

ESTRATIGRAFIA E AMBIENTE DEPOSICIONAL DO GRUPO ITARARÉ (PERMOCARBONÍFERO), BACIA DO PARANÁ (PARTE 2)

STRATIGRAPHY, DEPOSITIONAL ENVIRONMENT, AND RESERVOIR ANALYSIS OF THE ITARARÉ GROUP (PERMO-CARBONIFEROUS), PARANÁ BASIN, BRAZIL (PART II)

Almério Barros França⁽¹⁾ e Paul Edwin Potter⁽²⁾

RESUMO — Este trabalho sintetiza os resultados de análise petrográfica e de reservatórios do Grupo Itararé (Permocarbonífero), Bacia do Paraná. Os resultados de análise estratigráfica e ambiental (Parte 1) foram publicados no volume 2, nº 2-4 desta revista. O Grupo Itararé possui basicamente dois tipos de arenitos: um com muita matriz argilosa, e pouca ou nenhuma porosidade, e acima de 50 unidades API no perfil de raios gama, o outro com baixo teor argiloso, porosidade de 5 a 30% e com menos de 50 unidades API. Estes arenitos porosos constituem os reservatórios do Grupo Itararé e são os objetivos principais deste trabalho. A porosidade nos reservatórios do Grupo Itararé é predominantemente intergranular secundária por dissolução de cimento carbonático, e secundariamente de feldspatos e fragmentos líticos instáveis. A dissolução ocorreu devido à ação de ácidos orgânicos liberados durante a fase inicial de termomaturação da matéria orgânica. É proposto que essa maturação teve início no Jurássico-Cretáceo, quando a bacia foi afetada por uma anomalia térmica regional, devido a afinamento crustal durante o rifteamento continental do Gondwana e abertura do Oceano Atlântico. O cimento predominante nos reservatórios do Grupo Itararé é composto por anidrita e dolomita ferrosa, ambos precipitados provavelmente após a criação da porosidade secundária. Em menor proporção ocorrem dolomita, clorita e quartzo, sendo que clorita ocorre preferencialmente a profundidades maiores que 3 000 m.

ABSTRACT — The present paper offers a petrographic and reservoir analysis of the Itararé Group, a Permo-Carboniferous glacial deposit in southern Brazil's Paraná Basin. Part I, dealing with stratigraphy and the depositional environment, appeared in Volume 2, nº 2-4 of this bulletin. The Itararé Group contains basically two types of sandstones: one clay-rich, displaying no porosity and gamma ray values of over 50 API units; the second contains little or no clay, displays less than 50 API units, and porosity ranging from five to 30%. Porosity is mostly secondary intergranular, due to the dissolution of early carbonate cement, with minor contribution of the dissolution of feldspars and lithics. The development of secondary porosity in the Itararé Group was probably contemporaneous with, or later than, the Gondwana break-up, when the Paraná Basin was affected by a regional thermal anomaly caused by the stretching and thinning of the lithosphere during the continental rifting and opening of the Atlantic Ocean. The thermomaturation of organic matter present in the Devonian black shales released carboxylic acids, promoting the dissolution of carbonate and feldspar and producing secondary porosity. Extensive dissolution observed in sandstones from shallow wells (e. g., 700 m deep) near the Paraná Basin's eastern outcrop belt is probably associated with the percolation of meteoric water through reservoirs in outcrops near the recharge zone. The most common cements found in Itararé Group reservoirs are anhydrite and Fe-dolomite, both probably precipitated following the appearance of secondary porosity. Minor cements include dolomite, Fe-calcite, chlorite, and quartz overgrowths. Chlorite occurs preferentially below 3,000 m deep.

(Originais recebidos em 24.05.88.)

1 — INTRODUÇÃO

Muito pouco se sabe a respeito de petrografia e análise de reservatórios do Grupo Itararé. FRANÇA (1984) é um dos poucos trabalhos publicados que trata de petrografia e diagênese de arenitos desse grupo. Este trabalho enfatiza os tipos de arenitos e diagênese, incluindo a estratigrafia de cimentos e tipos de poros. Um total de 95 lâminas petrográficas foram analisadas e 70 delas selecionadas para uma contagem de 200 pontos. Cada lâmina foi contada para quartzo monocristalino, quartzo poli-

cristalino, plagioclásio, feldspato potássico, fragmentos de rocha, matriz, porosidade e cimento. Todas as amostras foram impregnadas com resina azul, além de coloridas, para identificar calcita, dolomita e feldspato potássico. Algumas amostras foram atacadas com ferrociâneto de potássio para determinar a presença de carbonatos ricos em ferro.

2 — PETROGRAFIA

Tipos de Arenitos — A classificação proposta por DOTT (1964, p. 629) é adotada aqui (fig. 1) para classificar os areni-

- 1 - DEPEX/NEXPAR
R. Padre Camargo, 285, CEP
80060, Curitiba, Paraná, Brasil.
- 2 - University of Cincinnati,
Department of Geology,
Cincinnati, Ohio, 45221, USA.

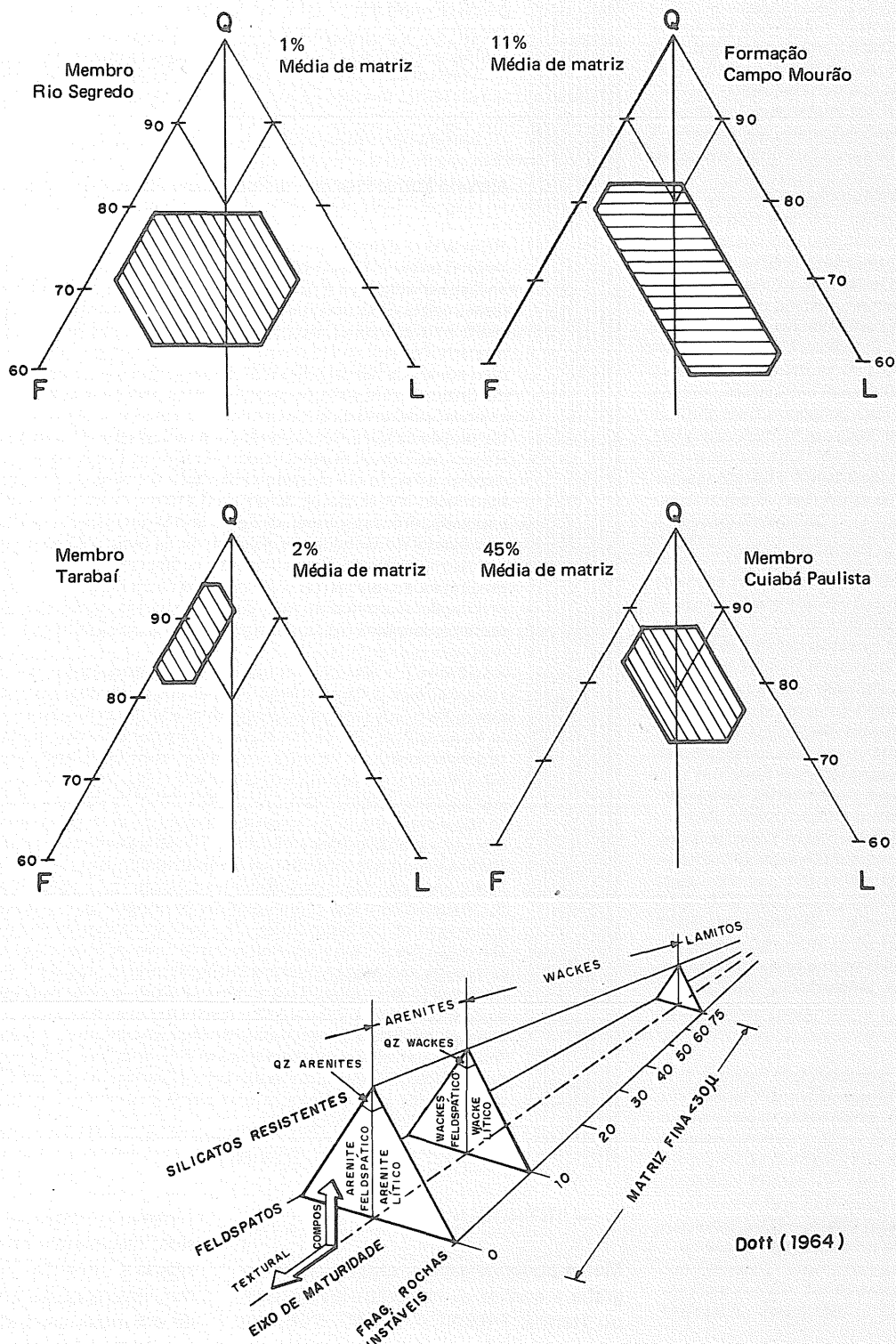


Fig. 1 - Classificação petrográfica dos arenitos do Grupo Itaré usando-se a classificação de DOTT (1964). Os arenitos dos membros Rio Segredo e Tarabá são classificados como arenites, enquanto os arenitos do Membro Cuiabá Paulista e Formação Campo Mourão são classificados como wackes.

Fig. 1 - Petrographic classification of Itaré Group sandstones, according to Dott's classification (1964). Rio Segredo and Tarabá Member sandstones are classified as arenites while Cuiabá Paulista Member and Campo Mourão Formation sandstones are classified as wackes.

tos do Grupo Itararé. Tal classificação tem a vantagem de usar a quantidade de matriz fina (partículas menores que 30 μ) como um fator básico na classificação de arenitos. Isto é especialmente útil para geólogos de petróleo que se preocupam com as propriedades de reservatórios dos arenitos. A determinação do teor de matriz é o primeiro passo na análise de um reservatório.

A figura 1 mostra que os arenitos do Membro Rio Segredo, a unidade arenosa mais superior no Grupo Itararé, possuem o menor teor de matriz, com apenas 1%, enquanto arenitos do Membro Cuiabá Paulista, que é a unidade arenosa inferior do Grupo Itararé, têm o mais alto teor de matriz, com cerca de 41%. Os arenitos do Membro Rio Segredo são arenites feldspáticos e arenites líticos, enquanto a maioria dos arenitos do Membro Cuiabá Paulista são wackes feldspáticos e wackes líticos.

Os arenitos do Membro Tarabá possuem maturidade composicional alta, e a maioria é composta por arenites quartzosos.

Os arenitos da Formação Campo Mourão possuem um teor médio de matriz em torno de 11%, e são classificados como wackes, porém próximo ao limite de 10% que limita a ocorrência dos arenites.

Portanto, baseando-se no conteúdo de matriz como uma análise inicial das qualidades de reservatórios, o Membro Rio Segredo, com apenas 1% de matriz em média, e os arenitos do Membro Tarabá, com 2% de matriz em média, têm o melhor potencial de reservatório no Grupo Itararé. Por outro lado, o Membro Cuiabá Paulista, com um teor médio de matriz em torno de 45%, tem o menor potencial de reservatório.

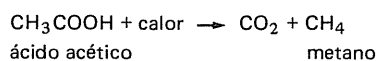
O conteúdo de matriz não é o único fator a ser considerado em análises de reservatório. Informações adicionais, tais como porosidade, cimentação e resultados de testes de formação, são necessárias antes de se concluir a respeito das potencialidades de qualquer reservatório.

Porosidade — A alta porosidade inicial dos arenitos logo após sua deposição pode ser reduzida ou mesmo eliminada como consequência de processos diagenéticos.

Entretanto, em estágios posteriores de diagênese, pode ocorrer o desenvolvimento de porosidade secundária graças à dissolução de grãos e/ou cimentos compostos por minerais instáveis, como carbonatos e sulfatos. Feldspatos e alguns tipos de fragmentos de rochas, tais como as vulcânicas, também podem se dissolver, criando porosidade secundária. Logo, porosidade em arenitos pode ser restaurada e até mesmo ampliada por diagênese em subsuperfície.

A dissolução e a lixiviação de feldspatos e cimentos carbonáticos são amplamente atribuídas à ação de ácidos carbônicos e carboxílicos (SCHMIDT & MCDONALD, 1979a, p. 179; SURDAM *et alii*, 1984, p. 142).

Ácidos carboxílicos são ácidos orgânicos produzidos durante a maturação da matéria orgânica (TISSOT *et alii*, 1974, p. 505; SURDAM *et alii*, 1984, p. 142). A produção de ácidos carboxílicos a partir da maturação térmica de querogênio começa em torno de 65 °C e alcança uma concentração máxima a aproximadamente 90 °C (SURDAM *et alii*, 1984, fig. 19). A temperaturas mais elevadas, os ácidos carboxílicos, tais como o ácido acético, são destruídos como resultado da decarboxilação, produzindo bióxido de carbono e metano, de acordo com a equação abaixo, transcrita de SURDAM *et alii* (1984, fig. 11):



Portanto, o estágio inicial de maturação da matéria orgânica produz ácidos carboxílicos que são corrosivos a feldspatos e carbonatos. Posteriormente, com o aumento de temperatura, a decarboxilação produz bióxido de carbono, que, na presença de água, forma ácido carbônico, induzindo a dissolução de carbonatos.

Estas reações ocorrem antes da geração

de hidrocarboneto líquido. Assim sendo, porosidade pode ser criada e/ou mesmo ampliada, produzindo condições favoráveis à migração e à acumulação do petróleo.

Rochas ígneas intrusivas constituem outra fonte possível de bióxido de carbono, conforme proposto por PARKER (1974, p. 75), que concluiu que bióxido de carbono liberado de rochas intrusivas, na Bacia do Sal do Mississipi na Costa do Golfo, foi responsável pelo desenvolvimento de porosidade secundária nos arenitos Smackover (Jurássico). Este fato é especialmente interessante para a exploração na Bacia do Paraná, devido às suas inúmeras intrusões ígneas.

A porosidade secundária pode ser identificada em lâminas, usando-se os critérios apresentados por SCHMIDT & MCDONALD (1979b). Quatro tipos principais de texturas de poros existem nos arenitos do Grupo Itararé:

Porosidade intergranular — A porosidade intergranular pode ser primária ou secundária pela dissolução de cimento preexistente. Poros intergranulares são facilmente reconhecidos como secundários se estiver presente remanescente do cimento dissolvido. Caso contrário, será difícil ou até mesmo impossível distingui-los de porosidade primária preservada.

A porosidade intergranular é a mais comum no Grupo Itararé. A maioria é de origem secundária por dissolução de cimento carbonático precoce, como, por exemplo, siderita parcialmente dissolvida, como observado na foto 1. A porosidade secundária intergranular pode ser deduzida também pela presença de grãos corroídos (foto 2) ou pela heterogeneidade de empacotamento, onde áreas com grãos aparentemente soltos e boa porosidade estão em contato com grãos altamente compactados.

Porosidade móldica — Porosidade móldica (foto 3) é aquela que detém o contorno do grão precursor. O contorno pode ser marcado por invólucros ou filmes insolúveis de minerais de argila, como illita, clorita ou hematita, ou então, co-

mo é mais comum no Grupo Itararé, pela presença de sobrecrecimentos (*overgrowths*), resistentes à corrosão.

Porosidade intraconstituente — Os poros desta categoria incluem todos aqueles que ocorrem dentro de grãos individuais. Pode ser intragranular, intramatriz e intracimento (SCHMIDT & MCDONALD, 1979b, p. 217). A porosidade intragranular pode ser formada pela dissolução parcial do mineral ou pela lixiviação seletiva de minerais solúveis em um fragmento de rocha, como, por exemplo, a dissolução de plagioclásios em fragmentos de basalto.

No Grupo Itararé, os poros intraconstituente são comuns nos arenitos líticos e arcoseanos, onde os feldspatos e fragmentos de vulcânicas exibem dissolução parcial. A porosidade intrapartícula pode ter pouca conexão com a rede principal de poros e, portanto, ser pouco efetiva com respeito à qualidade do reservatório.

Porosidade alarguecida — Poro alarguecido foi definido por SCHMIDT &

MCDONALD (1979b, p. 213) como aquele que exceda o diâmetro dos grãos adjacentes por um fator mínimo de 1,2. Normalmente, este tipo de poro se desenvolve pela dissolução de cimento e grãos adjacentes. Poros alarguecidos (foto 2) não são comuns no Grupo Itararé, possivelmente devido a rearranjo dos grãos após a dissolução.

Cimento — Existe uma grande variedade de cimento nos arenitos do Grupo Itararé. A descrição de seus diferentes tipos observados e alguns aspectos de relação temporal entre eles estão apresentados a seguir, do cimento mais antigo para o mais recente.

Siderita — Apesar de não ser abundante, a siderita está presente como pequenos cristais amarronzados, sempre exibindo dissolução parcial (foto 1). O contato entre siderita e grãos constituintes do arcabouço é comumente corrosivo, com cimento substituindo quartzo e feldspato. Os contatos entre siderita e poro são sempre irregulares, mostrando dissolução. Dissolução intra-siderita é também comum (foto 1). Estas feições são inter-

pretadas como evidências de que siderita é um cimento precoce e provavelmente o mais antigo observado nas lâminas analisadas.

Apesar de a siderita ser relativamente rara quando comparada com outros cimentos, é a mais importante no desenvolvimento de reservatórios do Grupo Itararé. Sua presença precoce na seqüência diagenética manteve os grãos detritais separados sustentando o arcabouço durante a compactação. Posteriormente, com a ação de ácidos orgânicos e águas ricas em ácido carbônico, o cimento siderítico foi dissolvido, criando a maioria da porosidade intergranular secundária presente no Grupo Itararé. Os arenitos com boa porosidade primária que não tiveram cimentação inicial por siderita ou outro mineral solúvel provavelmente sofreram alta compactação e intensa cimentação por quartzo, perdendo suas qualidades de reservatório.

Sobrecrecimento de quartzo — Este é um tipo de cimento relativamente comum no Grupo Itararé (foto 4). A cimentação por quartzo foi mais intensa

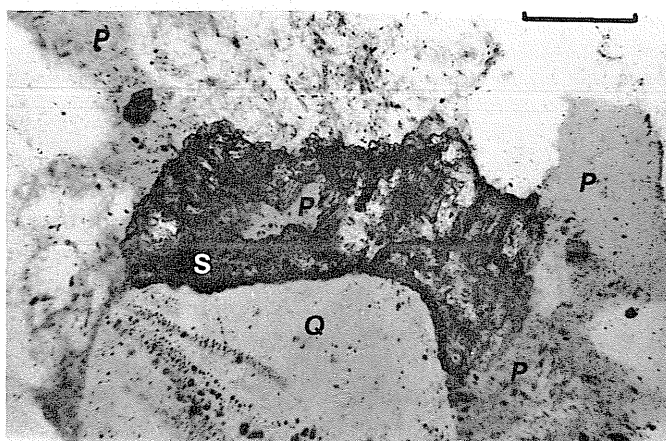


Foto 1 - Cimento de siderita. Exemplo de cimento de siderita (S) em dissolução parcial criando porosidade secundária (P). Membro Tarabai, poço 2-CB-1-SP, 4 478 m. Luz natural (LN), escala = 0,1 mm. Q = quartzo.

Photo 1 - Siderite cement. Example of siderite cement (S) in partial dissolution creating secondary porosity (P). Tarabai Member, well 2-CB-1-SP, 4478 m. Natural lighting (LN), scale = 0.1 mm. Q = quartz.

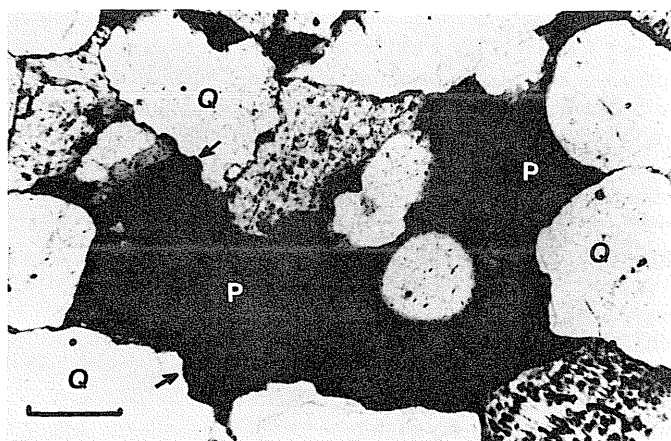


Foto 2 - Poro alarguecido. Poro alarguecido (P) pela dissolução total de cimento e/ou grãos adjacentes. Notar a corrosão dos grãos pelo cimento que antes ocupava o espaço poroso (setas). Formação Campo Mourão, poço 2-AA-1-SP, 2 997 m. LN, escala = 0,1 mm. Q = quartzo.

Photo 2 - Oversized pore. Pore oversized (P) by total dissolution of cement and/or adjacent grains. Note grain corrosion caused by the cement which formerly occupied the porous space (arrows). Campo Mourão Formation, well 2-AA-1-SP, 2997 m. LN, scale = 0.1 mm. Q = quartz.

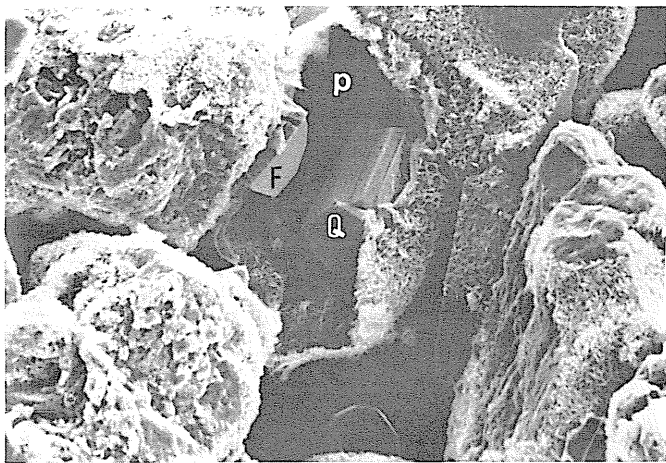


Foto 3 - Poro mólidico. Exemplo de porosidade mólidica (P) criada pela dissolução completa de grão instável preservando o invólucro de argila. No espaço deixado pela dissolução houve formação de quartzo (Q) e feldspato (F). Membro Tarabá, poço 3-CB-2-SP, 4 699 m. MEV, escala = 50 μ m.

Photo 3 - Moldic pore. Example of moldic porosity created by the complete dissolution of instable grain, preserving the clay covering. Quartz (Q) and feldspar (F) formed in the space left by this dissolution. Tarabá Member, well 3-CB-2-SP, 4699 m. SEM, scale = 50 μ m.

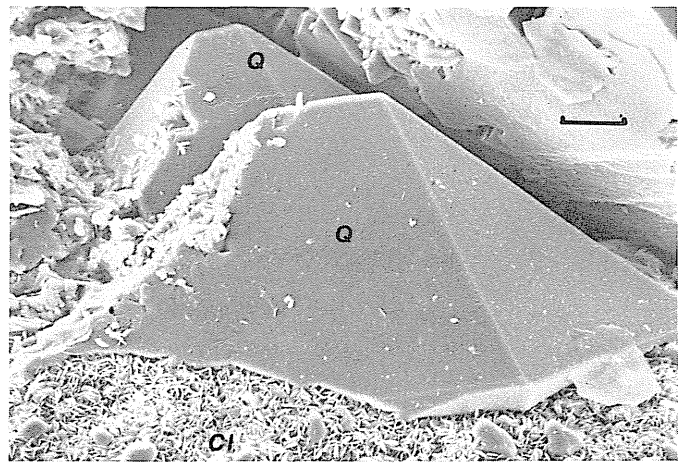


Foto 4 - Sobrecrescimento de quartzo. Este tipo de cimentação, embora comum no Grupo Itararé, só é importante no Membro Cuiabá Paulista (unidade basal), onde afetou consideravelmente seus reservatórios arenosos. Formação Campo Mourão, poço 2-AA-1-SP, 2 298 m. MEV, escala = 20 μ m. Q = quartzo, Cl = clorita.

Photo 4 - Quartz overgrowth. Although this type of cementation is common in the Itararé Group, it only assumes any level of importance in the Cuiabá Paulista Member (basal unit), where sandy reservoirs were substantially affected. Campo Mourão Formation, well 2-AA-1-SP, 2298 m. SEM, scale = 20 μ m. Q = quartz. Cl = chlorite.

no Membro Cuiabá Paulista, que é a unidade mais inferior do Grupo Itararé. A possível explicação para a alta concentração de cimento quartzoso na unidade mais profunda do Grupo Itararé é o alto grau de compactação, que aumentou a dissolução por pressão e, conseqüentemente, a liberação de sílica, que deve ter se reprecipitado nos espaços vazios remanescentes.

Portanto, os arenitos com baixa leitura de raios gama no Membro Cuiabá Paulista (figs. de 10 a 14 – parte I deste artigo) se encontram bastante cimentados por quartzo, razão pela qual os testes de formação realizados nesta unidade revelaram intervalos fechados, em alguns casos sem produção de fluido.

Sobrecrescimento de quartzo provavelmente ocorreu ao longo de praticamente toda a história de soterramento do Grupo Itararé.

Anidrita – Anidrita é o cimento mais comum e abundante no Grupo Itararé. Ocorre como grandes cristais poiquilótópicos envolvendo vários grãos (foto 5) ou como pequenos cristais preenchendo poros. O contato entre os cristais de anidrita e os grãos do arcabouço pode ser corrosivo, exibindo penetração do cimento nos grãos. Os contatos entre os cristais de anidrita e cimentos carbonáticos são retos e abruptos, sugerindo crescimentos contemporâneos. Os contatos entre anidrita e poro são quase

sempre retos, o que é uma evidência de cimentação tardia, ou seja, após o desenvolvimento da porosidade secundária. Raramente os cristais de anidrita mostram corrosão e, neste caso, sugerem dissolução local.

Dolomita ferrífera – Dolomita rica em ferro é também abundante nos arenitos do Grupo Itararé. A identificação de

dolomita ferrífera é possível atacando-se as lâminas com ferrocianeto de potássio, o que colore este mineral de azul. Dolomita rica em ferro está presente até grandes profundidades, como 4 500 m, e ocorre principalmente como grandes cristais poiquilótópicos, e também como cristais rômnicos isolados e como mosaico de cristais equantes. O contato entre dolomita ferrífera e grãos do arca-

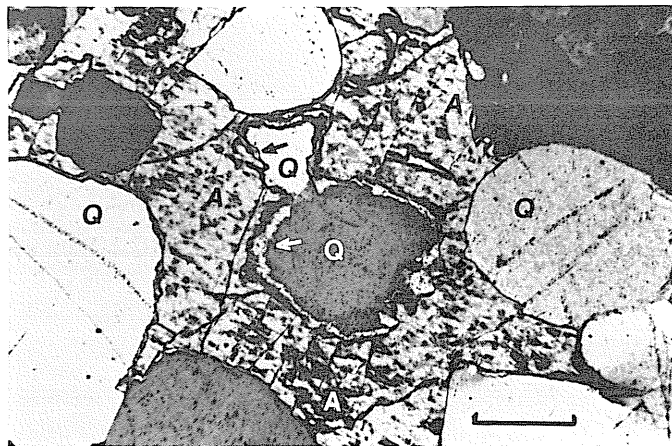


Foto 5 - Cimento de anidrita. Exemplo de anidrita poiquilótópica (A), que é o cimento mais comum e abundante no Grupo Itararé. Notar a corrosão dos grãos de quartzo (seta) provocada pela anidrita. Formação Campo Mourão, poço 2-RI-1-PR, 3 285 m. Nicóis cruzados (NX), escala = 0,1 mm. Q = quartzo.

Photo 5 - Anhydrite cement. Example of poikilotopical cement (A), the most common and abundant type in the Itararé Group. Note corrosion of quartz grains (arrow) caused by the anhydrite. Campo Mourão Formation, well 2-RI-1-PR, 3285 m. Crossed nicols (NX), scale = 0.1 mm. Q = quartz.

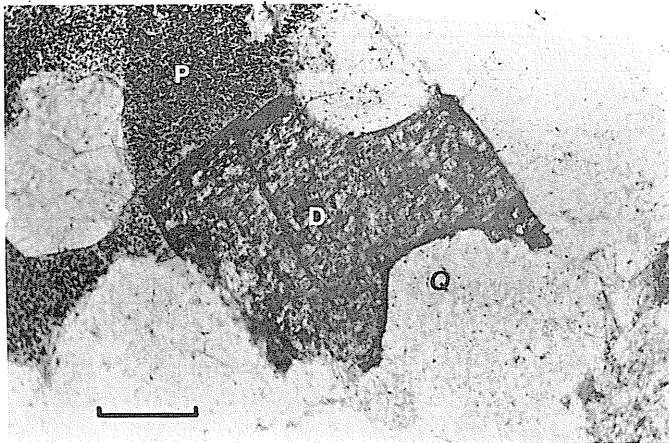


Foto 6 - Cimento de dolomita ferrífera. Cristal de dolomita rica em ferro (D), que cresceu em um poro secundário (P), sugerindo cimentação tardia. Observar as faces retas bem formadas do romboedro de dolomita. Formação Campo Mourão, poço 3-CB-3-SP, 4 484 m. LN, escala = 0,1 mm.

Photo 6 - Ferriferous dolomite cement. Iron-rich dolomite crystal (D) which grew in a secondary pore (P), suggesting late cementation. Note the well-formed straight faces sides of the dolomite rhombohedra. Campo Mourão Formation, well 3-CB-3-SP, 4484 m. LN, scale = 0.1 mm.

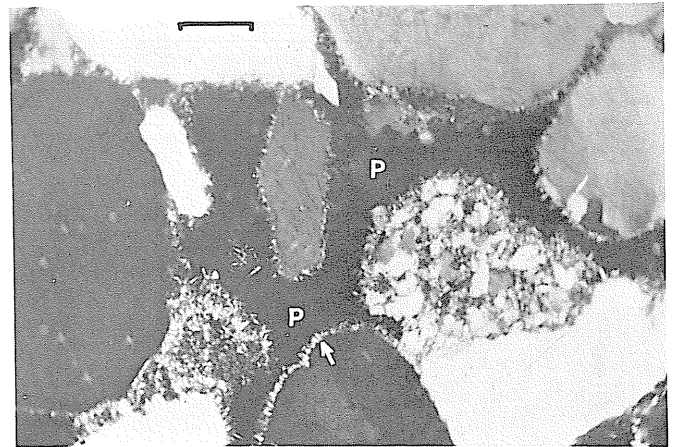


Foto 7 - Cimento acicular de clorita. Exemplo de agulhas de clorita (seta), crescendo em volta dos grãos detritais. Presença também de algumas rosetas de clorita preenchendo o espaço poroso (P). Formação Campo Mourão, poço 2-CB-1-SP, NX, escala = 0,1 mm. Ver foto 8 para detalhes.

Photo 7 - Acicular chlorite cement. Example of chlorite needles (arrow), growing around debris grains. Some chlorite rosettes are also found filling the porous space (P). Campo Mourão Formation, well 2-CB-1-SP, NX, scale = 0.1 mm. See photo 8 for details.

bouço pode ser corrosivo, enquanto as bordas em contato com o espaço poroso são principalmente retas e abruptas, sugerindo que a precipitação de dolomita ferrífera é posterior à formação da porosidade secundária (foto 6).

Calcita ferrífera — Apesar de não ser abundante no Grupo Itararé, calcita fer-

rífera ocorre com certa abundância no poço 2-AA-1-SP em testemunho cortado a 2 300 m. Calcita rica em ferro se tingiu de roxo na presença de ferrocianeto de potássio. Ocorre como cristais poiquilótópicos e pequenos cristais isolados. A exemplo dos cimentos de anidrita e dolomita ferrífera, os cristais de calcita ferrífera também possuem faces retas e

abruptas em contato com poros, sugerindo cimentação tardia.

Clorita — Clorita é um mineral bastante comum no Grupo Itararé e ocorre como cimento e matriz. Como cimento, foi observada somente em amostras abaixo de 3 080 m (cerca de 65 °C, considerando-se o atual gradiente de 2,2 °C/100 m). Ocorre principalmente em três tipos diferentes de textura.

Rosetas de clorita são a textura mais comum e ocorrem preenchendo total ou parcialmente os poros de arenitos abaixo de 3 000 m de profundidade.

Agulhas de clorita foram observadas somente em profundidades além de 4 400 m (foto 7). As agulhas vistas em lâminas são, na realidade, a visão bidimensional de flocos ou lâminas de clorita que estão radialmente presas aos grãos detritais (foto 8).

Clorita fibrosa radial com cor de interferência azul violácea, provavelmente devido ao mineral penina (clorita rica em ferro), ocorre em testemunhos do poço 1-CS-2-PR a 3 100 m de profundidade.

No poço 2-AA-1-SP, observou-se clorita preenchendo a parte basal dos poros, considerada aqui como uma textura geopetal diagenética (foto 9). Baseando-se em seu modo de ocorrência, sugere-se que a clorita, neste caso, foi introduzida

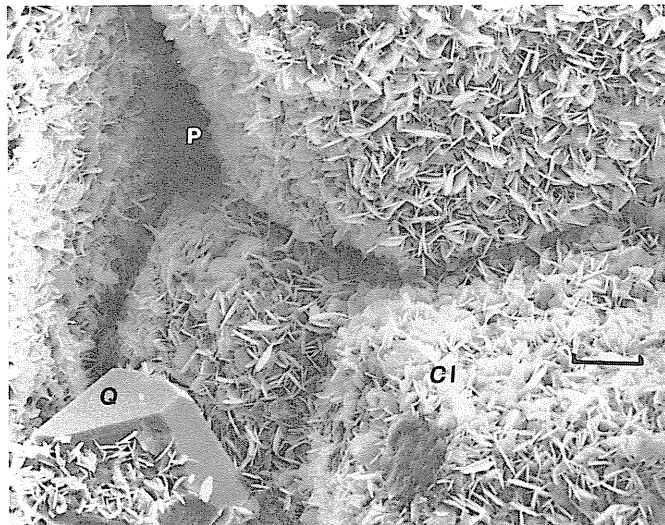


Foto 8 - Flocos de clorita. Flocos ou lamelas de clorita (Cl) envolvendo grãos e reduzindo as gargantas de poros (P). Em seção delgada os flocos de clorita se apresentam como agulhas radiais, conforme visto na foto 7. Membro Tarabai, poço 2-CB-1-SP, 4 015 m. MEV, escala = 12,5 µm.

Photo 8 - Chlorite flakes. Chlorite flakes, or lamellas (Cl), surrounding grains and reducing pore throats (P). In thin section, chlorite flakes resemble radial needles, as seen in photo 7. Tarabai Member, well 2-CB-1-SP, 4015 m. SEM, scale = 12.5 µm.

mecanicamente após o desenvolvimento da porosidade secundária.

Calcita — Calcita é um mineral relativamente raro nos arenitos analisados do Grupo Itararé. Ocorre preenchendo fraturas e raramente em poros intergranulares. São os maiores cristais observados e podem alcançar até 8 mm de comprimento dentro das fraturas.

Outros — Os cimentos mais importantes e abundantes no Grupo Itararé foram descritos acima; entretanto, existem outros tipos que ocorrem com menor freqüência, tais como dolomita, pirita e

mente com leitura de raios gama menor ou igual a 50 unidades API, e outro rico em matriz, com resposta de raios gama acima de 50 unidades API. O primeiro tipo foi depositado em ambiente com alta energia deposicional e possui boa porosidade, enquanto o arenito rico em matriz se depositou em ambiente com baixa energia deposicional e possui pouca ou nenhuma porosidade.

Carbonatização — Siderita é o cimento mais antigo identificado no Grupo Itararé. Trata-se de um evento importante na evolução de seus reservatórios, pois a corrosão e a substituição de grãos do ar-

do interpenetração, dissolução por pressão e, conseqüentemente, cimentação silícosa.

Dissolução — A dissolução de cimento criando porosidade secundária intergranular foi, para o Grupo Itararé, volumetricamente mais importante do que a dissolução de grãos detritais. A dissolução foi, possivelmente, contemporânea, ou ocorreu logo após a grande atividade ígnea na Bacia do Paraná durante o Jurássico e Cretáceo Inferior, quando ocorreu a separação do Gondwana. Nesta época, as rochas geradoras devem ter recebido fluxo de calor para a maturação térmica e conseqüente liberação de ácidos orgânicos e bióxido de carbono. O fluxo de calor aqui sugerido é relacionado com eventos térmicos de caráter regional durante o rifteamento continental que provocou a separação entre a América do Sul e África.

JOWETT (1986, p. 1826) sugere que a extensão continental é geralmente causada por alongação e afinamento da litosfera, o que eleva a astenosfera, produzindo uma anomalia térmica regional. O mesmo autor sugere também que esta anomalia térmica pode ser dissipada através da litosfera por condução ou por células convectivas e propõe que a porosidade secundária e a mineralização dos depósitos de cobre e prata (*Kupferschiefer*) na Polônia se devem a celas de convecção coincidentes com o rifteamento continental associado à abertura do Mar de Tétis, no Triássico e Jurássico.

Analogicamente, na Bacia do Paraná, os fluxos de calor oriundos da anomalia térmica regional produzida durante a abertura do Oceano Atlântico provavelmente alcançaram os folhelhos da Formação Ponta Grossa, iniciando ou mesmo acelerando processos de maturação já em andamento. Fluxos de calor oriundos de intrusões de diabásio, nos folhelhos das formações Ponta Grossa e Irati, também contribuíram para a maturação da matéria orgânica, liberando ácidos orgânicos e hidrocarbonetos.

Observou-se extensa dissolução em arenitos provenientes de poços rasos, perfurados próximos à faixa de afloramen-

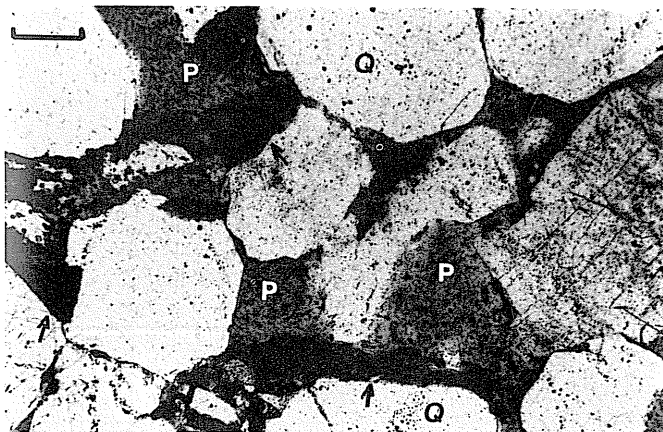


Foto 9 - Cimento geopetal. Preenchimento geopetal por clorita (setas) infiltrada após a criação da porosidade secundária (P). Notar a corrosão dos grãos por cimentação provavelmente carbonática. Formação Campo Mourão, poço 2-AA-1-SP, 2 300 m. LN, escala = 0,1 mm. Q = quartzo.

Photo 9 - Geopetal cement. Geopetal filling by chlorite (arrows) which filtered in following the creation of secondary porosity (P). Note grain corrosion caused by cementation (probably carbonate). Campo Mourão Formation, well 2-AA-1-SP, 2300 m. LN, scale = 0.1 mm. Q = quartz.

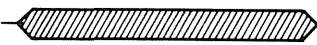
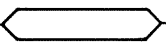
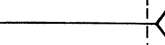



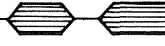
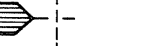
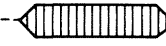
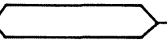

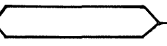

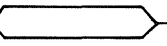



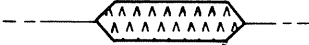
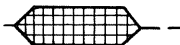

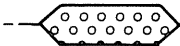

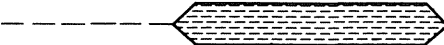
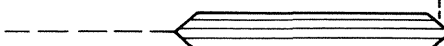
sobrecrescimentos de feldspato.

Seqüência diagenética — Baseando-se nas evidências observadas em lâminas, propõe-se que a seqüência diagenética (fig. 2) para a maioria dos arenitos do Grupo Itararé, a partir de sua deposição, seja a seguinte:

Deposição — O Grupo Itararé possui, basicamente, dois tipos de arenitos: um com pouca ou nenhuma matriz, geral-

cabouço aumentaram o espaço intergranular. Além disso, a cimentação precoce por siderita sustentou o arcabouço durante a compactação.

Compactação mecânica — A compactação mecânica é mais eficiente nos arenitos líticos, especialmente naqueles com considerável quantidade de material relativamente plástico, tais como clásticos de folhelho. Nas zonas com pouca cimentação precoce, os grãos detritais foram pressionados entre si, ocasionan-

* ESTÁGIOS	EOGENÉTICO	MESOGENÉTICO IMATURO	MESOGENÉTICO MATURO 'A'	MESOGENÉTICO MATURO 'B'	TELOGENÉTICO PRÓXIMO AOS AFLORAMENTOS
PROCESSOS	CIMENTAÇÃO	COMPACTAÇÃO	DISSOLUÇÃO	CIMENTAÇÃO	DISSOLUÇÃO
SIDERITA					
QUARTZO					
ANIDRITA					
Fe-DOLOMITA					
Fe-CALCITA					
INTRODUÇÃO DE CLORITA					
CLORITA					
SEPARAÇÃO DO GONDWANA					
ATIVIDADE ÍGNEA					
FRATURAMENTO					
DECARBOXILAÇÃO					
POROSIDADE SECUNDÁRIA					
GERAÇÃO DE HIDROCARBONETO					
MIGRAÇÃO DE HIDROCARBONETO					

*. DE ACORDO COM SCHMIDT & MACDONALD (1979, p.205)

L.C.M

Fig. 2 - Seqüência diagenética proposta para o Grupo Itararé. Notar os eventos principais, como a cimentação precoce por siderita e a criação de porosidade secundária contemporânea à separação do Gondwana.
 Fig. 2 - Diagenetic sequence proposed for the Itararé Group. Note main events, such as early siderite cementation and the creation of secondary porosity contemporaneous with the separation of Gondwana.

to, como, por exemplo, 2-PN-1-SP (topo do Grupo Itararé a 272 m de profundidade). É provável que a extensa dissolução nestes poços rasos seja um processo associado com a percolação de águas meteóricas, ricas em bióxido de carbono e ou ácidos húmicos.

Rearranjo dos grãos — Este é um evento difícil de se detectar em lâminas. De acordo com SCHMIDT & MCDONALD (1979a, p. 198), a perda de porosidade pelo rearranjo dos grãos é caracterizada por pequena compactação, que reduz a porosidade secundária, e por diagênese de quartzo.

Precipitação de carbonatos e sulfatos — Este estágio é caracterizado por cimentação de anidrita, dolomita ferrífera, calcita ferrífera e calcita. A característica principal dos cimentos formados neste estágio é o contato reto e abrupto entre as faces dos cristais e o espaço poroso. A relação temporal entre os quatro tipos de cimento deste estágio não é clara, mas eles podem ser contemporâneos.

Introdução mecânica de clorita — Este evento foi observado apenas localmente, e a evidência de tempo da introdução de clorita não é confiável. Estudos adicionais devem ser feitos com vistas a melhor determinação do tempo de formação deste cimento.

Precipitação de clorita — A presença de clorita como cimento foi observada apenas abaixo de 3 080 m e é interpretada aqui como um dos cimentos mais tardios nos arenitos do Grupo Itararé.

A figura 3 é um diagrama de fluxo que mostra os caminhos mais prováveis seguidos pelos arenitos do Grupo Itararé, desde sua deposição até o presente. Propõe-se que o ferro liberado da dissolução de siderita teria sido remobilizado para formar dolomita ferrífera, calcita ferrífera e clorita — cimentos tardios do Grupo Itararé.

Potencial de reservatório — Os resultados de testes de formação são, provavelmente, os melhores indicadores diretos da qualidade de reservatórios. Os testes de formação realizados no Grupo Itararé

revelaram boa permeabilidade, como, por exemplo, 2-CB-1-SP (lentes arenosas do Membro Tarabá), com vazão de 85 000 m³ de gás/dia; 2-RP-1-PR (arenitos da Formação Campo Mourão), com vazão de 21 000 m³ de gás/dia; 1-CS-2-PR (arenitos da Formação Campo Mourão), com vazão de 17 000 m³ de gás e condensado/dia ou mesmo surgência de água (2-AA-1-SP — arenitos da Formação Campo Mourão). Tais resultados sugerem um *cut-off* de 10% de porosidade e 50 unidades API de raios gama, ou seja, os arenitos que apresentarem valores de porosidade superiores ou iguais a 10% e leituras de raios gama menores ou iguais a 50 unidades API são considerados potencialmente bons reservatórios no Grupo Itararé.

Construiu-se um mapa isolítico dos arenitos com raios gama menores ou iguais a 50 unidades API e porosidade maior do que 10% (fig. 4). Esta tentativa de mapear os arenitos potencialmente bons reservatórios no Grupo Itararé mostra que as isóliticas dos reservatórios são aproximadamente paralelas à borda leste da Bacia do Paraná e que a qualidade de reservatório nos arenitos do Grupo Itararé diminui em direção à parte central da bacia. Isto se deve, provavelmente, à maior compactação na parte profunda da bacia, que reduz a porosidade, e à atuação de águas meteóricas na borda da bacia, que contribui com dissolução, aumentando a porosidade próximo à zona de afloramentos.

3 — CONCLUSÕES

Basicamente, existem dois tipos de arenitos no Grupo Itararé, um com alto teor de argila, comumente com leituras de raios gama acima de 50 unidades API, com porosidade baixa ou ausente; outro com baixo conteúdo de argila e que deve ter se depositado em um ambiente com energia deposicional relativamente alta (depósitos fluviais do tipo *braided*, *eskers*, turbiditos). Este tipo de arenito comumente possui leituras de raios gama menores que 50 unidades API com porosidade de até 30%. A porosidade é predominantemente secundária e prepondera o tipo intergranular que se formou por dissolução de cimen-

to carbonático precoce (siderita é o cimento mais antigo identificável). A dissolução de feldspato e líticos também contribuiu para a formação da porosidade nos arenitos do Grupo Itararé.

O desenvolvimento de porosidade secundária no Grupo Itararé é, provavelmente, contemporânea, ou ocorreu após a fragmentação do Gondwana, quando a Bacia do Paraná foi afetada por uma anomalia térmica de caráter regional produzida durante a abertura do Oceano Atlântico. Este evento deve ter acelerado a maturação térmica da matéria orgânica em rochas geradoras (provavelmente folhelho da Formação Ponta Grossa), liberando ácidos carbônicos que lixiviaram cimentos, feldspatos e outros minerais instáveis, criando o imenso volume de porosidade secundária encontrada no Grupo Itararé.

A cimentação mais importante ocorreu após a formação da porosidade secundária e constituiu-se de anidrita e dolomita ferrífera. A cimentação por quartzo é importante no Membro Cuiabá Paulista (unidade basal do Grupo Itararé), afetando extensivamente os arenitos desta unidade. Esta cimentação por quartzo e o alto teor de matriz explicam os resultados de testes de formação realizados no Membro Cuiabá Paulista, onde a maioria não mostrou sequer produção de fluido.

Os reservatórios do Grupo Itararé podem ser mapeados usando-se um *cut-off* de porosidade em torno de 10% e de raios gama em torno de 50 unidades API. Baseando-se nestes dados, verifica-se que o Membro Rio Segredo e a parte superior da Formação Campo Mourão apresentam o maior volume de reservatórios no Grupo Itararé. Sugere-se o Membro Rio Segredo como o melhor prospecto para hidrocarbonetos no Grupo Itararé, pois é constituído por corpos arenosos espessos (até 50 m), que possuem boa continuidade lateral e são capeados por folhelho do Membro Rio do Sul ou lamitos seixosos do Membro Chapéu do Sol. Convém mencionar que nenhum poço foi perfurado em estrutura fechada neste nível para se verificar sua potencialidade.

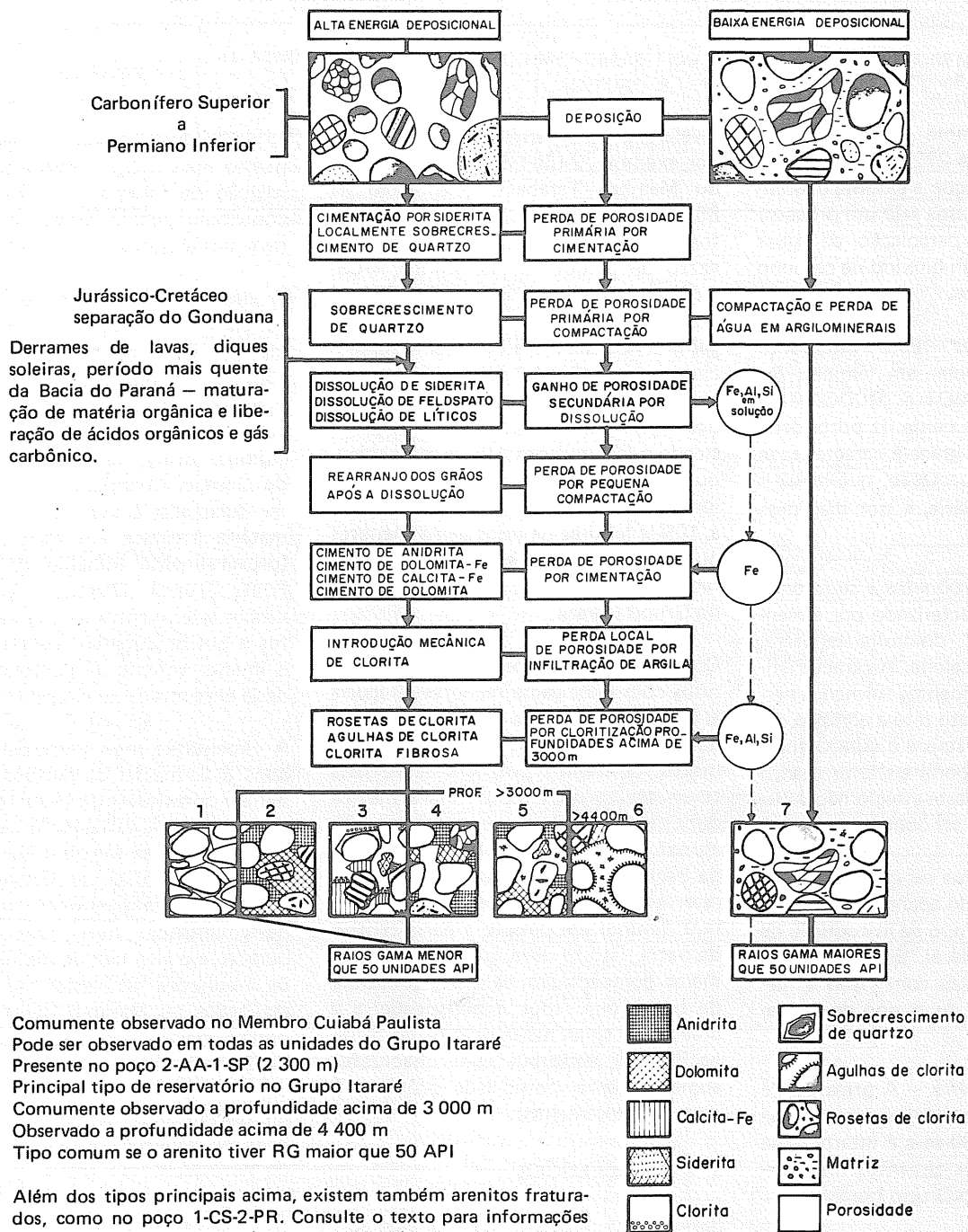


Fig. 3 - Diagrama de fluxo mostrando os caminhos mais prováveis seguidos pelos arenitos do Grupo Itararé. Os arenitos com pouca matriz argilosa e boa porosidade inicial foram cimentados por siderita. Durante a diagênese, estes arenitos desenvolveram porosidade secundária por dissolução de cimento carbonático. São identificados no perfil de raios gama (arenitos com raios gama menores que 50 unidades API) e comumente formam os bons reservatórios no Grupo Itararé. Os arenitos com muita matriz argilosa e pouca ou nenhuma porosidade inicial não desenvolveram porosidade secundária e não constituem reservatório no Grupo Itararé. Estes arenitos possuem valores de raios gama acima de 50 unidades API.

Fig. 3 - Flowchart showing the most likely pathways followed by Itararé Group sandstones. Sandstones with little clay matrix and good initial porosity were cemented by siderite. During diagenesis, these sandstones developed secondary porosity due to the dissolution of carbonate cement. They are identifiable on gamma ray logs (sandstones with gamma ray values under 50 API units) and usually form the Itararé Group's good reservoirs. Sandstones with much clay matrix and little or no initial porosity did not develop secondary porosity and have not constituted any reservoir in the Itararé Group. Gamma ray values for these sandstones are above 50 API units.

A Bacia do Paraná ainda é uma bacia praticamente inexplorada, e a presença de porosidade secundária nos arenitos do Grupo Itararé, mesmo a grandes profundidades, como 4 600 m, indica que reservatórios estão presentes e, mais importante ainda, que estes se formaram graças à ação de ácidos carboxílicos liberados durante a maturação térmica de matéria orgânica. Logo, a presença de reservatórios com porosidade secundária pode ser utilizada como indicador da existência de rocha geradora, bem como de maturação térmica. A presença de rochas-reservatório, geradora e a indicação de maturação térmica são três fatores importantes que estimulam a exploração de hidrocarbonetos em uma bacia sabidamente de alto risco como a Bacia do Paraná.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho é baseado na tese de doutorado apresentada por Almério Barros França ao Departamento de Geologia da Universidade de Cincinnati – Ohio (EUA), tendo como orientador principal o professor Dr. Paul Edwin Potter. O trabalho de tese só foi possível graças a uma bolsa do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq. Agradeço também a Petróleo Brasileiro S.A. – PETROBRÁS, pela liberação dos dados de poços. Pedro de Césero e Luiz Fernando De Ros (PETROBRÁS – CENPES) me auxiliaram com fotomicrografias e na organização do manuscrito. Agradeço também a Leopoldo Calligaris Netto, que desenhou as figuras deste artigo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- DOTT, R. H. 1964. Wacke, Graywacke and matrix – what approach to immature sandstone classification? *Journal of Sedimentary Petrology*, 34: 625-32.
- FRANÇA, A. B. 1984. Porosidade secundária nos arenitos das formações Rio Bonito e Itararé e sua possível implicação na exploração de petróleo

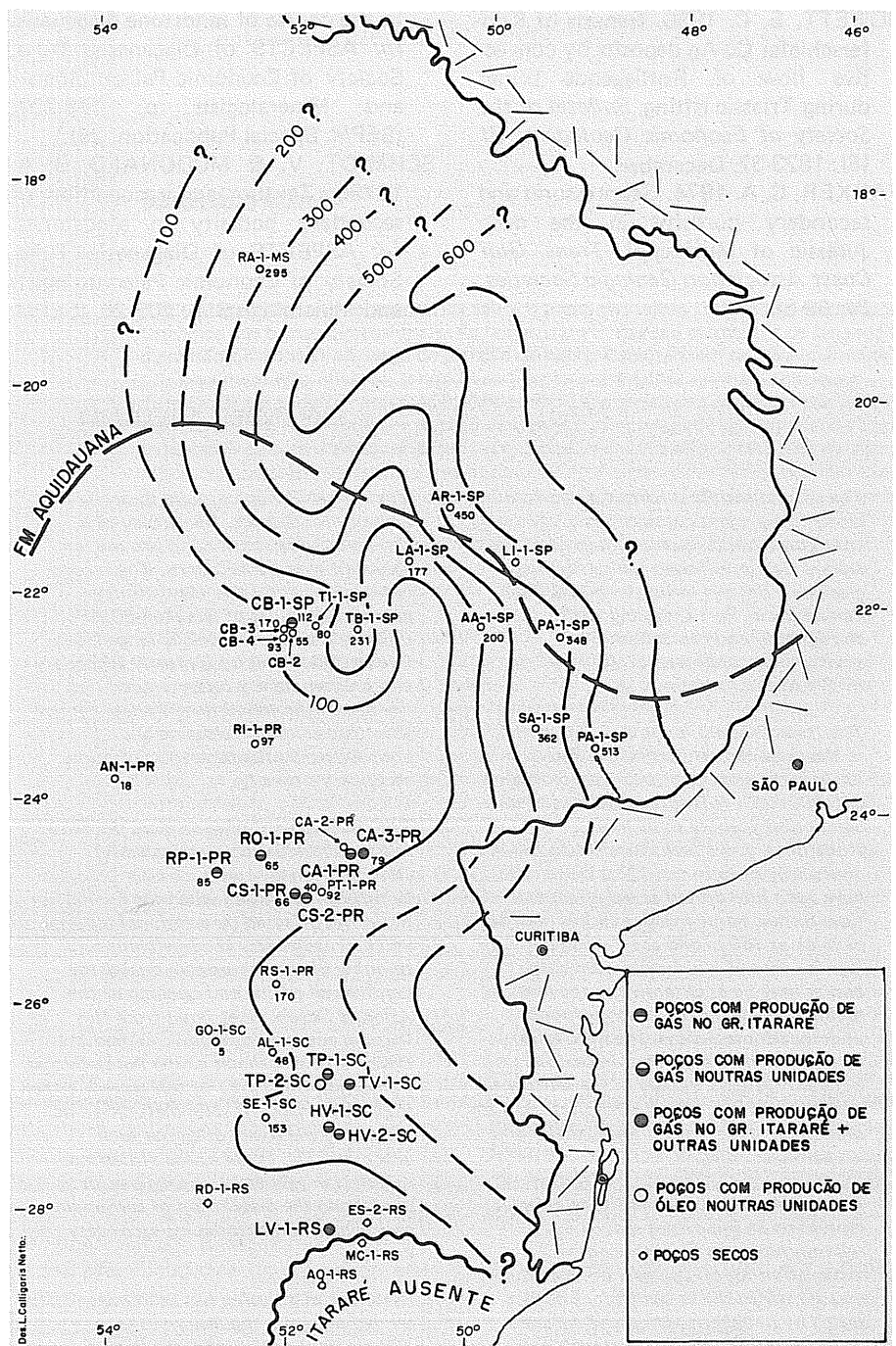


Fig. 4 - Mapa isótopico de arenitos potencialmente reservatórios no Grupo Itararé – arenitos com raios gama menores que 50 unidades API e porosidade maior que 10%. Os poços com produção de gás no Grupo Itararé estão em áreas com isótopos menores que 100 m, refletindo talvez uma relação adequada entre rochas-reservatório e selantes.

Fig. 4 - Isolith map of Itararé Group sandstones presenting reservoir potential (sandstones with gamma ray values under 50 API units and porosity above 10%). Itararé Group gas-producing wells are located in areas presenting isoliths smaller than 100 m, perhaps reflecting an adequate relation between reservoir rock and sealing rocks.

- na Bacia do Paraná. *Revista Brasileira de Geociências*, 14 (1): 35-46.
- JOWETT, E. C. 1986. Genesis of Kupferschiefer Cu-Ag deposits by convective flow of Rotliegende brines during Triassic rifting. *Bulletin of the Society of Economic Geologists*, 81 (8): 1823-37, December.
- PARKER, C. A. 1974. Geopressures and secondary porosity in the deep Jurassic of Mississippi. *Trans. Gulf Coast Association Geologic Societies*, 24: 69-80.

- SCHMIDT, V. & MCDONALD, D. A. 1979a. The role of secondary porosity in the course of sandstone diagenesis. *In: ASPECTS of Diagenesis*. Tulsa, Society of Economic Paleontologists and Mineralogists. p. 175-207. (SEPM. Special Publication, 26).
- SCHMIDT, V. & MCDONALD, D. A. 1979b. Texture and recognition of secondary porosity in sandstones. *In: ASPECTS of Diagenesis*. Tulsa, Society of Economic Paleontologists and Mineralogists. p. 209-25. (SEPM.

Special Publication, 26).

- SURDAM, R. C. *et alii*. 1984. The chemistry of secondary porosity. *In: CLASTIC Diagenesis*. Tulsa, The American Association of Petroleum Geologists. p. 127-49. (AAPG. Memoir, 37).
- TISSOT, B. *et alii*. 1974. Influence of nature and diagenesis of organic matter in formation of petroleum. *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 58 (3): 499-506.

EXPANDED ABSTRACT

The second and final part of a two-fold study, the present paper offers a stratigraphic and reservoir analysis of the Itararé Group, a Permo-Carboniferous glacial deposit in southern Brazil's Paraná Basin. Part I, dealing with stratigraphy and the depositional environment, appeared in Volume 2, nº 2-4 of this bulletin.

The Itararé Group is about 1,300 m thick in the deep central part of the Paraná Basin and covers an area of approximately 800,000 km². It is composed mostly of diamictites (pebbly mudstones), sandstones, and a few siltstones and shales containing dropstones. These diamictites have been interpreted as lodgment and flow tillites. Some massive tillites may be as thick as 150 m and are traceable in well logs for tens of kilometers. Sandstone bodies may be as extensive as the massive diamictites and are commonly found underneath these. Most Itararé Group sandstones were deposited in braided outwash systems, except in the southern part of the basin, where turbidites seem to predominate, with deep water shales and dropstones.

The pebbly mudstone-sandstone couplet represents an important spacial relationship as far as hydrocarbon exploration for oil and gas, because these may be stored in the sandstones bodies sealed by pebbly mudstones. Drill stem tests run on Itararé Group sandstones reveal gas recovery rates as high as 3 MMCFD.

The Itararé Group contains basically two types of sandstones. One is clay-rich, displaying no porosity and gamma ray values of over 50 API units. The second, containing little or no clay, displays gamma ray values of less than 50 API units, while porosity values range from five to 30%. Porosity is mostly secondary and predominantly intergranular, due to the dissolution of early carbonate cement. The dissolution of feldspars and lithics has contributed to the formation of minor secondary porosity.

The development of secondary porosity in the Itararé Group was probably contemporaneous with, or later than, the Gondwana break-up, when the Paraná Basin was affected by a regional thermal anomaly caused by the stretching and thinning of the lithosphere during the continental rifting and opening of the Atlantic Ocean. Heat flows from this thermal anomaly probably reached the Devonian black shales of the Ponta Grossa Formation (see Part I of this paper), either triggering organic matter maturation or increasing the speed of earlier such processes. The initial phase of thermomaturation released carboxylic acids, promoting the dissolution of carbonate and feldspar and producing secondary porosity.

Extensive dissolution has been observed in sandstones from shallow wells (e. g., 700 m deep) drilled near the Paraná Basin's eastern outcrop belt. It is likely that extensive dissolution in shallow wells

is a process associated with the percolation of meteoric water through reservoirs in outcrops near the recharge zone.

The most common cements found in Itararé Group reservoirs are anhydrite and Fe-dolomite, both probably precipitated following the appearance of secondary porosity. Minor cements include ordinary dolomite, Fe-dolomite, Fe-calcite, chlorite, and quartz overgrowths. Chlorite occurs preferentially below 3,000 m.

An isolith map of potential reservoirs in the Itararé Group (sandstones with gamma ray values under 50 API units and porosity values greater than 10%) shows that reservoir thickness nearly parallels that of the Paraná Basin's eastern outcrop belt, probably due to increased compaction in deeper parts of the basin. Meteoric flushing is another factor indicative of better reservoir potential in the eastern outcrop.

The Paraná Basin is still a frontier basin. The presence of secondary porosity in sandstones of the Itararé Group suggests that good reservoirs may be discovered, even at great depths. Furthermore, since secondary porosity develops due to the action of carboxylic acids released by the thermomaturation of organic matter, the basin's source rocks have been heated sufficiently to produce hydrocarbons. Discovering these hydrocarbon resources is now a matter of identifying promising structural closures.