

DIAGÊNESE DE ARENITOS DA FORMAÇÃO PIRAMBÓIA NO CENTRO-LESTE PAULISTA

Maria Rita CAETANO-CHANG & WU Fu Tai

Departamento de Geologia Aplicada, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP. Avenida 24-A, 1515 – Bela Vista.
Caixa Postal 178. CEP 13506-900. Rio Claro, SP. Endereço eletrônico: mrchang@rc.unesp.br

Introdução
A Formação Pirambóia
Materiais e Métodos
Diagênese
 Precipitação Eodiagenética de Cimentos
 Infiltração Mecânica de Argilas
 Compactação
 Cimentação e Substituição Mesodiagenéticas
 Processos Telodiagenéticos
 Porosidade Secundária
Conclusões
Referências Bibliográficas

RESUMO: A Formação Pirambóia constitui o principal reservatório de águas subterrâneas do Aquífero Guarani no Estado de São Paulo. A petrologia dos arenitos desta unidade é, no entanto, pouco conhecida, particularmente no que se refere aos processos diagenéticos que atuaram sobre os sedimentos eólicos originais. Com o objetivo de contribuir para o melhor conhecimento das características texturais, de suma importância na avaliação de rochas-reservatório, foram analisadas 114 lâminas delgadas de arenitos eólicos da Formação Pirambóia. As amostras estudadas foram coletadas em afloramentos do centro-leste paulista e de poços perfurados na região de Anhembi. Esse estudo revelou a ocorrência de duas fases de cimentação principais: uma precoce, concomitante à sedimentação, e outra mesogenética. A infiltração mecânica de argilas observada é o resultado de enchentes fluviais episódicas penecontemporâneas e, noutros casos, de processos telodiagenéticos que atingem apenas os metros superiores dos arenitos aflorantes. A compactação dos grãos do arcabouço foi pouco pronunciada, sendo raros os contatos côncavo-convexos e relativamente comuns os retos. A porosidade foi produzida e modificada durante as diferentes fases diagenéticas: as evidências petrográficas acusam que a porosidade primária foi reduzida durante a eodiagênese por infiltração de argilas e precipitação capilar de sais; também a compactação e a cimentação carbonática mesogenética contribuíram para a redução da porosidade; a dissolução dos cimentos eo e mesogenéticos parece ter ocorrido em plena vigência do regime mesogenético, aumentando consideravelmente a porosidade dos arenitos.

Palavras-chave: Diagênese de arenitos; Aquífero Guarani; Formação Pirambóia.

ABSTRACT - *M.R. Caetano-Chang & Wu, F.T. - Diagenesis of Sandstones of Pirambóia Formation, East-Central São Paulo State.* The Pirambóia Formation constitutes the major reservoir of the Guarani Aquifer in the State of São Paulo. However, the sandstone petrology of this unit is poorly known, particularly with respect to the diagenetic processes underwent by the eolian sediments. To improve the understanding of the textural characteristics, which is of great importance in reservoir evaluation, 114 thin sections of Pirambóia Formation were analyzed. The studied samples were collected in outcrops of central-east region of São Paulo State and from wells located at Anhembi. The present study identified two phases of cementation: an early, concomitant with sedimentation, and a mesogenetic one. Clay mineral infiltration result from episodic penecontemporaneous fluvial flooding and, alternatively, from telogenetic processes affecting only the shallower portions of outcropping sandstones. Compaction of framework grains was weak with rare concave-convex contacts, contrasting with the common linear contacts. Porosity was produced and modified during diagenesis as evidenced by petrographic analysis: primary porosity was reduced during eodiagenesis, through clay infiltration, compaction and mesogenetic carbonate cementation; evidence of eo and mesogenetic dissolution of cements appears to have increased substantially the sandstone porosity.

Keywords: Sandstone diagenesis; Guarani Aquifer; Pirambóia Formation.

INTRODUÇÃO

A Formação Pirambóia tem sido alvo de diversos estudos na última década, tanto de cunho puramente acadêmico quanto aplicado, particularmente por constituir a mais espessa unidade litoestratigráfica do Aquífero Guarani no Estado de São Paulo. Além dos reconhecidos atributos de excelente reservatório, a unidade tem sido largamente utilizada como matéria prima na indústria de vidros e fundição.

O presente trabalho aprofunda o conhecimento

petrográfico e busca seqüenciar a evolução diagenética a que foram submetidos os arenitos da Formação Pirambóia no centro-leste paulista (Figura 1).

Estes estudos visam suprir não somente os conhecimentos de interesse acadêmico sobre os arenitos da unidade, mas principalmente subsidiar o melhor entendimento das características texturais e mineralógicas do aquífero, dados estes essenciais à sua adequada exploração.

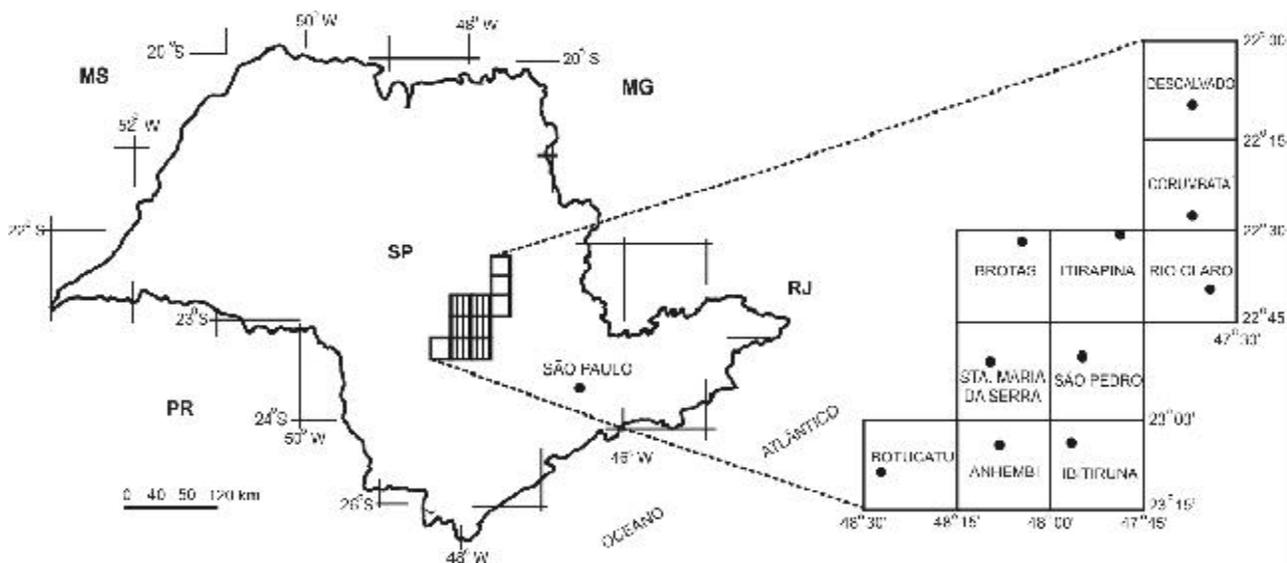


FIGURA 1 Mapa de localização da área estudada.

A FORMAÇÃO PIRAMBÓIA

A Formação Pirambóia estende-se de maneira contínua por todo Estado de São Paulo, aflorando ao longo de toda Depressão Periférica Paulista. Com espessura variável, seus depósitos chegam a atingir 270 m em seções aflorantes na região de São Pedro.

A seção-tipo da unidade (Figura 2), proposta por Soares (1975), foi empilhada ao longo da Rodovia Marechal Rondon, no Estado de São Paulo. O autor é responsável pela subdivisão formal do pacote de arenitos mesozóicos pré-vulcânicos da Bacia Sedimentar do Paraná em formações Pirambóia, basal, e Botucatu, superior. Em termos de gênese sedimentar, considerou-as como predominantemente fluvial e predominantemente eólica, respectivamente.

Com a evolução dos conhecimentos sobre a deposição eólica e o estabelecimento de critérios para identificação e distinção de fácies eólicas na segunda metade dos anos 70 e início dos anos 80, a reavaliação da gênese destas unidades tornou-se inevitável.

Nessa linha, Caetano-Chang et al. (1991), Caetano-Chang & Wu (1992; 1993 a, b; 1994; 1995; 1996 a, b) e Brighetti & Caetano-Chang (1995) apontaram a dominância eólica na sedimentação da Formação Pirambóia, em que associações de fácies de dunas, interdunas (úmidas e secas) e lençóis de areia, cortadas por fácies de canais fluviais temporários, compõem uma sucessão de subambientes inter-relacionados lateral e verticalmente.

Caetano-Chang (1997), em extensiva análise envolvendo estudos faciográficos, petrográficos e estratigráficos, mostrou que a unidade é formada por

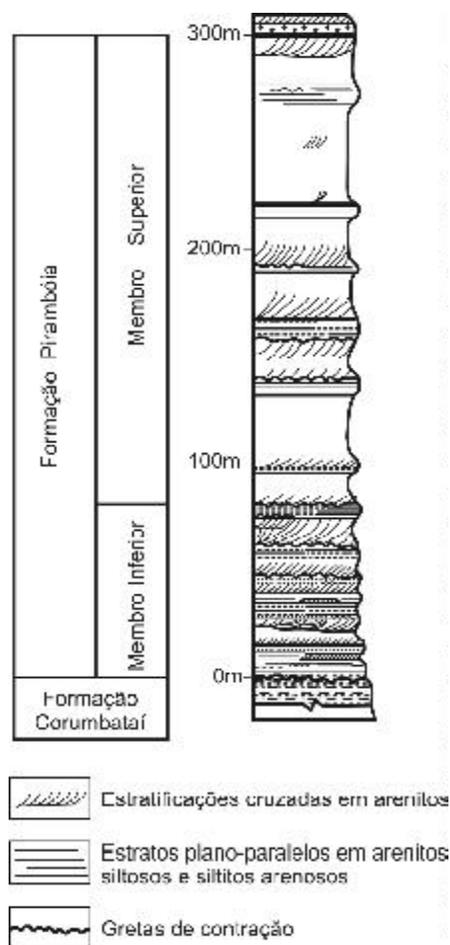


FIGURA 2 Seção-tipo da Formação Pirambóia (Modificada de Soares, 1975).

interessante associação de fácies eólicas, amplamente dominantes, e fácies fluviais subordinadas.

Para Caetano-Chang (1997, 2002), a porção basal da Formação Pirambóia foi depositada em condições de meta-saturação em areias, ressaltada pela faciologia onde abundam depósitos de interdunas úmidas e de

overbank e lençóis de areia com campos de dunas esparsos.

As porções média e superior da unidade, por outro lado, exibem substancial aumento no suprimento de areias, com o desenvolvimento de *ergs* saturados dominantes.

MATERIAIS E MÉTODOS

As amostras estudadas foram coletadas em afloramentos dispersos em toda área de estudo, bem como em quatro poços perfurados na região Anhembi (Figura 1).

A confecção de lâminas delgadas para análise petrográfica exigiu a preparação adequada das amostras para o corte, tendo sido efetuada a impregnação, por resinas cimentantes, de pequenos paralelepípedos de are-

nitos através de técnica modificada de Cesero et al. (1989).

Ao todo, 114 lâminas delgadas foram analisadas ao microscópio ótico petrográfico - 30 provenientes de amostras de superfície e 84 de subsuperfície. Algumas destas lâminas (8) foram submetidas ao microscópio eletrônico de varredura, utilizando-se elétrons retro-espalhados para identificação e caracterização de argilas mecanicamente infiltradas.

DIAGÊNESE

A análise da evolução diagenética dos arenitos estudados foi precedida pela avaliação petrográfica das composições mineralógica e textural. Através das relações petrográficas observadas, foi possível inferir uma seqüência de eventos, cujas principais características e interpretações são apresentadas a seguir.

PRECIPITAÇÃO EODIAGENÉTICA DE CIMENTOS

Em regiões de pequena precipitação pluviométrica, os sais resultantes da decomposição química não podem fluir para os rios e mares, ficando em sua maior parte retidos no local onde se formam. O movimento capilar ascendente da água por evaporação faz com que os sais se acumulem na superfície, formando crostas e florescências. Mais freqüentemente são constituídas de carbonato de cálcio, sílica, gipsita, óxido e/ou hidróxido de ferro, formando concreções ou preenchendo os vazios.

A precipitação eogenética de cimento pode deslocar os grãos do arcabouço, como nos caliches, por exemplo, onde a precipitação de calcita pode ser excessiva, modificando a trama original, caso não verificado nos arenitos estudados.

Em muitas das amostras de arenitos analisadas, o arranjo original do arcabouço mantém-se praticamente inalterado (Foto 1), sem evidências de efeitos relativos à compactação. Muito embora a quase totalidade - principalmente em amostras de superfície - destes arenitos não apresentem cimento de regime eogenético, o arranjo preservado constituiu-se em forte evidência de cimentação precoce. A permoporosidade destas rochas, bem como as fases diagenéticas a que foram

submetidas posteriormente podem ter sido responsáveis pela dissolução desta cimentação.

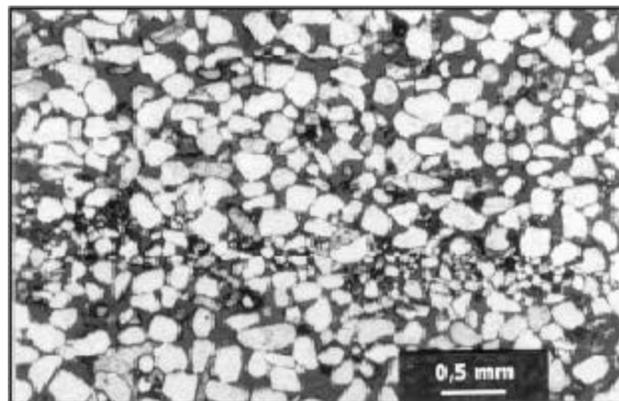


FOTO 1. Arcabouço original praticamente inalterado, com contatos pontuais e, mais raramente, retos e côncavo-convexos entre grãos de arenitos de *foreset* de dunas eólicas. Notar lâmina delgada de siltes de *grainfall* intercalada. Amostra de subsuperfície.

Evidências de campo corroboram esta interpretação: feições de *salt ridges* em *sabkha*-interdunas e intraclastos de arenitos de dunas, encontrados em depósitos de *wadis*, constituem evidências de cimentação eodiagenética, de resto processo comum em ambientes desérticos.

INFILTRAÇÃO MECÂNICA DE ARGILAS

Os arenitos desérticos de clima árido/semi-árido, quando recentemente depositados, não apresentam

argila detrítica intersticial. Isto se deve à grande eficiência da seleção pelo vento que transporta e deposita as areias dentro do sistema eólico, deixando para trás as frações mais grossas e carregando em geral os sedimentos mais finos para fora da bacia.

No entanto, os arenitos da Formação Pirambóia não raro exibem teores de argila intersticial, essencialmente sob a forma de películas (*coatings*) que recobrem os grãos (Fotos 2 e 3). Estas películas alinham-se paralelas à superfície dos grãos do arcabouço, raramente formando pontes entre grãos. Estas argilas são introduzidas pelas águas de enchentes fluviais episódicas, uma vez que, após longos períodos de estiagem, com o lençol freático rebaixado, enxurradas carregadas de carga em suspensão passam sobre os sedimentos eólicos e grandes volumes de água infiltram-se nesses depósitos, graças à alta permeabilidade das areias, indo abastecer o lençol freático. Neste processo, como a argila em suspensão é bem menor do que as “gargantas” dos poros, e a vazão de infiltração, gravitacionalmente impelida através da zona vadosa, é de início bastante alta, as lamelas de argila

são carregadas até que a diminuição da vazão promova sua decantação na superfície dos grãos, onde aderem.

Em clima árido/semi-árido, a argila detrítica, mecanicamente infiltrada, mostra uma composição original predominantemente esmectítica. Com a diagênese subsequente, a esmectita passa gradualmente a interstratificados de clorita-esmectita e illita-esmectita. A análise ao microscópio eletrônico de varredura, associada à análise por espectrometria dispersiva de raios X (EDS) em amostras de arenitos eólicos da unidade revelaram a presença desses interstratificados na composição de *coatings* de argila infiltrada (Fotos 2 e 3).

O processo de infiltração mecânica de argilas pode ser expressivo, reduzindo a porosidade e a maturidade textural dos arenitos. Nos arenitos da Formação Pirambóia, as quantidades de argila infiltrada em depósitos de dunas, de interdunas secas e de lençóis de areia são muito pequenas (traço a 2%), enquanto em depósitos de interdunas úmidas e em depósitos subaquáticos podem chegar a 5%.

COMPACTAÇÃO

A compactação de sedimentos pode ocorrer por processos mecânicos e químicos. Os processos mecânicos envolvem deformação de intraclastos e de minerais lamelares, como micas, e fraturamento e rotação de grãos. Os processos químicos são caracterizados pela dissolução de grãos do arcabouço em seus pontos de contato, sendo ocasionada pela sobrecarga sedimentar (pressão-solução).

Nos arenitos estudados, os grãos de intraclastos são bem preservados (Foto 4) e as micas são raramente curvadas; contatos côncavo-convexos entre grãos são raros, enquanto contatos retos são relativamente comuns (Foto 1); os recrescimentos secundários de quartzo e feldspato são escassos. Estas evidências indicam que a compactação não constitui processo de relevância na história diagenética da unidade.

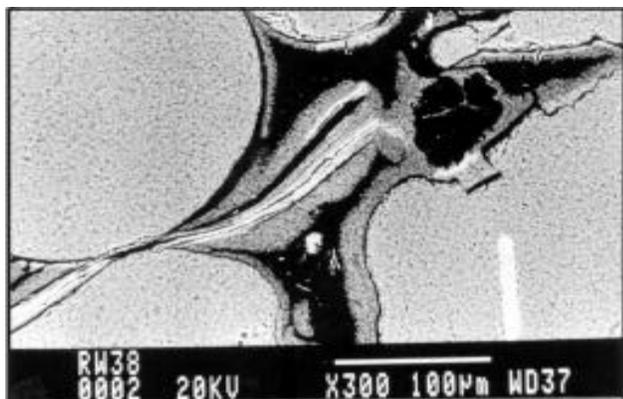


FOTO 2. *Coating* de argila (clorita-esmectita) envolvendo grãos e preenchendo parcialmente espaço poroso em arenitos eólicos. Amostra de superfície.

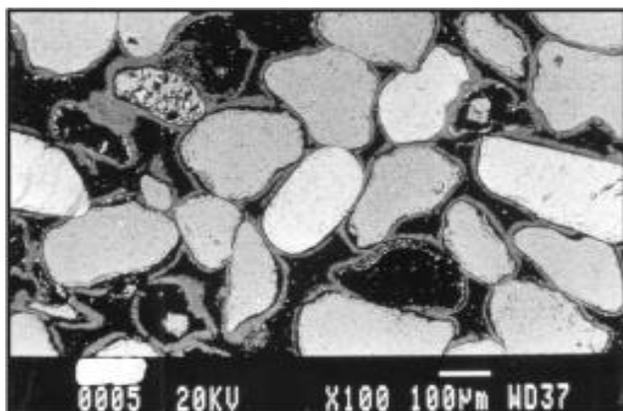


FOTO 3. *Coating* de argila envolvendo grãos em arenitos eólicos. Amostra de subsuperfície.

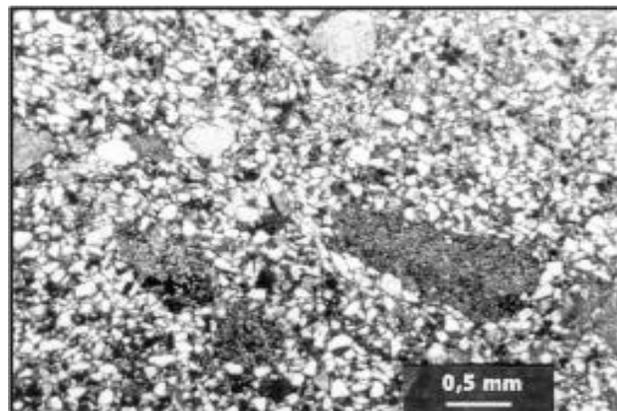


FOTO 4. Fragmentos de siltitos argilosos, não deformados, em arenitos eólicos (Amostra de subsuperfície).

A textura geral destes arenitos é grão-sustentada, com empacotamento normal – contatos retos e pontuais e, menos frequentemente, côncavo-convexos.

CIMENTAÇÃO E SUBSTITUIÇÃO MESODIAGENÉTICAS

A fase diagenética principal nos arenitos estudados consiste de precipitação de calcita mesogenética.

Os arenitos dos poços de Anhemi exibem considerável precipitação mesogenética de calcita poiquilótópica (Foto 5). Tal fase sucedeu à compactação e à cimentação por crescimento secundário de quartzo e feldspato, obliterando parcialmente a porosidade primária remanescente. Os grãos cimentados por calcita, tais como quartzos e feldspatos, mostram evidências de substituição. Em geral, grãos com películas de argilas mais espessas são preservados, enquanto aqueles com películas finas e descontínuas são corroídos e substituídos, muitas vezes totalmente (Foto 6). Grãos alveolados de feldspatos e bordas serrilhadas em grãos de quartzo resultam da substituição parcial

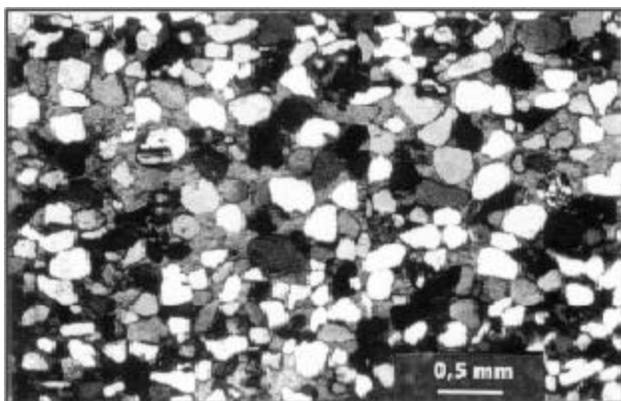


FOTO 5. Cimentação poiquilótópica de calcita em arenitos de *foresets* de dunas eólicas. Amostra de subsuperfície.

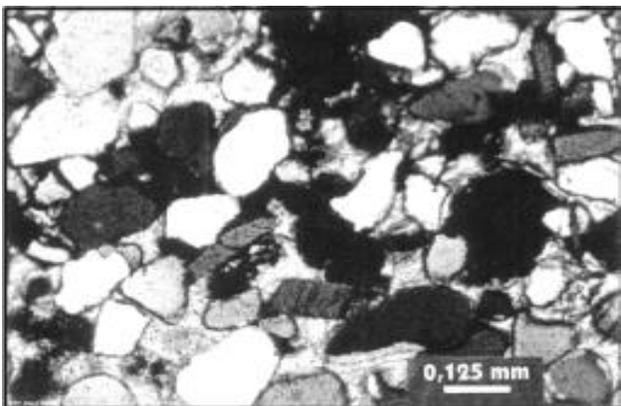


FOTO 6. Substituição parcial e total de grãos do arcabouço de arenitos eólicos por cimento de calcita. Amostra de subsuperfície.

por calcita. Noutros casos, a substituição total mostra a forma do grão mineral original, evidenciado por fina película de argila remanescente.

A ocorrência de pirita autigênica nos arenitos da Formação Pirambóia é localizada e está sempre associada à presença, *in loco* ou adjacente, de óleo impregnando os arenitos. Ocorre como manchas, englobando grãos de arcabouço. Sua gênese está provavelmente ligada à migração de hidrocarbonetos, que é geralmente precedida por soluções ácidas redutoras e sulfurosas.

PROCESSOS TELODIAGENÉTICOS

Visto que a Formação Pirambóia, na área estudada, tanto aflora como se encontra soterrada a pequenas profundidades, os processos telogenéticos ou intempéricos atuaram intensamente sobre seus depósitos, modificando largamente suas características.

Sob as condições do clima atual, úmido e quente, o cimento mesogenético é lixiviado e os minerais instáveis sofrem maior alteração.

Grãos de feldspatos, pouco e muito alterados, ocorrem sempre juntos na mesma amostra, de forma que poderiam ser ao mesmo tempo frescos e intemperizados já à época da deposição da unidade. A exposição desses minerais aos processos mesogenéticos e ao intemperismo atual intensificou sua alteração, produzindo feldspatos parcial ou totalmente caulinizados. Caulinitas remobilizadas por águas meteóricas são raras, sendo encontradas nos espaços porosos ou aderidas à superfície de grãos dos arenitos estudados. A porosidade é, assim, localmente reduzida.

Observação criteriosa dos arenitos calcíferos da Formação Pirambóia, coletados em testemunhos de sondagem, revela que os grãos são envolvidos comumente por fina película constituída por minerais de argila, livres de óxidos-hidróxidos de ferro. No entanto, em arenitos porosos, não cimentados, os grãos apresentam fina película destes óxidos e/ou *coatings* de argila pigmentada por óxidos-hidróxidos de ferro (Foto 7). Neste caso, os arenitos exibem cores acastanhadas e marrom-avermelhadas. Esta situação é encontrada apenas em seções aflorantes ou em testemunhos próximos à superfície, evidenciando a atuação do intemperismo, ou melhor, das águas meteóricas que levam óxidos e hidróxidos de ferro em solução e argilas em suspensão, que são infiltradas mecanicamente nos sedimentos superficiais.

Os óxidos de ferro são, provavelmente, provenientes da alteração e lixiviação de rochas básicas da Formação Serra Geral que ocorrem na região. As argilas infiltradas no regime telogenético podem ocorrer em grande quantidade, obstruindo poros. Neste caso, arenitos com grãos arredondados e bem selecionados

podem, de forma contrastante, exibir material argiloso - pseudomatriz de infiltração mecânica telogenética.

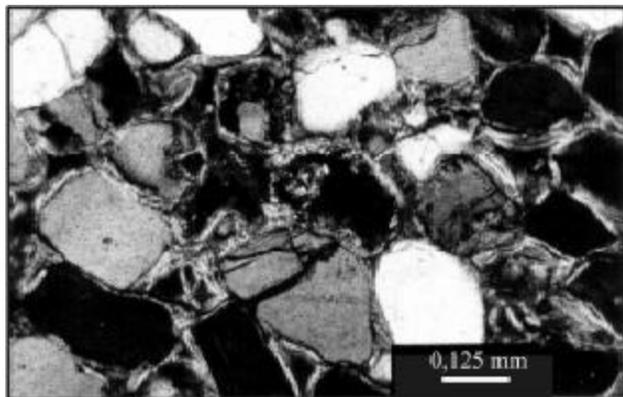


FOTO 7. *Coatings* de argila pigmentada por óxidos-hidróxidos de ferro envolvendo grãos do arcabouço de arenitos eólicos. Amostra de superfície.

POROSIDADE SECUNDÁRIA

A grande maioria dos arenitos da Formação Pirambóia apresenta-se friável e com alta porcentagem de porosidade, chegando não-raro a 35% (Caetano-Chang, 1997). Esta porosidade foi produzida e modificada durante as diferentes fases diagenéticas.

Durante a eodiagênese, a porosidade primária desses arenitos foi reduzida por infiltração de argilas e precipitação capilar de sais. Estes materiais mantiveram praticamente inalterado o arranjo original do arcabouço de grande parte desses arenitos.

Não foram encontradas evidências definitivas sobre a fase em que se deu a dissolução da cimentação eogenética. Embora parte desse material possa ter sido dissolvido durante a fase inicial da mesodiagênese, a preservação do arcabouço, onde os efeitos da compactação foram suprimidos, bem como a não identificação de cimentação eo e mesogenética preenchendo ao espaços porosos de parte desses arenitos, indicam que sua dissolução deve ter ocorrido

posteriormente, em plena vigência do regime mesogenético.

Os arenitos não cimentados durante a eodiagênese - ou apenas parcialmente cimentados - que tiveram sua porosidade reduzida pela compactação, seguida de subordinada cimentação por recrescimento secundário de quartzo e feldspato, foram largamente cimentados por calcita mesogenética. Todos esses processos, atuantes no ambiente mesodiagenético, contribuíram para a redução da porosidade nos arenitos da unidade.

Contudo, foi ainda em regime de mesodiagênese que ocorreu a dissolução de grande parte dos cimentos desses arenitos. O considerável aumento da porosidade assim ocasionado - *oversized pores* (Foto 8) - permitiu a migração do óleo que findou retido nessas rochas (arenitos asfálticos de Anhembi).

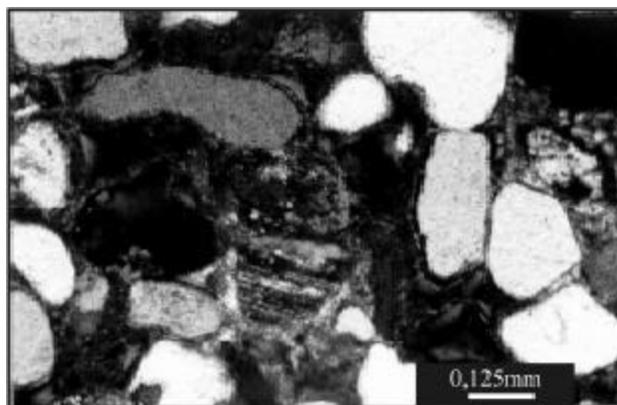


FOTO 8. *Oversized pores* formados pela dissolução de cimento. Amostra de subsuperfície.

Em ambiente telogenético, a cimentação mesogenética é praticamente totalmente dissolvida por lixiviação intempérica, contribuindo para significativo aumento da porosidade. Por outro lado, é neste ambiente que grandes quantidades de argila são carreadas mecanicamente para os espaços porosos, acarretando em diminuição da permo-porosidade da rocha, próximo à superfície.

CONCLUSÕES

A história diagenética desses arenitos pode ser assim resumida: (a) precipitação precoce de cimento e infiltração mecânica de argilas durante a eodiagênese, seguida de compactação pouco pronunciada; (b) recrescimento de quartzo e feldspato, cimentação por calcita e substituição de grãos do arcabouço; dissolução do cimento durante a mesodiagênese; (c) alteração mais intensa de feldspatos, remobilização de caulinitas,

cimentação por óxidos-hidróxidos de ferro, infiltração mecânica de argilas e dissolução de cimento durante a telodiagênese.

Processos meso e telogenéticos de dissolução de cimento concorreram para a formação de *oversized pores*, aumentando sobremaneira a porosidade de alguns desses arenitos que chegam a apresentar 35% de porosidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BRIGHETTI, J.M.P. & CAETANO-CHANG, M.R. Fácies de dunas e lençóis de areia em sedimentos da Formação Pirambóia na região de Rio Claro (SP). In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO SUDESTE, 4, 1995, São Pedro. **Boletim de Resumos...** Rio Claro: Sociedade Brasileira de Geologia, 1995, p. 67.
2. CAETANO-CHANG, M.R. **A Formação Pirambóia no centro-leste do Estado de São Paulo**. Rio Claro, 1997. 196p. Tese (Livre Docência) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.
3. CAETANO-CHANG, M.R. Ergs Saturados e meta-saturados da Formação Pirambóia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 41, 2002, João Pessoa. **Anais...** João Pessoa: Sociedade Brasileira de Geologia, 2002, p. 657.
4. CAETANO-CHANG, M.R. & WU, F.T. Bacia do Paraná: formações Pirambóia e Botucatu. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 37, 1992, São Paulo. **Roteiro de Excursão...** São Paulo: Sociedade Brasileira de Geologia, 1992, v. 2, p. 1-19.
5. CAETANO-CHANG, M.R. & WU, F.T. A composição faciológica das formações Pirambóia e Botucatu no centro-leste paulista e a delimitação do contato entre as unidades. In: SIMPÓSIO CRONOESTRATIGRAFIA BACIA DO PARANÁ, 1, 1993, Rio Claro. **Boletim de Resumos Expandidos...** Rio Claro: Universidade Estadual Paulista, 1993, p. 93. (a).
6. CAETANO-CHANG, M.R. & WU, F.T. A Formação Pirambóia na região de Anhembi (SP), com base em dados de subsuperfície. In: SIMPOSIO DE GEOLOGIA DO SUDESTE, 3, 1993, Rio de Janeiro. **Boletim de Resumos...** Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Geologia, 1993, p. 74. (b).
7. CAETANO-CHANG, M.R. & WU, F.T. Afloramento modelo da Formação Pirambóia. **Geociências**, v. 13, p. 371-385, 1994.
8. CAETANO-CHANG, M.R. & WU, F.T. As formações Pirambóia e Botucatu no Estado de São Paulo. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO SUDESTE, 4, 1995, São Pedro. **Boletim Resumos...** São Pedro: Sociedade Brasileira de Geologia, 1995, p. 64.
9. CAETANO-CHANG, M.R. & WU, F.T. Sandstone facies and diagenesis of Pirambóia Formation - Paraná Basin, Brazil. In: INTERNATIONAL GEOLOGICAL CONGRESS, 30, 1996, Beijing (China). **Abstract...** Beijing, 1996, v. 2, p. 164. (a).
10. CAETANO-CHANG, M.R. & WU, F.T. Pirambóia and Botucatu formations (Tr - J Paraná Basin, South America): sedimentation and stratigraphy. In: INTERNATIONAL GEOLOGICAL CONGRESS, 30, 1996, Beijing, China. **Abstract...** Beijing, 1996, v. 2, p. 200. (b).
11. CAETANO-CHANG, M.R.; WU, F.T.; BRIGHETTI, J.M.P. Caracterização eólica de arenitos da Formação Pirambóia, proximidades de São Pedro (SP). In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO SUDESTE, 2, 1991, São Paulo. **Atas...** São Paulo: Sociedade Brasileira de Geologia, 1991, v. 2, p. 53-58.
12. CESERO, P.; MAURO, L.M.; DE ROS, L.F. Técnicas de preparação de lâminas petrográficas e de moldes de poros na Petrobrás. **Boletim Geociências Petrobrás**, v. 3, p. 105-116, 1989.
13. SOARES, P.C. Divisão estratigráfica do Mesozóico do Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 5, p. 229-251, 1975.