamento: o azimute de 0° a 180°;
- . a evidência do lineamento, com base na retilinearidade: contrastes de textura e topográficos; os lineamentos foram classificados como sendo de evidência forte, média ou fraca;
- . extensão: o comprimento do lineamento em km;
- . distância: a menor distância entre o poço tubular e o lineamento.

Os lineamentos de fraturas foram analisados com relação a sua orientação. Como anteriormente o parâmetro utilizado foi a capacidade específica, desta vez comparou-se o seu valor médio em intervalos de 10° do azimute dos lineamentos em um diagrama de frequência do tipo rosácea.

Na Figura 4 encontram-se esses diagramas de frequência, os quais foram construídos para os poços situados em lineamen-

tos com evidência forte e/ou média e/ou fraca (Figura 4a), forte e/ou fraca (Figura 4b); e forte (Figura 4c). Nos diagramas podemos observar que em torno das direções N45°E, N85°W, N40°/N50°W, N65°E e N-S é que são encontrados os maiores valores médios da capacidade específica, sendo que o intervalo com maiores valores médios da capacidade específica é o entre N40°E e N50°E.

A ocorrência de valores médios da capacidade específica mais elevados em determinadas direções está relacionada à gênese das fraturas e/ou falhas contidas nessas direções. Desta forma, comparando-se os valores da Figura 4 com a análise geométrica do fraturamento, pode-se entender melhor a natureza do fraturamento da região de Jundiá.

A direção que apresenta maior valor da capacidade específica média é a N45°E, que é congruente com a direção das fraturas de tração da fase de deformação Dn e das fraturas e falhas de rejeito direcional sintéticas ao falhamento transcorrente. As fraturas de tração, em geral, tendem a apresentar-se mais abertas, com condições mais favoráveis à circulação da água subterrânea. A importância dessa direção reside também no fato de serem as mais frequentes entre as fraturas de primeira ordem.

Ainda com valores mais elevados da capacidade específica média dos poços tubulares em relação aos demais, encontram-se lineamentos de fratura com as seguintes direções: N85°W, N50°W a N30°W, N10°W a N10°E e N65°E. Com respeito a estes lineamentos tem-se que:

- a direção N85°W é a das fraturas de tração da fase Dn + 2 do falhamento transcorrente;
- o intervalo entre N30°W e N50°W corresponde às fraturas e falhas antitéticas (R₁) do modelo de Riedel (in Sadowski, 1984). Estas foram as únicas descontinuidades preenchidas pelos diques de rochas ácidas, devido a, além de outros fatores, serem fraturas e/ou falhas mais abertas;
- a direção N-S (de N10°W a N10°E) não corresponde às direções dos principais sistemas de fraturas estudadas no item 3.2. São fraturas pouco expressivas, provavelmente geradas na fase Dn como fraturas de cisalhamento que, no entanto, são congruentes com a direção do eixo dobramento Dn + 2. No final desta fase (Dn + 2) estas fraturas teriam sido "abertas" por alívio de tensão em conformidade com o proposto por Price (1966) e empregado na hidrogeologia por Costa (1980);
- a direção N65°E corresponde à direção do falhamento transcorrente na fase Dn + 2 (fraturas Y do modelo de Riedel).

Nos demais intervalos dos diagramas da Figura 4.11, os valores médios da capacidade específica são pequenos, pelo fato de não serem direções de fraturamento favoráveis à circulação das águas subterrâneas.

As principais características das fraturas consideradas como mais permeáveis ou mais abertas são:

- fraturas de tração, tanto as geradas na fase dúctil como na rúptil;
- fraturas com elevada frequência de ocorrência, tais como: R₁ e Y, do modelo de Riedel;
- fraturas abertas por alívio de tensão.

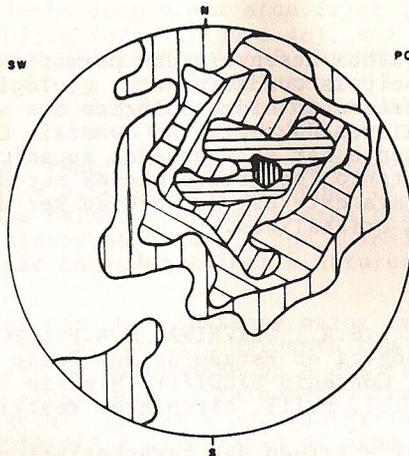
5. CONCLUSÕES

Os trabalhos desenvolvidos permitiram compreender o comportamento das principais condicionantes geológico - estruturais que intervêm no comportamento hidrogeológico dos aquíferos fraturados em terrenos cristalinos da região de Jundiá. Os resultados obtidos não podem obviamente ser extrapolados mecanicamente para outras áreas, mas, no entanto, os procedimentos metodológicos adaptados ou desenvolvidos para este estudo poderão ser aplicados em outras áreas de terrenos cristalinos.

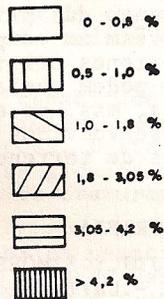
6. BIBLIOGRAFIA

- BATISTA, J.J.; SIMÕES, L.S.A.; OLIVEIRA, M.A.F.; SOUZA FILHO, E.E.S. - 1986 - Carta geológica do Estado de São Paulo - Escala 1:50.000 - Folha de Jundiá, Convênio SICCT/Pró-Minério - IGCE (UNESP), Rio Claro - SP, vol. I, p.115, circulação restrita.
- BERTACHINI, A.C. - 1987 - Estudo das características hidrogeológicas dos terrenos cristalinos sob clima úmido, na Região de Jundiá, em São Paulo. São Paulo, 119p. (Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo), circulação restrita.
- BISTRICHI, C.A.; ALMEIDA, F.F.M.; HASUI, Y.; POÇANO, W.L.; DANTAS, A.S.L., CARNEIRO, C.D.R.; MELO, M.S. - 1981 - Mapa geológico do Estado de São Paulo, escala 1:500.000. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, Monografias, 6.
- COSTA, W.D. - 1980 - A hidrogeologia do cristalino à luz da mecânica das rochas. In: Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, Recife, Anais da ABAS, vol. 1, p.375-383.
- HARDING, T.P. - 1974 - Petroleum traps associated with wrench faults. In: American Association of Petroleum Geologist Bulletin. v.(58)7. p.1290-1304.
- HASUI, Y.; TOGNON, A.A.; SOARES, L.; CSORDAS, S.M. - 1978 - Geologia e tectônica da Serra do Japi. Bol. IG, 9:17-24.
- LARSON, I. - 1977 - Ground water in hard rocks. In: International Seminar, Ground Water in Hard Rocks, Stockolm, p.40.
- PRICE, N.J. - 1981 - Fault and joint development in brittle and semi-brittle rock. Pergamon Press Inc., New York, p.176.
- SADOWSKI, G.R. - 1984 - Estado da arte do tema: Geologia estrutural de grandes falhamentos. In: XXXIII Congresso Brasileiro de Geologia, Rio de Janeiro, Anais da SBG, p.1767-1783.

MÁXIMO: N 45 W / 32 SW

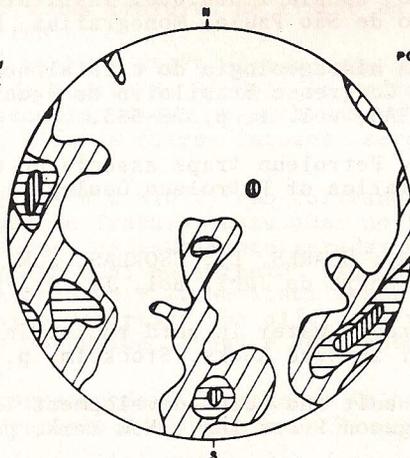


PORCENTAGEM DE POLOS

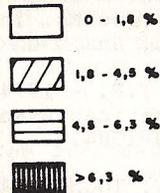


a) DIAGRAMA DE PROJÇÃO ESTEREOGRÁFICA NO HEMISFÉRIO INFERIOR, CONTAGEM EM REDE EQUIÁREA RELATIVA A 500 POLOS DA FOLIAÇÃO S_n.

MÁXIMOS: 10° / N 75 W
10° / S 75 E
22° / S



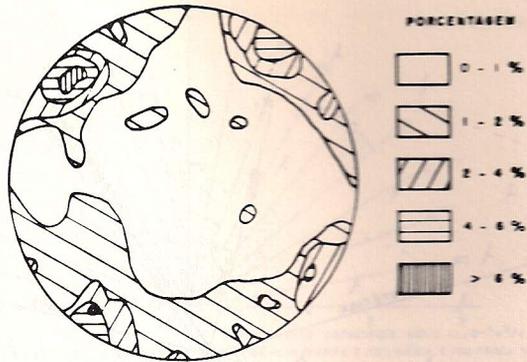
PORCENTAGEM DE POLOS



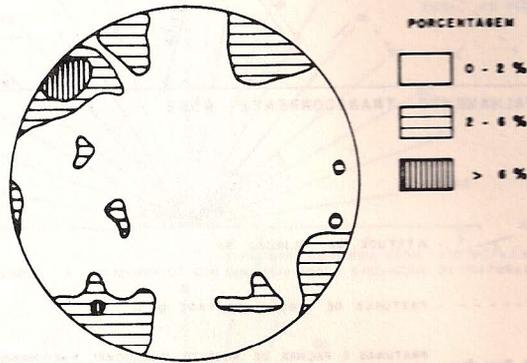
b) DIAGRAMA DE PROJÇÃO ESTEREOGRÁFICA NO HEMISFÉRIO INFERIOR, CONTAGEM EM REDE EQUIÁREA RELATIVA A 110 EIXOS DE DOBRAS POSTERIORES A FASE D_n.

Fonte: Batista et alii, 1996

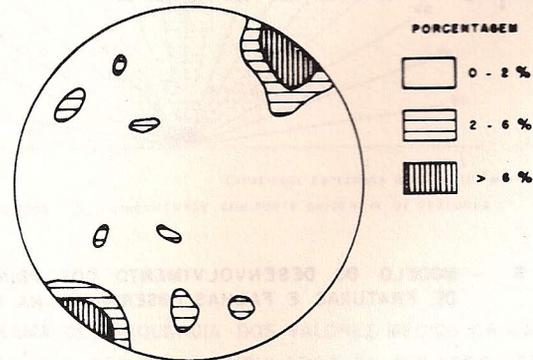
FIGURA 1 - ESTEREOGRAMAS EM REDE EQUIÁREA DA FOLIAÇÃO S_n E DE EIXOS DE DOBRAS PÓS-D_n



A) 302 POLOS DE FALHAS E FRATURAS DE 3ª ORDEM



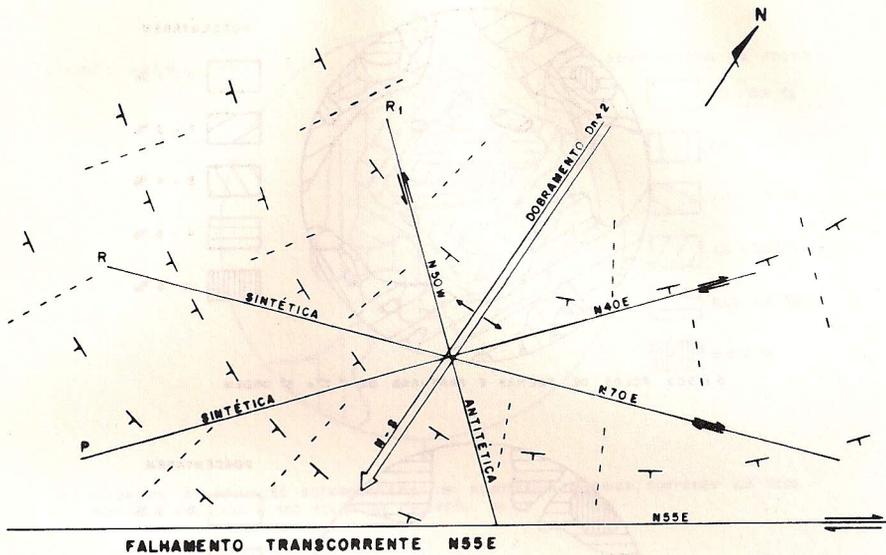
B) 187 POLOS DE FRATURAS DE 1ª ORDEM



C) 68 POLOS DE FRATURAS DE 2ª ORDEM

Obs: Projeções no hemisfério inferior

FIGURA 2 - ESTEREOGRAMAS EM REDE EQUIÁREA DE FALHAS E FRATURAS



-  - ATITUDE DA FOLIAÇÃO S_n
-  - FRATURAS DE TRAÇÃO DA FASE D_n
- P, R e R_1** - FRATURAS E FALHAS DE REJEITO DIRECIONAL PREDOMINANTES NA ÁREA ESTUDADA E CORRELACIONADAS AO MODELO DE RIEDEL
-  - ANTICLINAL DEFINIDO PELA FOLIAÇÃO S_n

FIGURA 3 - MODELO DO DESENVOLVIMENTO DOS PRINCIPAIS SISTEMAS DE FRATURAS E FALHAS OBSERVADAS NA REGIÃO DE JUNDIÁ

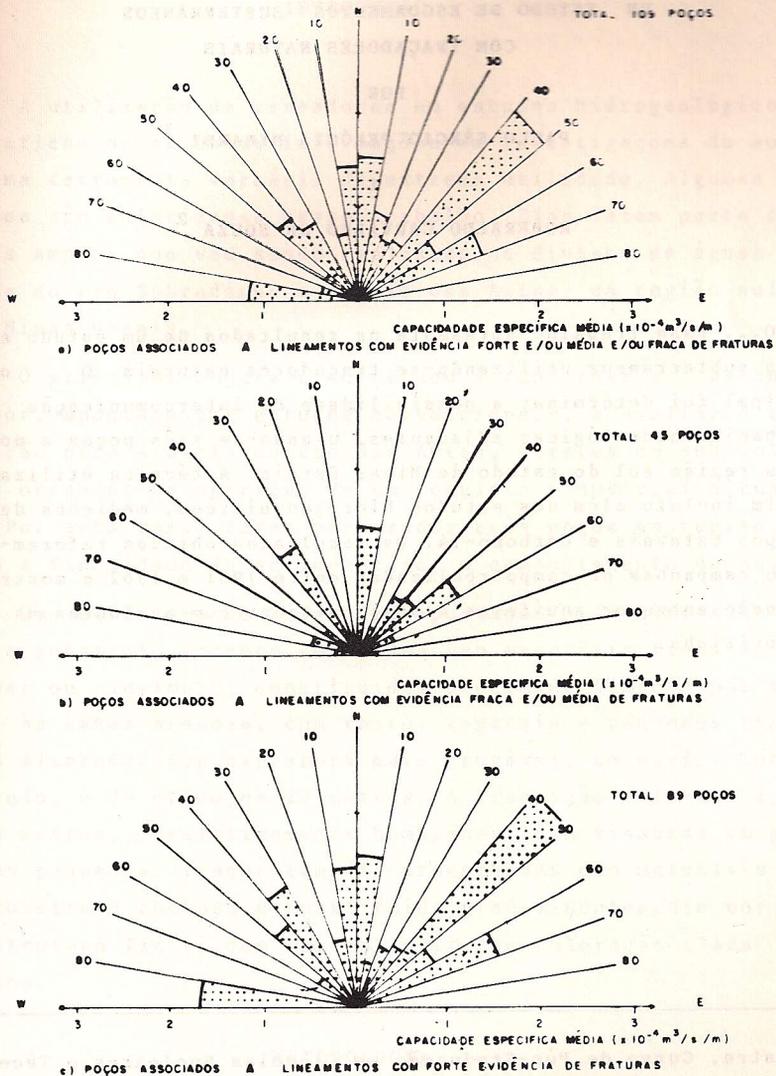


FIGURA 4 - DIAGRAMA DE FREQUÊNCIA DOS VALORES MÉDIOS DA CAPACIDADE ESPECÍFICA DOS POÇOS TUBULARES CALCULADOS SEGUNDO AS DIREÇÕES DOS LINEAMENTOS DE FRATURAS