

ANÁLISE PETROGRÁFICA E PETROFÍSICA DE RESERVATÓRIOS ARENOSOS PERFURADOS PELO POÇO C-IG-98, MUNICÍPIO DE CAPIVARI-SP

ALEXANDRE CAMPANE VIDAL¹, CHANG HUNG KIANG², SETEMBRINO PETRI³
& JOSÉ MARIA DE AZEVEDO SOBRINHO⁴

Abstract This paper deals with the analysis of heterogeneous ground water reservoirs based on the study of cores from a well drilled near Capivari, São Paulo, by the Instituto Geológico of the Secretaria de Meio Ambiente of the state of São Paulo, Brazil. Well C-IG-98 is entirely cored and traverses 300 m of sediments of the Late Paleozoic Itararé Group, mainly very fine to fine sandstones. Four hundred and thirty analyses of porosity and permeability together with conventional petrographic, SEM, and x-ray diffraction studies produced the following observations: a) High water porosity (21%) and permeability (300 mD); b) The two main controls on flow properties are grain size and sorting; c) Diagenetic processes have been important in reservoir zonation, allowing distinction of an upper zone (from 0 to 100 m depth) with better flow conditions than the zone below 100 m. The upper zone is undersaturated with respect to carbonate and exhibits a predominance of kaolinite and illite among the clay minerals. The lower zone is in equilibrium with the carbonate phase and contains calcite concretions; chlorite is always present among the clay minerals.

Keywords: Itararé Group, porosity, permeability, diagenesis.

Resumo Os aquíferos posicionados na região aflorante do Grupo Itararé, no Estado de São Paulo, são caracterizados pelo comportamento heterogêneo em relação ao fluxo. Visando adicionar informações sobre as características permo-porosas desta unidade geológica, foi realizada a coleta sistemática de amostras do poço C-IG-98, perfurado no município de Capivari, que atingiu a profundidade de 300m com testemunhagem contínua. As amostras obtidas foram destinadas à análise de porosidade e permeabilidade, além de análises petrográficas, através da petrografia convencional, microscópio eletrônico de varredura e de difração de raios-X. Embora o poço apresente predomínio das fácies de arenito muito fino e fino, foram observados elevados valores de porosidade e permeabilidade com média de 21% e 300mD, respectivamente. Análise de correlação entre os dados apontou a granulometria e o grau de seleção como os principais fatores que controlam as propriedades de fluxo destes arenitos. Os processos diagenéticos podem ser considerados como um terceiro fator, tendo papel significativo no zoneamento do reservatório, dividindo-o em uma zona com melhores condições de fluxo entre 0 e 100m de profundidade e outra zona menos favorável para profundidades maiores que 100m.

Palavras-chave: Grupo Itararé, porosidade, permeabilidade, diagênese.

INTRODUÇÃO As análises petrofísica e petrográfica apresentadas neste trabalho referem-se às informações provenientes de amostras de um único poço, C-IG-98, que atingiu 300m de profundidade com testemunhagem contínua. Este poço está posicionado na região leste do município de Capivari, no bairro loteamento Santa Rita, com coordenadas UTM de 244700EW e 7454900NS (Figura 1).

A área de pesquisa está localizada em depósitos referentes ao Grupo Itararé, de idade neopaleozóica, posicionados sobre o embasamento da região centro-oriental. Estes sedimentos são compostos por arenitos, diamictitos, conglomerados e sedimentos de granulação fina.

A unidade Itararé recebe a classificação de Grupo em toda a Bacia do Paraná, sendo subdividida em três formações caracterizadas por seqüências de predomínio de arenitos na base e sedimentos finos e diamictitos no topo (França & Potter 1989). No entanto, uma das características destes depósitos é sua complexidade geológica, que resultou na dificuldade de determinação das formações por toda a bacia. Em particular, na área aflorante no Estado de São Paulo, a unidade Itararé permanece indivisa em alguns trabalhos, recebendo a definição de Subgrupo.

No Estado de São Paulo, os problemas encontrados para a subdivisão do Grupo Itararé devem-se à falta de continuidade lateral dos corpos rochosos e de camadas guias. Esta situação está condicionada, em parte, à variabilidade dos ambientes de sedimentação que presidiram a deposição deste conjunto de rochas (Soares *et al.*, 1977, França & Potter 1989, Caetano-Chang 1984,

Fúlfaro *et al.* 1984)

A variabilidade geológica deste pacote sedimentar tem reflexo direto sobre o comportamento do fluxo do aquífero. O comportamento errático dos sedimentos arenosos, a escassez de afloramentos, a distribuição irregular dos poços e o pequeno número de informações em relação à heterogeneidade geológica são as principais causas para a elevada incerteza na exploração de água subterrânea na região. Embora existam regiões na área aflorante do Grupo Itararé com altas porcentagens de arenitos, de forma geral os aquíferos presentes nestas unidades são considerados de baixa vazão (Diogo *et al.* 1981; Stevaux *et al.* 1987).

Apesar da incerteza na caracterização das geológica e seu reflexo na previsão do comportamento do fluxo do Grupo Itararé no Estado de São Paulo, existem áreas restritas com alta densidade e qualidade de informações. Uma dessas regiões corresponde à área do município de Capivari, que apresenta grande número de poços com testemunhagem contínua, sendo alvo de diversos trabalhos (Oda *et al.* 1990, Petri & Pires 1992, Petri *et al.* 1996).

Medidas diretas de permeabilidade e porosidade têm sido pouco utilizadas para a caracterização dos aquíferos rasos e também como informações adicionais para a sedimentologia. Este trabalho, por isso, tem por objetivo acrescentar novas informações sobre características petrográficas e petrofísicas dos sedimentos do poço C-IG-98, perfurado pelo Instituto Geológico da Secretaria do Meio Ambiente.

METODOLOGIA O poço C-IG-98 exibiu testemunhagem

1 - UNICAMP/IG/Departamento de Geologia e Recursos Naturais. R. Pandiá Calógeras, 51 CEP: 13083-970, Campinas-SP. Caixa Postal: 6152 e-mail vidal@ige.unicamp.br

2 - UNESP/IGCE/Departamento de Geologia Aplicada, Av. 24-A, no1515 CEP- 13506-900 Rio Claro, SP. e-mail: chang@rc.unesp.br

3 - USP/IG Rua do Lago, 562 - CEP 05508-900 Cidade Universitária, São Paulo-SP e-mail spetri@usp.br

4 - Instituto Geológico - Secretaria do Meio Ambiente São Paulo. Av. Miguel Stefano 3900, CEP04301 São Paulo-SP (Água Funda) e-mail zemaria@igeologico.sp.gov.br

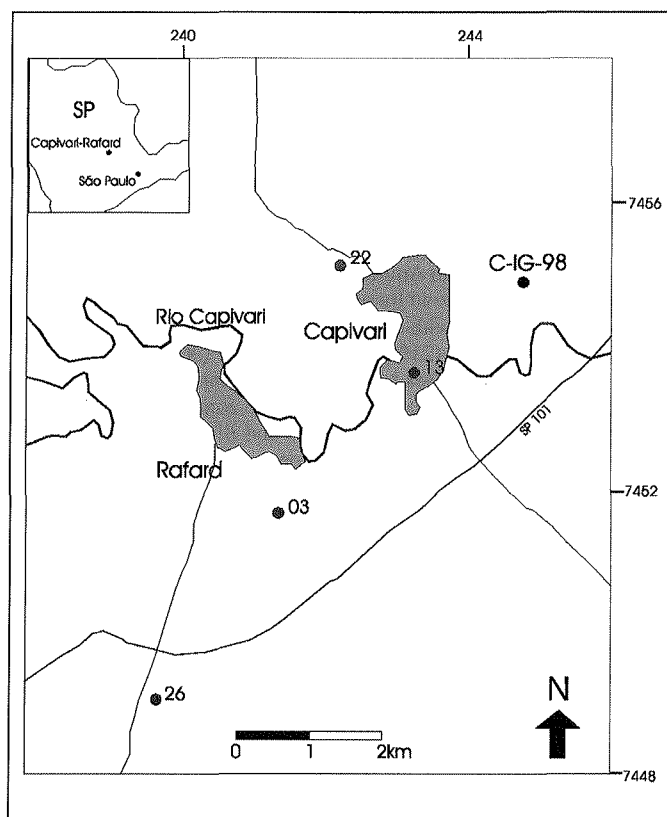


Figura 1 - Localização do poço C-IG-98 na região do município de Capivari, além de outros poços perfurados pelo Instituto Geológico-SMA e descritos no trabalho de Petri et al. (1996).

contínua de zero a 300 m. As amostras foram coletadas em intervalos de 50cm, com diminuição do espaçamento do intervalo de coleta em algumas camadas de arenitos. O total de pontos amostrados foi de 620, dos quais apenas 419 tiveram medidos os parâmetros petrofísicos, 39 serviram à confecção de lâminas delgadas e 8 amostras foram destinadas à análise de difração de raios X (Figura 2).

A análise petrográfica iniciou-se com a seleção de 39 amostras de arenitos, as quais foram impregnadas com *epoxy* azul para a identificação dos poros e fixação dos grãos minerais. Durante esta etapa, foi efetuada a contagem de 150 pontos para quartzo monocristalino, policristalino, feldspatos, fragmentos de rocha, matriz, porosidade e cimento. Além da utilização do microscópio petrográfico convencional, algumas amostras foram submetidas à análise no microscópio eletrônico de varredura (MEV).

A definição dos argilominerais foi realizada através de difratometria de raios X. Os resultados foram obtidos para a rocha total moída e para a fração fina, separada através de decantação e submetida à análise normal total, glicolada e queimada.

As medidas de petrofísica foram realizadas no porosímetro e permeâmetro da *Core Laboratories*, em aparelhos pertencentes ao laboratório do Departamento de Engenharia do Petróleo da Faculdade de Engenharia Mecânica/Unicamp.

As amostras foram retiradas na forma de cilindro, com 2,5 cm de diâmetro e 4cm de comprimento. A seguir foram definidas as dimensões médias da amostra, calculado o volume, medição do peso e, por fim, a determinação da densidade.

As amostras não uniformes, com variações em suas dimensões de largura e comprimento, foram descartadas. Os parâmetros básicos utilizados na análise petrofísica dos arenitos foram porosidade e permeabilidade.

Porosidade A porosidade corresponde à capacidade de armazenamento de fluidos, definida como a relação entre o volume de vazios e o volume total da rocha. A porosidade pode ser absoluta, que corresponde ao volume total poroso, ou efetiva, sendo a relação entre os espaços vazios interconectados de uma rocha e seu volume total (Bonet & Gabrielli, 1985).

A porosidade efetiva das amostras foi determinada com a utilização de um porosímetro, que mede o volume de grãos ou de poros de uma amostra, através do princípio da expansão de gás.

O aparelho trabalha com um volume conhecido de gás (célula de referência) que em determinado momento é isotermicamente expandido em um volume poroso desconhecido. Depois da expansão, o resultado da pressão de equilíbrio é medido, sendo este valor dependente da magnitude do volume poroso desconhecido, que pode ser calculado usando-se a lei de Boyle:

$$\frac{p_1 V_R}{T_1} + \frac{p_2 V}{T_2} = \frac{p_3 (V_R + V)}{T_3} \quad \text{equação (1)}$$

onde p_1 é a pressão no aparelho; V_R o volume de referência; p_2 a pressão na amostra; V o volume da amostra; p_3 a pressão resultante após a abertura das válvulas; e T_1 , T_2 e T_3 referem-se, respectivamente, à temperatura do aparelho, na amostra e no sistema após a abertura das válvulas.

Como prática padrão é assumido p_1 de 100 psig, p_2 com valor zero e não variação de temperatura. Desta forma, a equação acima passa a ser expressa, isolando o volume que se deseja determinar, como:

$$V_{med} = V_R \left(\frac{100}{P_3} - 1 \right) \quad \text{equação (2)}$$

Assim, determinando a pressão final de equilíbrio, obtém-se de forma direta o volume da amostra. Através da subtração do volume da amostra pelo volume do *core* vazio obtém-se o volume de grãos. Com isso, a porosidade da amostra é calculada através da fórmula:

$$\Phi = \frac{V_b - V_g}{V_b} \quad \text{equação (3)}$$

onde V_b é o volume total da amostra; V_g o volume de grão; e Φ a porosidade efetiva da amostra.

Permeabilidade A permeabilidade é a capacidade do meio poroso para conduzir fluido (óleo, gás e água), podendo ser absoluta ou efetiva. A permeabilidade de uma rocha em relação a uma fase única líquida é denominada absoluta, enquanto a permeabilidade efetiva corresponde à situação com dois ou mais fluidos envolvidos (Bonet & Gabrielli, 1985).

A dimensão da permeabilidade é definida como Darcy "D". A amostra é descrita como tendo permeabilidade de um Darcy, quando um líquido incompressível de viscosidade de um centipoise flui à razão de 1cm³/seg, através de uma área de 1cm² (perpendicular à direção de fluxo) e 1cm de comprimento, com pressão diferencial de fluxo de 1atm, assumindo condições de fluxo laminar.

A permeabilidade pode ser calculada utilizando-se a lei de Darcy. Neste caso, como o permeâmetro utiliza gás para a medição de permeabilidade, a equação de Darcy aplicada a fluido compressível (gás) é:

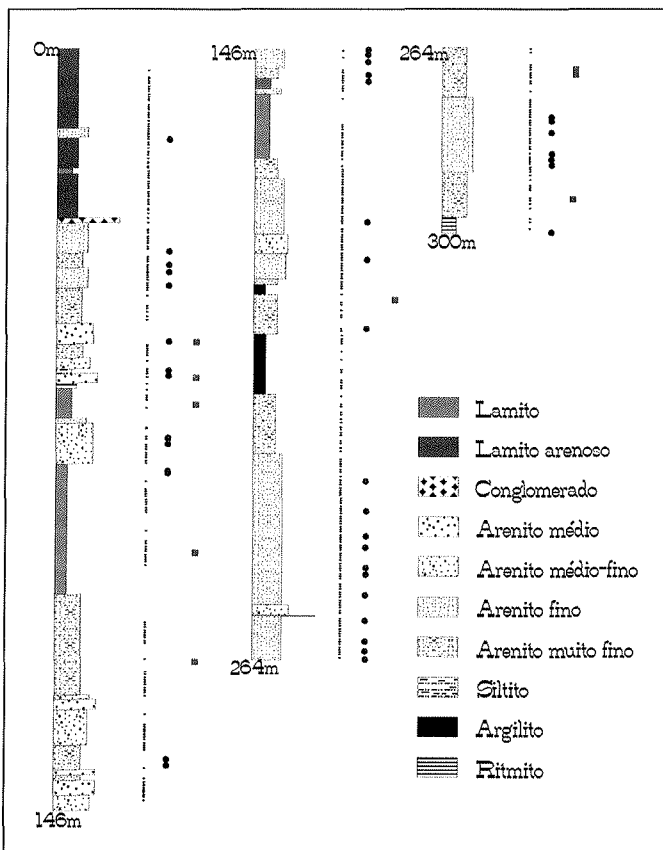


Figura 2 - Poço C-IG98 perfurado no município de Capivari, apresentando variação litológica, pontos com análise petrofísica (traço), pontos com lâminas delgadas (circulo) e amostras destinadas à difração de raio X (quadrado). A descrição litológica foi realizada pelos geólogos do Instituto Geológico-SMA.

$$k_g = \frac{2\mu_g(q_g)(L)(p_a)}{A(p_1 + p_2)(p_1 - p_2)} \quad \text{equação (4)}$$

onde k_g = permeabilidade ao gás (mildarcy); μ_g = viscosidade do fluido; L = comprimento da amostra; q_g = vazão de gás; A = área da amostra; p_1 = pressão de entrada; p_2 = saída de fluxo; p_a = pressão atmosférica.

O permeâmetro utiliza o fluxo de gás para efetuar a medida de permeabilidade, sendo a equação empregada para o cálculo:

$$k_g = \frac{Cq_a L}{A} \quad \text{equação (5)}$$

em que k_g = permeabilidade ao gás (mildarcy), q_a = vazão de ar (cm^3/s em condições atmosféricas). O valor de C é lido diretamente no nível de mercúrio do aparelho e equivale a p_1 . A pressão em p_2 é assumida com valor de 0,019atm (equivalente à pressão de 200mm de água). O erro, assumindo este valor de p_2 , é desprezível porque a pressão produzida no orifício de saída assume valor próximo a 200mm de água.

O fluxo de ar é numericamente igual a:

$$q_a = \frac{(\text{Orifício}Q)(h_w)}{200} \quad \text{equação (6)}$$

O Orifício Q é composto por material com vazão conhecida e é

por onde o fluxo de gás é dissipado. Durante o ensaio, escolhe-se o material do Orifício Q com vazão ideal para a leitura na coluna de água (h_w).

RESULTADOS OBTIDOS Em 300m de testemunho, o poço apresenta predomínio de arenitos, com espessura total de 205,1m; ocorrem secundariamente lamitos, com 76,5m e 18,4m correspondentes aos ritmitos finos, siltitos e argilitos (Figura 2).

A observação inicial da disposição litológica das fácies no poço aponta o predomínio dos lamitos na porção superior, enquanto os arenitos são mais frequentes em maiores profundidades.

Os intervalos referentes aos arenitos são constituídos, em sua grande maioria (83% ou 166,9m), por arenitos de granulometria muito-fina a fina podendo ser argilosos ou não. O restante do intervalo é preenchido por arenitos fino-médio e médio, sendo a espessura total de granulometria média de 4,7m.

De todas as amostras selecionadas para este trabalho, 419 foram destinadas aos ensaios de porosidade e permeabilidade, e os resultados obtidos estão representados no gráfico de correlação (Figura 3). Devido ao descarte de amostras e ao adensamento da coleta nas camadas constituídas por arenitos, o espaçamento dos dados não é uniforme, sendo o maior intervalo sem amostras de 11m, mediana de informação para intervalos de 0,5m e intervalo mínimo de 0,10m.

No gráfico de correlação de porosidade *versus* permeabilidade, é possível constatar a separação dos dados em dois grupos, claramente definidos através dos valores de permeabilidade (Figura 3). Observa-se no gráfico que os valores de porosidade apresentam grande variação, sem clara distinção para o agrupamento de valores próximos. Em relação aos valores de permeabilidade, dois grupos são claramente distintos, podendo utilizar, para a divisão da base de dados, o valor de 1mD. Assim, amostras com valores superiores a 1mD serão consideradas como bons reservatórios e inferiores como não-reservatório.

Dentre as várias litologias descritas no poço, algumas apresentam todas amostras posicionadas no grupo dos baixos valores de permeabilidade. Como esperado, estão posicionados neste grupo os argilitos, siltitos e ritmitos. Além dessas litologias, os lamitos e lamitos de matriz arenosa apresentam todas suas amostras posicionadas no campo das menores permeabilidades, configurando-se como fácies que se comportam como barreira de fluxo no aquífero.

Para a caracterização das rochas reservatórios, a correlação permeabilidade *versus* porosidade foi novamente realizada apenas para os arenitos. Neste caso, a diferenciação entre as fácies de arenitos foi feita conforme a variação granulométrica e a argilosidade, observada em lupa (Figura 4).

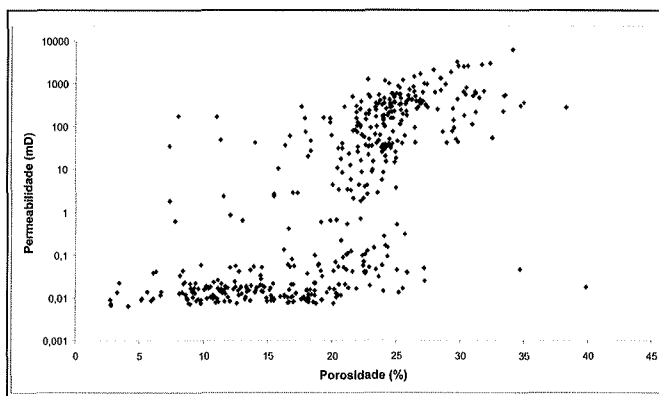


Figura 3 - Gráfico de correlação porosidade versus permeabilidade para todas as amostras.

No gráfico, os arenitos de baixa permeabilidade apresentam valores compatíveis com aqueles correspondentes às rochas não-reservatórios. Este grupo é formado predominantemente por arenitos muito finos argilosos e muito finos e, subordinadamente, por arenitos finos argilosos.

Desprezando os arenitos com permeabilidade inferior a 10mD, pode-se definir tendência linear entre porosidade e permeabilidade ao analisar os arenitos de granulometria fina. Porém, esta tendência linear não é clara, devido à grande variação nos valores em todas as granulometrias.

A variação dos valores de porosidade e, principalmente, de

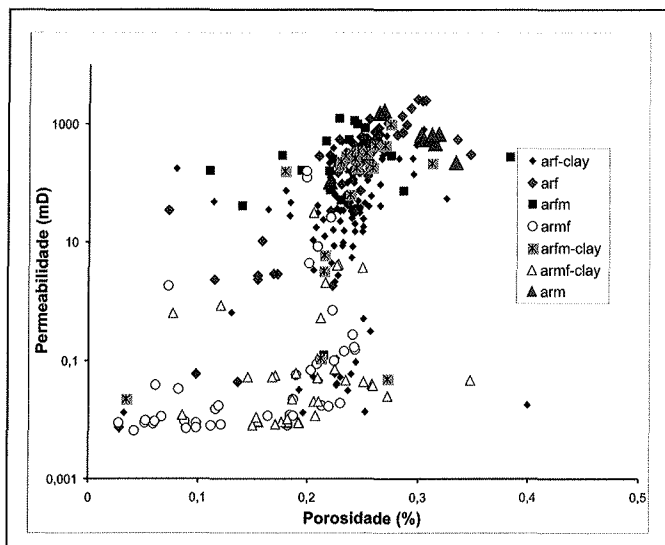


Figura 4 – Correlação entre permeabilidade versus porosidade para as várias fácies de arenitos. Na legenda arf-clay = arenito fino argiloso, arf = arenito fino, arfm = arenito fino-médio, armf = arenito muito fino, arfm-clay = arenito fino-médio argiloso, armf-clay = arenito muito fino argiloso, arm = arenito médio.

permeabilidade pode ser melhor visualizada através de diagramas *box-plot* (Figura 5), onde se constata que os arenitos apresentam, em sua quase totalidade, porosidade no intervalo de 20 e 30%. Valores médios acima desta variação estão presentes nos arenitos com granulometria média e abaixo para os de granulometria muito fina.

Para os valores de permeabilidade, destaca-se a grande dispersão dos dados, com a variação dos valores mínimo e máximo de 0,01mD até 1.000mD, respectivamente, para algumas fácies.

Outra característica é a distribuição distinta dos valores de permeabilidade para as fácies de granulometria muito fina, que apresentam os dados dos quartis próximos à mediana sempre abaixo de 1mD, diferente do que ocorre para as outras fácies.

Ao observar os valores mais próximos à mediana é constatado o aumento da permeabilidade para as amostras de maior granulometria e menos argilosas. Com isso, é possível inferir, através dos valores médios para cada fácies, a relação direta da permeabilidade em relação a granulometria e argilosidade. Entretanto, devido à grande dispersão dos dados, fica claro que a compreensão da distribuição dos valores de granulometria e argilosidade não são suficientes para estabelecer uma correlação precisa entre os valores de permeabilidade e porosidade para essas amostras.

Os resultados da análise petrofísica ao longo do poço estão presentes na figura 6, onde se destacam os elevados valores de porosidade e permeabilidade para os arenitos e a variação destes valores em camadas de mesma granulometria. Porém, a análise da variação dos valores de permeabilidade e porosidade de uma mesma fácies, em relação à profundidade, é pouco perceptível na figura devido à escala logarítmica utilizada.

Buscando destacar a localização dos altos valores de permeabilidade em relação aos diferentes tipos de arenitos, foi construído um gráfico da permeabilidade em função da profundidade. Neste caso, não foi utilizada a escala logarítmica para plotar os valores de permeabilidade e foram descartados os arenitos de granulometria muito fina (Figura 7).

Os resultados obtidos mostram que os maiores valores de permeabilidade, para todos os tipos de arenitos selecionados, es-

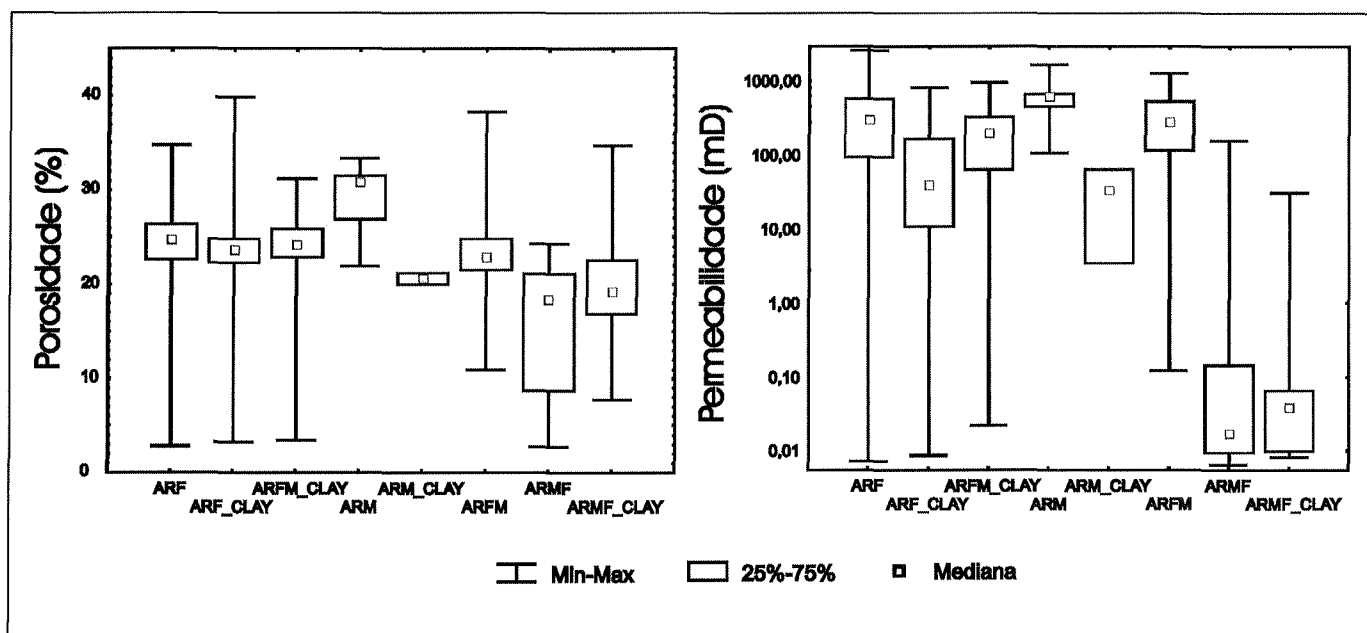


Figura 5 - Diagrama *box-plot* dos valores de permeabilidade e porosidade dos arenitos. Na legenda arf-clay = arenito fino argiloso, arf = arenito fino, arfm = arenito fino-médio, armf = arenito muito fino, arfm-clay = arenito fino-médio argiloso, armf-clay = arenito muito fino argiloso, arm = arenito médio.

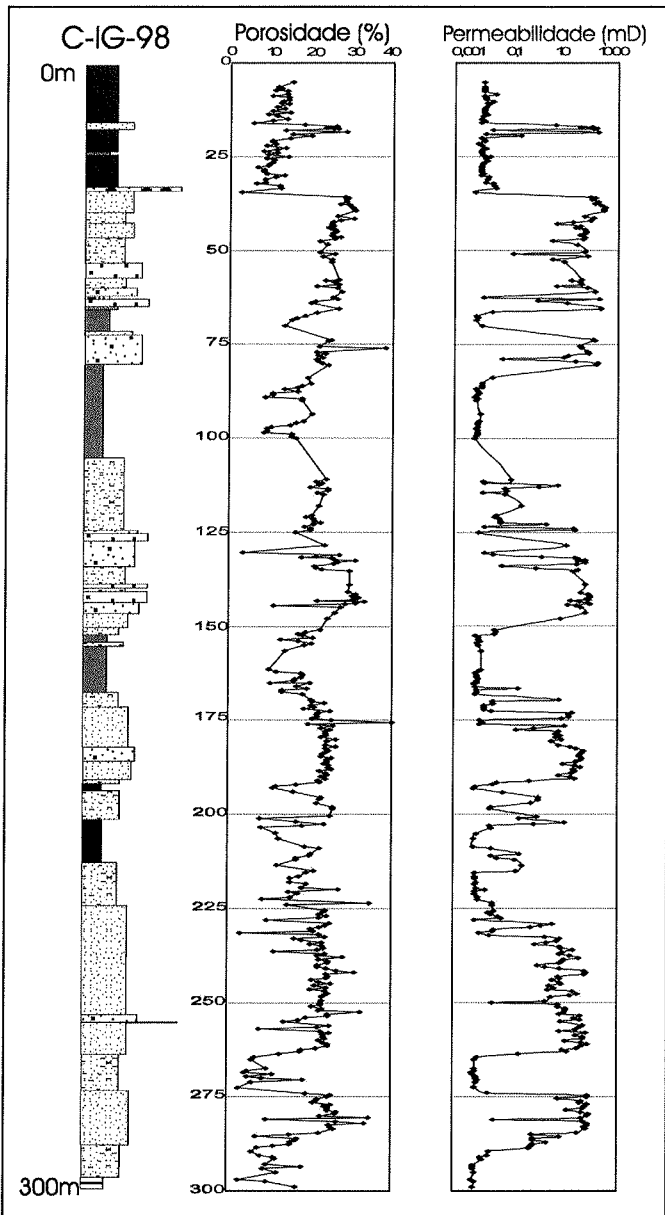


Figura 6 - Poço de Capivari C-IG98 com os valores de permeabilidade e porosidade plotados.

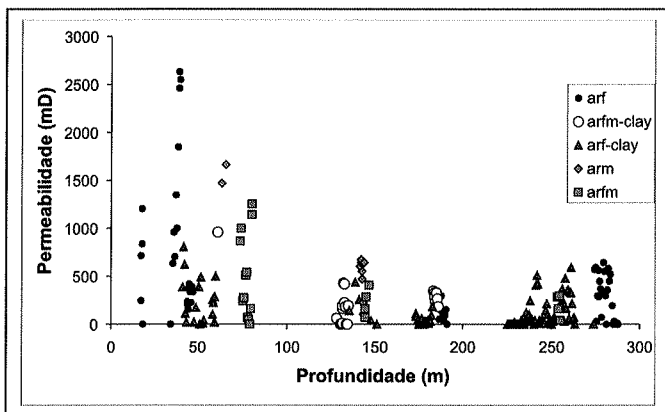


Figura 7 - Profundidade versus permeabilidade para os diferentes tipos de arenitos. Na legenda arf-clay = arenito fino argiloso, arf = arenito fino, arfm = arenito fino-médio, arfm-clay = arenito fino-médio argiloso, arm = arenito médio.

tão posicionados no intervalo entre 0 a 100m de profundidade. Os valores médios de porosidade e permeabilidade dos arenitos, no intervalo de 0 a 100m, são de 25% e 600mD e para a porção entre 100 a 300m, 21% e 113mD, respectivamente.

Com isso, as propriedades permo-porosas variam não apenas em relação à granulometria e ao grau de seleção, mas em relação à profundidade. Para investigar as possíveis causas dessa variação, foram realizadas análises petrográficas para caracterização da mineralogia, da porosidade e das fases diagenéticas presentes nos arenitos.

As descrições petrográficas dos arenitos apontam grande variação quanto à quantidade de fragmentos líticos e de feldspatos e, segundo a classificação de Dott (1964), são classificados preferencialmente como quartzo-arenitos e, secundariamente, como arenitos feldspáticos e líticos.

Com relação à caracterização da porosidade, o tipo intergranular é predominante, podendo ser classificada como secundária pela presença freqüente de cimentação parcialmente dissolvida no espaço poroso e, mesmo nos casos em que o poro não apresenta evidências de antiga cimentação, é observada a corrosão dos grãos do arcabouço e a presença de poros agigantados.

A porosidade intragranular é encontrada em algumas lâminas, principalmente nos grãos de feldspatos. A presença deste tipo de porosidade é observada tanto nas lâminas próximas à superfície, como em amostras retiradas de profundidades maiores que 200m. Os poros agigantados e a porosidade móldica, evidenciada muitas vezes pelo contorno de óxido ou hidróxidos de ferro preservados, são pouco freqüentes.

De forma resumida, as principais informações presentes nas descrições petrográfica e de testemunhos, para diferentes intervalos de profundidade no poço, são apresentadas a seguir.

0 - 33,6m. Neste intervalo há o predomínio de lamitos com grânulos e seixos esparsos de diversas litologias. Lâminas irregulares de arenitos estão distribuídas em vários níveis; uma camada de arenito fino ocorre entre 16,8 a 18m, sendo constituída por arenito feldspático bem selecionado, com presença de cimento carbonático, opacos e com pouca freqüência de argilominerais. O cimento carbonático se apresenta na forma de concreções, com dimensões aproximadas de 1mm. Através do microscópio eletrônico foi possível constatar que os argilominerais presentes nestes arenitos são do tipo caulinita e illita.

33,6 - 65,5m. Intervalo com predomínio de arenitos de granulção fina e média, estrutura maciça, que subordinadamente apresenta intercalações de lâminas de argilitos e siltitos e uma camada de conglomerados de 80cm. Nível mais significativo de siltito laminado, com lentes carbonosas, ocorre entre 62,1 a 62,5m. As lâminas delgadas de amostras de arenitos destacam a ausência de cimentação carbonática, maior participação de argilominerais e opacos, e arenitos classificados como feldspáticos e secundariamente quartzo-arenitos e líticos. Duas análises de difração de raios X indicaram a presença de illita e caulinita na profundidade de 55,5m e montmorilonita-illita em 62,5m.

65,5 - 106,1m. Intervalo com predomínio de lamitos de matriz fina com presença de lâminas irregulares de argila. Dentro deste intervalo ocorre um corpo de arenito médio maciço de 90cm, entre as profundidades de 72 a 72,9m, e camada mais espessa de arenito fino a médio entre 73 a 81,2m, apresentando estrutura maciça na base e laminações do tipo *climbing ripple-drift*, marcadas por níveis de opacos no topo.

Os arenitos presentes próximos ao topo da maior camada apresentam, predominantemente, cimentação de opacos e, de forma pouco freqüente, por carbonatos e argilas. Próximo à base da camada, em profundidade de 80m, a cimentação carbonática

passa a ser freqüente, ocorrendo como concreções que atingem até 3mm de diâmetro. Estes arenitos são classificados como feldspáticos e líticos. A análise de difração de raios X em amostra coletada a 67,5m constata a presença de montmorilonita, illita e clorita; a 95,5m, de illita e clorita, sendo que a análise total do sedimento, nesta profundidade, indica presença de carbonato.

106,1 – 153,2m. Intervalo constituído predominantemente por arenitos, que variam de granulometria fina a média, com presença de intraclastos argilosos, algumas porções com estruturas maciças, outras com laminações *climbing ripple-drift* e estratificação plano-horizontal. Em lâmina delgada, as amostras de arenitos apresentam cimentação carbonática muito freqüente, sendo possível observar concreções superiores a 3mm. Em alguns casos é evidente a associação da distribuição destas concreções com as porções de maior porosidade. Através de difração de raios X é identificada a presença de illita e clorita na fração argila.

153,2 – 167,9m. Lamitos com estratificação marcada no topo por níveis argilosos e arenosos. Entre o intervalo de 154,5 a 155,5m, ocorre camada de arenito muito fino com laminações do tipo *climbing ripple-drift*.

167,9 – 201,5m. Camadas de arenito muito fino e fino, intercaladas com argilitos. Os valores de permeabilidade neste intervalo são inferiores a 400mD, com ocorrência freqüente de cimentação carbonática e secundariamente por opacos. A difração de raios X da amostra retirada a 193,5m de profundidade indica a presença de clorita, illita e caulinita.

201,5 – 213m. Intervalo com predomínio de argilitos e ocorrência secundária de intercalações de arenitos de granulometria muito fina. A cimentação destes arenitos é por carbonatos e opacos.

213 – 296,75m. Este é o intervalo de maior espessura de arenitos, com predomínio da granulometria muito fina a fina; secundariamente ocorre camada de arenito fino-médio de 1,8m e 1m de conglomerado. A cimentação por carbonato predomina em todas lâminas analisadas, enquanto os opacos apresentam participação variável. Destaca-se um nível presente na profundidade de 276m, com todo arcabouço poroso preenchido por carbonato. A 256m é observada cimentação por sílica, na forma de sobrecrecimento de quartzo. Duas análises de difração de raios X indicaram, para a profundidade de 269m, a presença de illita e clorita e, para 293,5m, a ocorrência de illita, caulinita e clorita.

296,7 – 300m. Ritmito de silte e argila dispostos plano-horizontalmente.

DISCUSSÃO Segundo a classificação estratigráfica proposta por Soares *et al.* (1977) para a área aflorante do Grupo Itararé no Estado de São Paulo, o poço C-IG-98 está inserido na porção intermediária, definida como Itararé Médio, sendo composta por lamitos, arenitos finos e pelitos.

Particularmente na região de Capivari, como também observado na sucessão de litofácies atravessada pelo poço C-IG-98, verifica-se que os sedimentos finos e lamitos são mais freqüentes nas partes superiores, com predomínio de arenitos na base (Petri *et al.* 1996).

Segundo Petri & Pires (1992), a porção arenosa da base é associada a depósitos flúvio-deltaicos referentes à Formação Itu e os depósitos finos do topo à Formação Capivari. Esta seqüência litológica corresponderia a um episódio transgressivo marinho na região.

Com relação à qualidade do reservatório, são poucos os trabalhos sobre o assunto, podendo-se destacar o elaborado por Wu (1989) sobre a proveniência dos arenitos do Grupo Itararé aflorantes na área sul do Estado de São Paulo, e os trabalhos de França (1987) e França & Potter (1989), voltados à caracterização do reservatório para toda a unidade Itararé na Bacia do Paraná.

A contagem modal realizada para os arenitos aponta o predomínio de quartzo-arenitos, seguidos de arenitos feldspáticos e líticos. Os resultados assemelham-se, em parte, aos obtidos por Wu (1989), que observou o predomínio de arenitos feldspáticos, subordinadamente quartzo arenitos e raramente arenitos líticos.

Os resultados obtidos por França (1987) e França & Potter (1989), para as amostras referentes aos arenitos da Formação Taciba/Mb. Rio Ivaí, apresentam menor participação do quartzo e predomínio dos arenitos feldspáticos e líticos. O enriquecimento em quartzo para as amostras analisadas no poço pode estar relacionado a ação do intemperismo próximo a superfície, uma vez que as amostras analisadas por França (1987) e França & Potter (1989) são provenientes das porções profundas da unidade Itararé.

Em relação à análise do espaço poroso das amostras descritas, a porosidade do tipo intergranular é a mais freqüente em todas as lâminas e, secundariamente, ocorrem porosidades do tipo intragranular e móllica, resultados estes semelhantes aos encontrados por França & Potter (1989) e Wu (1989).

Através dos resultados obtidos, foi possível observar que a qualidade do reservatório, ditada pela porosidade e permeabilidade, é influenciada diretamente pela granulometria e pelo grau de seleção (argilosidade). Dentre as fácies referentes aos arenitos, a de granulometria muito fina apresenta baixos valores das características permo-porosas, comportando-se como barreiras ao fluxo, o mesmo não ocorrendo para arenitos de granulometria fina.

Embora este poço, como outros situados no município de Capivari, apresente como característica a alta porcentagem de arenitos, neste caso isto não implica em maior vazão. A região estudada apresenta valores médios de capacidade específica de 0,68m³/h/m, muito abaixo da capacidade específica encontrada nos municípios próximos, como Elias Fausto e Tietê (Vidal 2002).

Os resultados da análise de porosidade e permeabilidade indicam boas características de fluxo para a maioria dos arenitos amostrados no poço, com valores médios de porosidade superiores a 15% e permeabilidade com média de 204mD.

Com isso, as condições não favoráveis ao fluxo, na região de Capivari, podem estar associadas a outros fatores como a falta de conectividade dos corpos de arenitos, ao baixo gradiente hidráulico ou ao efeito de processos diagenéticos.

A análise dos resultados indicou que amostras de semelhante granulometria e grau de seleção, mas provenientes de diferentes profundidades, apresentaram significativa variação da permeabilidade, com os maiores valores das fácies de arenitos posicionadas no intervalo de 0 a 100metros.

Assim, foi possível diferenciar as rochas-reservatório do poço em duas zonas: a superior, entre 0-100m, com melhores condições permo-porosas; e o intervalo inferior, entre 100-300m, com condições menos favoráveis ao fluxo. Possivelmente, esta diferenciação da qualidade do reservatório é conseqüência dos processos diagenéticos que atuaram nestes sedimentos.

Ao observar as lâminas delgadas dos arenitos posicionados no intervalo superior, constata-se que dentre os processos diagenéticos encontrados, a dissolução dos minerais, cimentação por argila e óxidos de ferro são os predominantes.

Concreções carbonáticas foram encontradas em fina camada de arenito a 17m de profundidade. A preservação desta cimentação pode estar associada ao possível isolamento deste corpo, inserido em espessa camada de lamito.

O processo de dissolução de silicatos e carbonatos tem como

principal efeito o aumento da porosidade dos sedimentos, uma vez que a dissolução não é subsequentemente eliminada por compactação. Isto é ocasionado pela percolação de água meteórica, com características ácidas e de baixa salinidade, apresentando caráter agressivo e condições de subsaturação do fluido poroso para a maioria das fases minerais.

O efeito da dissolução é evidente no intervalo superior, com ocorrência de bordas corroídas nos grãos de silicatos, presença de porosidade do tipo móldica e de poros agigantados. A liberação de íons dissolvidos no meio poroso ocasiona a precipitação de minerais autigênicos, estáveis nestas condições. As principais fases de minerais que ocorrem neste intervalo são as de argilominerais e opacos. Neste caso, conforme observado através dos dados de porosidade e permeabilidade, a cimentação destas fases minerais teve pouca influência na diminuição da qualidade do reservatório.

França (1987), em sua proposta de seqüência diagenética para a unidade Itararé, insere os processos de dissolução e criação de porosidade secundária durante o estágio de telodiagenese ou diagênese tardia.

A cimentação por opacos ocorre na maioria das amostras analisadas, sendo também observada por Wu (1989), que aponta esta fase mineralógica como a mais freqüente nas amostras de superfície do Grupo Itararé. Apesar de ser predominante no intervalo superior, a fase mineralógica dos opacos ocorre em vários níveis do poço, e por isso não possibilita qualquer zoneamento nos 300 metros de testemunho.

Em relação aos argilominerais, os resultados obtidos através das análises de difração de raios X, como em microscópio eletrônico de varredura, indicam a presença de associações de caulinita, illita e esmectita ao longo de todo intervalo superior.

A cimentação por quartzo, associada a processos de telodiagenese e constatada em amostras de afloramento, foi descrita por França (1987) e Wu (1989). Nas amostras do poço em estudo, a cimentação por sílica foi observada no MEV, sob a forma de sobrecrescimento de quartzo. Neste caso, esta cimentação é menos freqüente quando comparada à cimentação por argila e opacos. Ao microscópio petrográfico a cimentação é de difícil identificação, devido a ausência de película de óxidos entre o grão e o cimento.

Como inferido acima, no intervalo inferior (100-300m) ocorre a diminuição dos valores de porosidade e permeabilidade em relação ao intervalo superior. Através da análise petrográfica, foi constatada, para as maiores profundidades no poço, a presença freqüente de cimentação carbonática e de clorita entre os argilominerais, fases minerais estas pouco freqüentes no intervalo superior.

A cimentação carbonática ocorre na forma poiquilótópica, como concreções que variam de diâmetro entre 1 a 3mm, na maioria das amostras coletadas entre 100 e 300m. Em algumas lâminas é observada a associação das concreções nas porções de maior tamanho de poros.

A cimentação carbonática é condicionada diretamente à composição da rocha, circulação de água, sobrecarga de sedimento e proximidade aos depósitos carbonáticos (Morad 1988).

O processo de formação das concreções e o efeito sobre a qualidade do reservatório tem sido alvo de grande número de trabalhos, sendo constatado que o maior eixo das concreções é orientado em relação às linhas de fluxo e sua ocorrência associada às porções de elevada permeabilidade (Pirrie 1987, Johnson 1989, McBride *et al.* 1994, Mozley & Davis 1996, White *et al.* 2003).

Nas amostras do poço, a associação das ocorrências de concreções às zonas de maior permeabilidade pode ser constatada, porém não é possível a definição da forma destas concreções, uma vez que as informações são provenientes de lâminas delgadas (visualização em duas dimensões).

A clorita é o segundo tipo mineral de ocorrência freqüente no intervalo de 100 a 300m. Todas as análises de difração de raios X realizadas neste intervalo indicam a presença deste mineral, que está ausente no intervalo superior. Os outros tipos de argilominerais, caulinita, illita e esmectita, ocorrem tanto na porção superior como inferior do poço.

Diagrama de estabilidade do sistema K_2O - MgO - Al_2O_3 - SiO_2 - H_2O para as fases caulinita, illita e clorita em relação ao pH e à concentração de potássio, em meio supersaturado em SiO_2 , indica o condicionamento da ocorrência de clorita para situação de pH alcalino (Garrels & Christ 1965). As fases illita e caulinita estariam em equilíbrio em condições ácidas, sendo a illita estável em fluido mais concentrado, enquanto a caulinita em condições de baixa salinidade.

A instabilidade da clorita, como dos carbonatos em condições de pH ácido é o principal fator para diferenciação das características do reservatório nas zonas definidas como superior e inferior.

As águas de recarga, com características ácidas devido ao equilíbrio com o CO_2 do solo, atuam nos processos de dissolução de silicatos e carbonatos, liberando para o meio íons que propiciam a precipitação de argilominerais e opacos. Com a percolação do fluido para porções mais profundas, o pH se torna mais alcalino, as reações de dissolução e substituição passam a ter menos impacto, até a situação de equilíbrio com as fases minerais da clorita e carbonato.

Este trabalho buscou quantificar o efeito dos processos diagenéticos sobre as características de fluxo do reservatório. Certamente, o adensamento das informações tanto ao longo do poço, como de outros localizados na mesma área, é de fundamental importância para a caracterização do reservatório e da interação rocha-fluido.

CONCLUSÕES Os dados analisados são referentes às informações obtidas de um único poço; no entanto, os resultados podem ser indicativos do comportamento do reservatório para a porção rasa da área aflorante do Grupo Itararé, no município de Capivari.

Embora a região de Capivari seja conhecida como de baixo potencial hídrico, os ensaios de porosidade e permeabilidade de amostras de testemunho do poço C-IG-98 demonstraram boas características permo-porosas para os arenitos. Assim, as baixas condições de fluxo podem estar associadas a outros fatores, como por exemplo a conectividade dos corpos arenosos.

Através dos resultados, pode-se observar que os valores de porosidade e permeabilidade são influenciados principalmente pela granulometria, grau de seleção e diagênese.

A diagênese tem grande importância na qualidade da rocha reservatório, ao definir duas zonas: superior (0-100m), com boas características de reservatório; e inferior (100-300m), com características de fluxo menos favoráveis.

A porção superior é caracterizada por processos de dissolução de silicatos, precipitação de argilas e opacos, conseqüência da influência de águas meteóricas de características ácidas. A porção inferior apresenta condições de pH alcalino e de equilíbrio com carbonatos e clorita entre os argilominerais.

Agradecimentos Os autores agradecem a revisão do texto pelo Prof. Dr. Thomas Rich Fairchild (IGcUSP). Ao Fundo de Apoio ao Ensino, à Pesquisa e à Extensão – FAEPEX, pelo auxílio à pesquisa (P/F:76/3 Solicitação 3105). Aos revisores da RBG pelas sugestões ao manuscrito.

Referências

- Bonet, E. J.; Gabrielli, M. L. 1985. *Propriedades das rochas*. Petrobrás/CENPES. Setor de Ensino Salvador.
- Caetano – Chang, M. R., 1984. *Análise Ambiental e estratigráfica do Subgrupo Itararé (PC) no sudoeste do Estado de São Paulo*. Tese de Doutorado, Inst. Geociências, Universidade de São Paulo.
- Diogo, A.; Bertachini, A.C.; Campos, H.C.N.S.; Rosa, R.B.G.S. 1981. Estudo preliminar das características hidráulicas e hidroquímicas do Grupo Tubarão no Estado de São Paulo. In: 3º SIMP. REG. GEOL., Curitiba, PR. Atas...SBG, Curitiba, 1:359-368.
- Dott, R. H. 1964. Wacke, Graywacke and matrix – what approach to immature sandstone classification? *Journal of Sedimentary Petrology*, 34:625-632.
- França, A. B. 1987. *Stratigraphy, depositional environment and reservoir analysis of the Itararé Group (Permo-Carboniferous), Paraná Basin – Brazil*. PhD thesis, University of Cincinnati, USA.
- França, A. B. & Potter, P. B. 1989. Estratigrafia e ambiente deposicional do Grupo Itararé (Permocarbonífero), Bacia do Paraná (Parte 2). *Bol. Geoc. Petrobrás*, 3 (1/2): 17-28.
- Fulfaro, V. J.; Stevaux, J. C.; Souza F₀, E. E.; Barcellos, J. H. 1984. A Formação Tatuí (P) no Estado de São Paulo. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 22, Rio de Janeiro, *Anais*, v.2, p.711-724.
- Garrels, R. M. E Christ, C.L., 1965. *Solutions, minerals and equilibria*. New York, Harper e Row.
- Johnson, M. R. 1989. Paleogeographic significance of oriented calcareous concretions in the Triassic Katberg Formation, South Africa. *Journal of Sedimentary Petrology*, v.59, p. 1008-1010.
- Mcbride, E. F., Picard, M. D., Folk, R. L. 1994. Oriented concretion, Ionian Coast, Italy: evidence of groundwater flow direction. *Journal of Sedimentary Research*, v. A64, p. 535-540.
- Morad, S. 1988. Carbonate cementation in sandstones: Distribution patterns and geochemical evolution. In Morad, S. ed. *Carbonate cementation in sandstones*. International association of Sedimentologists Special Publication No.26, p. 1-26.
- Mozley, P. S. & Davis, M. 1996. Relationship between oriented calcite concretions and permeability correlation structure in an alluvial aquifer, Sierra Ladrones Formation, New Mexico. *Journal of Sedimentary Research* vol. 66 n°. 1 p. 11-16.
- Oda, G. H.; Yoshinaga, S.; Iritani, M.A.; Hassuda, S.; Castro, S.A.P.; Hirata, R.C.A. 1990. Hidrogeologia da Folha de Salto de Pirapora (SP). In: 6º CONGR. BRAS. AG. SUBT., Porto Alegre, RS. *Anais*.ABAS, Porto Alegre: 164-173.
- Petri, S. & Pires, F. A. 1992. O Subgrupo Itararé (Permocarbonífero) na região do Médio Tietê, Estado de São Paulo. *Revista Brasileira de Geociências*, SBG, São Paulo, 22(3): 301-310.
- Petri, S.; Mendonça, C. A.; Bologna, M. S.; Coutinho, J. M. V.; Vieira, P. C. & Botelho, P. F. 1996. Correlação estratigráfica de poços para captação de água subterrânea na região Capivari/Rafard, SP: Descrições litológicas macroscópicas, microscópicas e perfis geofísicos. *Revista Brasileira de Geociências*, SBG, São Paulo, 26(1): 25-34.
- Pirrie, D. 1987. Oriented calcareous concretions from James Ross Island, Antarctica. *British Antarctic Survey Bulletin*, v. 75 p. 41-50.
- Soares, P. C.; Landim, P. M. B. Sinelli, O.; Werneck, E. F.; Fu-Tai, W. & Fiori, A.P. 1977. Associações litológicas do Subgrupo Itararé e sua interpretação ambiental. *Revista Brasileira de Geociências*, SBG, São Paulo, 7: 131-149.
- Stevaux, J. C.; Souza E. E., F^o; Teixeira, J. A.; Landim, P. M. B. 1987. Sistemas deposicionais do Subgrupo Itararé (P-C) na bacia hidrográfica do baixo Rio Capivari (SP): um modelo para prospecção de água subterrânea. In: SIMP. REG. GEOL., 6. Rio Claro, 1987. *Atas*. Rio Claro, SBG/NSP. V.1, p. 355-374.
- Vidal, A. C. 2002. *Estudo hidrogeológico do Aquífero Tubarão na área de afloramento da porção central do Estado de São Paulo*. Tese de Doutorado, Inst. de Geociências e Ciências Exatas/UNESP, Rio Claro.
- White, C. D., Novakovic D., Dutton, S. P.; Willis, B. J. 2003. A geostatistical model for calcite concretions in sandstones. *Mathematical Geology*, v. 35 n° 5 p.549-575.
- Wu, F. T. 1989. *Proveniência das rochas arenosas do Subgrupo Itararé no sul do Estado de São Paulo*. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, USP, São Paulo, 165p.

Manuscrito A-1533

Revisão aceita em 14 de junho de 2006