

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**ARENITOS SILICIFICADOS DAS FORMAÇÕES
PIRAMBÓIA E BOTUCATU NO ESTADO DE
SÃO PAULO: PROCESSOS GERADORES E
ASPECTOS GEOMORFOLÓGICOS ASSOCIADOS**

Renata Augusta Rocha Naves de Oliveira

Orientador: Prof. Dr. Paulo César Fonseca Giannini

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA
(TF-2001/33)

SÃO PAULO
2001

TF
048
RARN.a

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**ARENITOS SILICIFICADOS DAS FORMAÇÕES PIRAMBÓIA E
BOTUCATU NO ESTADO DE SÃO PAULO: PROCESSOS
GERADORES E ASPECTOS GEOMORFOLÓGICOS
ASSOCIADOS**

RENATA AUGUSTA ROCHA NAVES DE OLIVEIRA

DISCIPLINA 0440500 - TRABALHO DE FORMATURA

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Paulo César Fonseca Giannini

Paulo C. Fonseca Giannini

Prof. Dr. José Roberto Canuto

José Roberto Canuto

Prof. Dr. Paulo Roberto dos Santos

Paulo Roberto dos Santos

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

DEDALUS - Acervo - IGC



30900009350

**ARENITOS SILICIFICADOS DAS FORMAÇÕES
PIRAMBÓIA E BOTUCATU NO ESTADO DE SÃO PAULO:
PROCESSOS GERADORES E ASPECTOS
GEOMORFOLÓGICOS ASSOCIADOS**

Renata Augusta Rocha Naves de Oliveira



Orientador: Prof. Dr. Paulo César Fonseca Giannini
(Departamento de Geologia Sedimentar e Ambiental - GSA)

**MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA
(TF-2001/33)**

**SÃO PAULO
2001**

048
BARNA



DOAÇÃO COMISSÃO DE
TRABALHO DE FORMATURA

Data: 15 / 02 / 02

Agradecimentos

Agradeço primeiramente ao meu orientador Paulo Giannini pelas dicas sempre úteis, pelo bom humor e, principalmente, pela enorme paciência;

ao Cláudio e Paulo da Seção de Laminação do Instituto de Geociências – USP, pelo bom trabalho e disposição na confecção de lâminas petrográficas e por sempre atenderem às minhas especificações;

aos queridos Isaac e Daniela do Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura IG-USP, por serem tão dedicados e exigentes quanto ao bom desempenho do equipamento na obtenção de belas imagens e ótimas análises qualitativas;

ao amigo Leandro Donati por me instruir em grande parte dos ensaios laboratoriais e estar sempre preparado para longas discussões geológicas;

ao André Sawakuchi (Frutinha), pelo grande auxílio nos trabalhos de campo;

à grande amiga Eva Kaiser (Kaide), pelo constante incentivo, alegria e sinceridade;

à Lúcia Baroni Guarnieri (Docinho), pelas verdadeiras “batalhas em campo” que agora nos fazem rir, mas que serviram em muito para formar opiniões críticas e assim aprender o significado de Geologia. Agradeço também por todo o carinho;

à todos meus amigos da Geologia – USP, por todos esses anos de companheirismo, viagens, festas e muitas risadas que fazem com que tudo se tome melhor;

ao Alexandre Chiarini (Xapa), por todo amor, compreensão e apoio inestimáveis,

e à minha família, em especial, Marilena e Janaína, por todo o cuidado, orgulho e confiança.

Resumo

Abstract

1. Introdução	1
2. Metas e Objetivos	2
3. Trabalhos Prévios	4
3.1. Fatores controladores da silicificação	4
3.1.1. <i>Geomorfologia</i>	4
3.1.2. <i>Clima e intemperismo</i>	4
3.1.3. <i>Temperatura</i>	5
3.1.4. <i>Gradiente hidráulico</i>	6
3.1.5. <i>pH</i>	6
3.1.6. <i>Relação Sílica x Carbonato</i>	7
3.2. Processo, evolução e formas de ocorrência da sílica	8
3.3. Silicificação em laboratório	9
3.4. Sobre as localidades e respectivas formações estudadas	10
3.4.1. <i>Considerações para geologia regional</i>	10
3.4.2. <i>Considerações para estudos petrográficos</i>	15
3.4.3. <i>Importância econômica</i>	15
4. Materiais e Métodos	16
4.1. Obtenção de dados de campo	16
4.2. Estudos laboratoriais	16
4.2.1. <i>Análise petrográfica</i>	16
4.2.2. <i>Análise ao sistema MEV-EDS</i>	18
4.2.3. <i>Captura de imagens das lâminas petrográficas</i>	19
5. Desenvolvimento do Trabalho	19
6. Resultados Obtidos e Comentários	20
6.1. Torre de Pedra	20
6.2. Serra de Botucatu	22
6.3. Serra do Itaqueri	24
7. Interpretação dos Resultados	26
8. Conclusões	27
9. Bibliografia	28

Índice de figuras

Figura 1 - Mapa de localização das áreas estudadas	3
Figura 2 - Mapa Geomorfológico da região da Torre de Pedra	12
Figura 3 - Mapa Geomorfológico da região da Serra de Botucatu	13
Figura 4 - Mapa Geomorfológico da região da Serra de Itaqueri	14
Figura 5 - Perfil Geológico da Torre de Pedra	21
Figura 6 - Perfil Geológico da Serra de Botucatu	23
Figura 7 - Perfil Geológico da Serra de Itaqueri	25
Quadro 1 – Cronograma das atividades realizadas no período proposto para pesquisa	20

Anexos

PRANCHA 1 - LEGENDA

- 1 - Afloramento 3: Arenitos da Formação Pirambóia intrudidos por sill de rocha básica
- 2 - Detalhe do afloramento 3
- 3 - Visão geral da Torre de Pedra
- 4 - Afloramento 4, alto da Torre de Pedra

PRANCHA 2 - LEGENDA

- 1 - Imagem da lâmina petrográfica da amostra 3C, vista em aumento de 10x, luz transmitida, polarizadores descruzados
- 2 - Imagem da lâmina petrográfica da amostra 4D, vista em aumento de 2,5x, luz transmitida, polarizadores descruzados
- 3 - Imagem da lâmina petrográfica da amostra 4D, vista em aumento de 10x, luz transmitida, polarizadores descruzados
- 4 - Imagem da lâmina petrográfica da amostra 4D, vista em aumento de 10x, luz transmitida, polarizadores cruzados
- 5 - Imagem de MEV da amostra 4D, vista em aumento de 150x, elétrons secundários
- 6 - Imagem de MEV da amostra 4D, vista em aumento de 150x, elétrons

retroespalhados

PRANCHA 3 - LEGENDA

- 1 - Visão geral do afloramento 2 na rodovia Marechal Rondon
- 2 - Detalhe do afloramento 2
- 3 - Visão geral do afloramento 1 na rodovia Marechal Rondon
- 2 - Detalhe do afloramento 1

PRANCHA 4 - LEGENDA

- 1 - Imagem da lâmina petrográfica da amostra 1B, vista em aumento de 10x, luz transmitida, polarizadores descruzados
- 2 - Imagem de MEV da amostra 4D, vista em aumento de 750x, elétrons secundários
- 3 - Imagem da lâmina petrográfica da amostra 2C, vista em aumento de 20x, luz transmitida, polarizadores descruzados
- 4 - Imagem da lâmina petrográfica da amostra 1C, vista em aumento de 10x, luz transmitida, polarizadores descruzados
- 5 - Imagem de MEV da amostra 1C, vista em aumento de 2.500x, elétrons secundários
- 6 - Imagem de MEV da amostra 1C, detalhe em aumento de 20.000x, elétrons secundários

PRANCHA 5 - LEGENDA

- 1 - Visão geral da Serra de Itaqueri
- 2 - Aproximação da Serra de Itaqueri, com ênfase na escarpa sustentada pelos arenitos silicificados
- 3 - Visão da escarpa da Serra de Itaqueri
- 4 - Basalto amigdaloidal do Afloramento 6
- 5 - Contado entre as Formações Pirambóia (abaixo, mais claro), e Botucatu (acima, avermelhado), do afloramento 9
- 6 - Afloramento 9, arenitos da Formação Pirambóia.

PRANCHA 6 - LEGENDA

- 1 - Imagem da lâmina petrográfica da amostra 5B, vista em aumento de 2,5x, luz transmitida, polarizadores descruzados
- 2 - Imagem da lâmina petrográfica da amostra 6B, vista em aumento de 10x, luz transmitida, polarizadores descruzados

3 - Imagem da lâmina petrográfica da amostra 6A, vista em aumento de 2,5x, luz transmitida, polarizadores descruzados

4 - Imagem de MEV da amostra 6A, vista em aumento de 750x, elétrons secundários

5 - Imagem da lâmina petrográfica da amostra 9A, vista em aumento de 10x, luz transmitida, polarizadores descruzados; arenito Botucatu no contato com Pirambóia

6 - Imagem de MEV da amostra 9A, vista em aumento de 500x, elétrons secundários

Resumo

Muitos são os estudos sobre silicificação. São numerosos os que apresentam hipóteses sobre o processo em rochas sedimentares sem entretanto justificá-las com base em observações criteriosas de campo. Alguns autores realizaram testes em laboratório com resultados satisfatórios em relação às condições geoquímicas necessárias para que ocorra a cimentação silicosa. Porém, ainda não se tem conhecimento de que, dentre todos modelos especulados, um único tivesse sido aceito por completo para explicar a existência de arenitos silicificados nas formações do Grupo São Bento.

Os arenitos Botucatu estudados, quando submetidos a intensa silicificação, apresentam-se aparentemente maciços. As feições mascaradas por esse tipo de cimentação, são muitas vezes imprescindíveis na identificação e caracterização de fácies e formações. Este fenômeno diagenético é bastante complexo e engloba diferentes processos geológicos.

Arenitos com esse grau de silicificação são materiais de extrema resistência, apresentando valores comparáveis aos de rochas cristalinas de qualidade já reconhecida em termos geotécnicos. Contudo, boa parte do seu potencial econômico não é utilizada.

A silicificação desses arenitos pode estar relacionada a diversos modelos genéticos. Nos casos examinados, duas hipóteses podem estar associadas: "cozimento" dos arenitos Botucatu durante o magmatismo Serra Geral, por metamorfismo de contato, sem minerais neoformados; e a segunda, a cimentação por sílica, a partir da elevação e posterior rebaixamento do lençol freático. Contraditoriamente, os arenitos da Formação Pirambóia não apresentam nenhum tipo de cimento de sílica na área abordada. Estes merecem estudos mais profundos pois envolvem processos de difícil identificação na obtenção de um modelo de silicificação satisfatório.

Abstract

Many are the studies on silicification. They are numerous the ones who present hypotheses on the process in sedimentary rocks however without justify them based on specific field observations. Some authors had carried through tests in laboratory with satisfactory results in relation to the necessary geochemical conditions so that the silica cementation occurs. Nevertheless, it is still unknown that, among all speculated models, an only one had been accepted for full explaining the existence of silicified sandstones in the São Bento's Group.

The Botucatu sandstones studied, when submitted to intense silicification, they are presented apparently massive. The masked features for this type of hardenings are many times essential in the identification and characterization of facies and formations. This diagenetic phenomenon is very complex and involves different geological processes.

Sandstones with that intensity of silicification are material of extreme resistance, presenting comparable values to the ones of crystalline rocks of recognized quality in geotechnical terms. However, good part of its economic potential is not used.

The silicification of these sandstones can be related to many genetic models. In the examined cases, two hypotheses can be associated: " baking " of the Botucatu sandstones during the magmatismo of Serra Geral Formation, by contact metamorfism, without new mineral formation; and second, the cementation by silica, through the rise and posterior lowering of the hydrostatic level. In contradiction, the sandstone of Pirambóia Formation do not present any type of silica cement in the boarded area. These deserve deeper studies therefore involve processes of difficult identification in the attainment of a satisfactory model of silicification.

1. Introdução

A silicificação em rochas sedimentares muitas vezes acaba por ocultar feições imprescindíveis para a resolução de alguns problemas de identificação e caracterização de fácies e formações. Este fenômeno diagenético, bastante complexo, engloba diferentes processos geológicos, variáveis de área para área, o que torna extremamente difícil a sua compreensão.

Na Bacia do Paraná, praticamente todas as formações apresentam produtos diagenéticos, intempéricos, ou mesmo hidrotermais, de algum tipo de silicificação. Ocorrem desde *bonecas de sílex* (produto eodiagenético) de diferentes tamanhos a horizontes de silcrete (processo pedogênico) ou fraturas preenchidas por material de hidrotermalismo. Os arenitos silicificados do Grupo São Bento merecem atenção especial quanto a este tema devido a magnitude alcançada pela silicificação, principalmente no Estado de São Paulo. Formou-se um extenso conjunto de serras, resistentes à erosão remontante, sustentadas essencialmente pelas rochas silicificadas. Estas rochas têm importância econômica, por conter grandes quantidades de material de alta pureza em quartzo em locais bastante acessíveis para exploração, e geotécnica, por suscitar novas concepções no estudo de métodos de estabilidade de taludes.

A escarpa que acompanha a faixa de afloramento das formações Pirambóia e Botucatu tem sido invariavelmente atribuída aos arenitos silicificados e/ou à ocorrência de rochas magmáticas da Formação Serra Geral. As relações de causa-efeito entre derrame-silicificação e silicificação-escarpa (ou sua relação inversa) não são consensuais. Para explicar os processos responsáveis pela silicificação dos arenitos, por exemplo, encontra-se a mais diversificada gama de hipóteses. Florence (1907 *apud* Paraguassu, 1968) atribui a silicificação dos arenitos presentes em fraturas de basaltos ao fluxo hidrotermal de sílica oriunda do derrame. Entretanto, observa-se tendência, por parte dos autores posteriores, em acreditar que a fonte de sílica encontra-se no arenito (Freyberg 1927; Washburne, 1930; Moraes Rego, 1930, Almeida & Barbosa 1953; Paraguassu, 1968; Coimbra, 1981; Paraguassu, 1986). Os estudos de Paraguassu (1968, 1972, 1986) ilustram com informações de laboratório e de campo a possibilidade deste tipo de derivação. Em laboratório, o autor conseguiu induzir a cimentação silicosa em um bloco maciço de arenito quartzoso, submetido a fluxo contínuo de água destilada (Paraguassu, 1968, 1972). Em afloramento, detectou tendência para maior silicificação na frente da cuesta (Paraguassu, 1986), o que pode ser atribuído à maior presença de água em circulação.

Ainda segundo Paraguassu (1986), a silicificação poderia estar intimamente ligada à área de descarga do aquífero, ao afloramento do lençol freático, à atuação de água meteórica e a variações de pH, dentre outros fatores.

No caso dos arenitos pertencentes às formações Pirambóia e Botucatu, a maioria dos autores considera apenas um ou dois processos geradores concomitantes. Na realidade, para cada pacote litológico e sua respectiva posição geográfica, deve existir um conjunto de processos pós-deposicionais que resultem em diferentes

produtos diagenéticos. Essa relação pode ser bem observada nas cuestas do interior de São Paulo, onde afloram as formações do Grupo São Bento e rochas magmáticas relacionadas à Formação Serra Geral. Algumas características, como resistência mecânica e distribuição mineralógica destas rochas, variam de talude para talude.

Neste contexto, este Trabalho de Formatura visa a estudar a distribuição, tipologia e origem desta cimentação. A pesquisa tem como alvo o Estado de São Paulo, mais especificamente localidades das regiões centro-sul e centro do Estado, com ênfase em escarpas e taludes (Figura 1).

Conclusões e informações advindas deste estudo serão de interesse tanto acadêmico quanto aplicado. No campo acadêmico, destaca-se o reconhecimento de diversas gerações mineralógicas em processos silicificadores policíclicos; e a reconstituição do contexto paleogeográfico, climático e tectônico que antecedeu e acompanhou o maior derrame intraplaca de que se tem registro.

No campo da geologia exploratória, a Formação Botucatu e a Formação Pirambóia compõem um dos maiores reservatórios de água subterrânea do planeta (Aqüífero Guarani). Além disso, os arenitos do Grupo São Bento têm excelente desempenho na indústria do vidro, como refratários silicosos e na construção civil, onde são usados como gabiões para obras públicas ou como pedra de revestimento.

2. Metas e Objetivos

Muitos são os estudos sobre silicificação. São numerosos os que apresentam hipóteses sobre o processo em rochas sedimentares sem entretanto justificá-las com base em observações criteriosas de campo. Alguns autores realizaram testes em laboratório com resultados satisfatórios em relação às condições geoquímicas necessárias para que ocorra a cimentação silicosa. Porém, ainda não se tem conhecimento de que, dentre todos modelos especulados, um único tivesse sido aceito por completo para explicar a existência de arenitos silicificados nas formações do Grupo São Bento.

Nesse contexto, a meta deste trabalho é identificar as relações texturais, mineralógicas e diagenéticas das principais fácies e/ou horizontes estratigráficos reconhecidos nas formações envolvidas, bem como suas feições geomorfológicas e disposição em relação às demais litologias presentes nos afloramentos das regiões estudadas a fim de caracterizar com maior exatidão o contexto no qual se inseriu a silicificação desses arenitos. Também é meta relacionar os processos diagenéticos de silicificação à viabilidade econômica de uso dos arenitos Pirambóia, Botucatu e Serra Geral na indústria.

Como objetivo maior tem-se a revisão crítica da bibliografia sobre silicificação, tanto de modo geral como associada às formações sedimentares alvos do estudo. Esta revisão é requisito fundamental para dar base à discussão das possíveis condições geológicas atuantes durante a diagênese dos arenitos amostrados e descritos por microscopia óptica e eletrônica.



Figura 1 - Mapa de localização das áreas estudadas

3. Trabalhos Prévios

Thiry (1997) relata o conhecimento do processo de silicificação há quase 200 anos, sendo Coupe (1804) um dos primeiros a documentar tal mecanismo. Durante estes anos, várias teorias foram elaboradas tentando modelar de maneira simples a gênese e evolução da cimentação por sílica. Porém, este processo é muito complexo e envolve diversos fatores que incluem geomorfologia, clima, temperatura, soluções percolantes e seus respectivos pHs, entre outros. Wernick (1966 *apud* Paraguassu, 1968) assegura que variações no nível de água, talvez por mudança climática, e variações no pH ao mesmo tempo são as “causas” da silicificação dos arenitos.

Truckenbrodt (1997) ressalta que em arenitos geralmente ocorre a substituição de quartzo por calcita e lista como possíveis processos que liberam sílica para o cimento de quartzo:

1. dissolução por pressão intergranular do quartzo
2. alterações de argilominerais durante o soterramento
3. substituição de quartzo e grãos de silicatos por carbonatos
4. dissolução de grãos esqueléticos opalinos (opala biogênica) em folhelhos
5. caolinização ou dissolução de feldspato
6. dissolução de pequenos grãos de quartzo (silte) em folhelhos ou siltitos adjacentes
7. água freática e/ou meteórica que solubilizaria sílica das rochas envolvidas
8. dissolução de diminutos fragmentos de quartzo gerados pela abrasão mecânica eólica.
9. deposição de vidro vulcânico que pode ser dissolvido posteriormente

3.1. Fatores controladores da silicificação

3.1.1. Geomorfologia

Millot (1970 *apud* Thiry, 1997) sintetizou observações reunidas de estudos das silicificações no Saara e reconheceu a influência de dois fatores principais. O primeiro seria a morfologia da paisagem. O processo por ele chamado de quartzificação ocorre imediatamente na superfície, enquanto que o desenvolvimento de formas de sílica desordenada (por exemplo, calcedônia e opala) ocorre preferencialmente nas bacias e dentro de sistemas de água subterrânea. O segundo fator mais importante é a natureza do leito rochoso submetido a soluções silicificadoras. Geralmente, carbonatos silicificam-se preferencialmente com calcedônia, enquanto depósitos argilosos silicificam-se com opala.

3.1.2. Clima e intemperismo

Vilar *et al.* (1986) apresentaram os resultados de uma experiência laboratorial com modelos reduzidos, que simularam, em taxa acelerada, os fenômenos de silicificação observados em taludes de rochas sedimentares da Bacia do Paraná. Estas rochas, expostas ao clima tropical úmido, sofrem cimentação por sílica através de evaporação aliada à capilaridade. Demonstraram ainda que o processo ocorre superficialmente, uma vez que atinge apenas pequena espessura (milimétrica) da porção aflorante da rocha, e que é relativamente rápido.

Este trabalho revelou-se de grande valia do ponto de vista da geologia aplicada, pois a silicificação, neste caso, está intimamente relacionada às condições de estabilidade dos taludes, que acabam por ficar mais firmes e resistentes aos demais processos intempéricos erosivos.

Quanto a critérios genéticos, Thiry (1997) classifica a silicificação de superfície em três tipos principais. Um deles é a silicificação pedogênica, que apresenta estruturas características de solos (horizontes diferenciados e estruturas de eluviação), as quais obliteram completamente as estruturas primárias da rocha. Os demais tipos serão tratados nos itens 3.1.4. e 3.1.6. a seguir.

Na silicificação pedogênica, a sílica acumula preferencialmente, enquanto outros cátions são removidos dos perfis. Este tipo de silicificação ocorre em áreas de sazonalidade climática e comporta-se como uma frente de alteração que fica mais profunda e retira maior quantidade de sílica à medida que se avança em direção à base do perfil de solo.

Existem dois tipos de sílica pedogênica, os silcretes e os "duripans":

Os silcretes, formados principalmente de microquartzo secundário sem argilominerais e óxidos de ferro, mas enriquecido em titânio, têm estrutura típica de cobertura laminada.

Estudos de microscopia de transmissão e difração de elétrons na matriz de argila mostraram que cristálitos hexagonais de caulinita corroeram os grãos formando baías e estão acamadados e soldados entre si por sílica gel. Os cristais de quartzo desenvolvem-se no topo do perfil e a seqüência mineralógica é: opala - quartzo microcristalino - quartzo euédrico, o que indica constante reequilíbrio do mineral com o seu ambiente.

Os "duripans" formam-se principalmente por opala, com argilominerais e óxidos de ferro ainda presentes. Muitas vezes apresentam estrutura de coberturas de nódulos, que juntos formam uma capa ondulada.

3.1.3. Temperatura

Paraguassu (1968), em revisão sobre a origem da silicificação do Arenito Botucatu, cita os autores pioneiros como Florence (1907), Freyberg (1927), Washburne (1930) e Moraes Rego (1930). Florence (1907) considera a sílica presente em arenitos (interderrames) como proveniente do próprio corpo magmático Serra Geral. Freyberg (1927) analisa o metamorfismo de contato sem minerais neoformados (optático), como agente principal de recristalização dos grãos de quartzo do arenito. Washburne (1930) também acredita na influência dos fluidos da lava basáltica. Moraes Rego (1930) acrescenta que o evento magmático apenas conferiu maior resistência ao arenito, através do efeito de "cozimento".

Truckenbrodt (1997), ao discutir conceitos fundamentais de diagênese e mineralogia em rochas sedimentares, lembra que cálculos de Blatt (1979), Bjorlykke (1983, 1984) e Paraguassu (1968) mostram que enormes quantidades de água precisam passar pelos poros dos arenitos para cimentá-los por completo. Portanto, deve existir reciclagem de fluidos.

A existência de células de convecção termal no interior de arenitos seria um dos processos potencialmente geradores desta reciclagem (Wood e Hewitt, 1984 *apud* Truckenbrodt, 1997).

3.1.4. Gradiente hidráulico

Paraguassu (1972) relata que muitos dos casos de cimentação do Arenito Botucatu são relacionados à precipitação por evaporação de sílica existente na água subterrânea. Experimentos foram conduzidos por este autor para determinar se a sílica dissolvida em água subterrânea foi adquirida de forma rápida ou lenta. Estes experimentos envolveram a circulação de água destilada em sedimentos dentro de um sistema fechado e a dissolução de sílica por água estagnada (precipitação por evaporação).

Em qualquer seção em que haja lenta elevação do nível hidrostático, ou ainda, quando há soerguimento do arenito, as águas de poro são resfriadas. Como resultado, as águas tornam-se supersaturadas e deve ser esperada a precipitação do excesso em forma de quartzo. Então, quanto maior o tempo de duração da circulação, maior será o volume de quartzo precipitado.

Amaral (1961) faz analogia entre condições topográficas na silicificação e na formação de depósitos de bauxita. O relevo favorável deve implicar retenção de água durante um longo período de tempo em meio aos interstícios da rocha, para permitir assim a lenta dissolução da sílica. Diz também ser importante a posição do nível hidrostático, que precisa permitir a evasão das águas com solutos.

Thiry (1997) tem como segundo principal tipo de silicificação de superfície a silicificação por água subterrânea. Este processo desenvolve silcretes em maior profundidade, se comparada à silicificação pedogênica. Pode ser gerada como concentrações de sílica ou por sua precipitação nos poros, ou ainda como substituições epigenéticas. A principal característica é a superposição de lentes silicificadas e a preservação das estruturas primárias da rocha hospedeira (estratificações, bioturbações etc.).

3.1.5. pH

Segundo Truckenbrodt (1997), a solubilidade da sílica depende do pH da solução, do estado cristalino da fase sólida, da temperatura e da pressão.

As sílicas cristalinas apresentam solubilidade muito inferior em relação às criptocristalinas. A solubilidade do quartzo está em torno de 5 ppm e cresce com o aumento de temperatura e/ou pressão. Nas mesmas condições, a sílica "amorfa" tem uma solubilidade de 100 a 140 ppm. A solubilidade é ainda maior em água marinha.

Pettijohn *et al.* (1972) ressaltam que a concentração de equilíbrio de solubilidade do quartzo, pode ser ultrapassada dezenas de vezes (até 80ppm), sem sinais de precipitação. Isto ocorre porque o quartzo precipita com muita lentidão, em contraste às sílicas "amorfas". Em taxas intermediárias de concentração de sílica "amorfa", a solução pode exceder a solubilidade da opala-cristobalítica-tridimítica (opala-CT) que se precipita mais rápido que o quartzo. Trata-se freqüentemente de uma cristobalita desordenada, cuja solubilidade é de 70 ppm a 25°C. Este material pode mais tarde reverter para calcedônia ou quartzo microcristalino. Opala "amorfa" (opala-A) é o material proveniente de diatomáceas e radiolários. As águas nunca são saturadas com este tipo de sílica.

As condições químicas para a precipitação de sílica foram resumidas por Siever (1972 *apud* Pettijohn *et al.*, 1972). A elevação de pH para valores acima de 9 e o aumento de temperatura seriam os principais fatores que provocam o aumento da solubilidade da sílica.

As águas de poro, previamente estudadas por Pettijohn *et al.* (1972), atingem valores de pH em torno de 8, e raramente maior que 9. Diz que o efeito da temperatura sobre a solubilidade da sílica não tem tanta importância se as soluções forem bastante alcalinas.

3.1.6. Relação Sílica x Carbonato

Leinz (1938 *apud* Paraguassu, 1968) afirma que a sílica só precipita em sedimentos arenosos que possuem minerais carbonáticos para então ocorrer a substituição.

Mas para Schmidt e McDonald (1979), a principal forma de sílica diagenética consiste nos crescimentos secundários de quartzo formados durante a fase de carbonatação mesodiagenética. Esta ocorre praticamente em todos arenitos, exceto aqueles que tiveram sua porosidade primária eliminada durante as fases diagenéticas precedentes.

De Ros e Moraes (1984) admitem haver variações no modelo de evolução diagenética quando há formação precoce de silcretos (opala, chert ou calcedônia) e calcretes; o que impede que haja uma evolução diagenética mais intensa depois. Ou ainda, quando ocorre a "diagênese avançada", uma última diagênese silicosa, com novos crescimentos secundários e substituição dos carbonatos remanescentes.

Thiry (1997) considera também como um dos tipos principais de silicificação de superfície aquela associada a evaporitos. É conhecida a relação entre silicificação de sulfatos e presença de formas específicas de quartzo, como a quartzina (calcedônia de raio lento ou alongação positiva), a lutecita e o quartzo em forma "cúbica" ou de "chama". Foram descritas em diversos depósitos evaporíticos as substituições de sulfatos como gipso, anidrita e barita, por tais formas de sílica.

Entretanto, conforme este autor, na maioria dos evaporitos silicificados, não há evidência que documente o quadro temporal de silicificação. A deposição de sílica pode ocorrer através de toda a diagênese de soterramento e até mesmo depois da exposição dos sedimentos à superfície.

Por outro lado, nos ambientes evaporíticos modernos, os fenômenos de silicificação ocorrem primariamente através de mudanças nos valores de pH e concentração de sais. Essas mudanças são tanto espaciais como temporais, envolvendo a mistura de águas continentais doces com salmouras, ou a sucessão de períodos de dissecação e subsequente diluição por água de chuva. A mistura das águas torna-as supersaturadas e, portanto, capazes de alimentar o processo de silicificação. Isto explica porque os depósitos evaporíticos aparentam ser tão favoráveis para a silicificação.

Deve-se considerar que se a solução tiver abundância em alumínio e magnésio, argilominerais irão formar-se preferencialmente, consumindo o excesso de sílica disponível, e a silicificação não será desenvolvida.

3.2. Processo, evolução e formas de ocorrência da sílica

Segundo De Ros e Moraes (1984), a silicificação ocorre preferencialmente no início da mesodiagênese e tem tendência a desenvolver faces cristalinas perfeitas em torno dos grãos, reduzindo grandemente a porosidade primária remanescente da eodiagênese e deixando um sistema poroso poliédrico, mal conectado por finas gargantas lamelares. Os crescimentos podem eventualmente desenvolver-se a ponto de ocupar todos os poros, conferindo ao arenito o aspecto de um quartzito e inibindo mudanças diagenéticas posteriores.

Esses autores consideram dissolução por pressão intergranular como a mais citada das fontes de sílica geradora dos crescimentos secundários. Porém, Silbley e Blatt (1976 *apud* De Ros e Moraes, 1984) ponderam que esta fonte pode fornecer apenas 1/3 de sílica necessária.

O reconhecimento em lâmina delgada das diversas gerações de sobrecrecimentos de quartzo é possível apenas quando os grãos tiverem sido recobertos com películas de óxidos ou argilas (*cutans*), uma vez que há continuidade óptica entre o grão de quartzo e o seu sobrecrecimento (De Ros e Moraes, 1984).

Truckenbrodt (1997) observa ainda que a distribuição do cimento de quartzo em lâminas delgadas pode ser uniforme ou em manchas, mas sempre desenvolvendo facetas euédricas. O autor nota formação de quartzo diagenético tardio com sobrecrecimentos sintaxiais ou cristais euédricos isolados. Cresce geralmente em poros secundários.

Pettijohn *et al.* (1972), em seu capítulo sobre cimentação por sílica, apontam que a forma mais comum deste processo é a de crescimento secundário de quartzo, que resulta em faces de cristais euédricos ou mosaicos de intercrecimentos secundários com alguma compactação química formando suturas do tipo côncavo-convexo. Segundo eles, Harder & Flehmig (1970) e Mackenzie & Gees (1971) relataram a precipitação experimental de quartzo sob condições sedimentares simuladas; assim como fez Paraguassu em 1968. Os autores anteriormente mencionados observam que nos silcretes formados por cimentação de solo por sílica, esta é normalmente opalina ao invés de quartzosa. Na maioria dos arenitos, o quartzo é o primeiro cimento, apesar da dificuldade de estabelecer o quão cedo é iniciada a sua formação.

Convém reafirmar que a sílica em solução, presente nas águas intersticiais, possui diversas fontes. Uma das principais fontes de sílica dissolvida está nos silicatos instáveis que sofrem intemperismo pela infiltração de águas meteóricas. Esta sílica pode ser reprecipitada perfil abaixo, na direção de fluxo, no mesmo arenito ou em outras formações.

Conforme Surdam & Boles (1979 apud Pettijohn *et al.*, 1972), muitas das reações de alteração de vidro vulcânico, plagioclásio e minerais máficos, transformando-se em argilas autógenas e zeólitas, resultam no desprendimento de sílica dissolvida de modo que a silicificação e, especialmente o cimento de chert (considerado por estes autores como um agregado de cristais muito finos e com tamanhos relativamente uniformes, de sílica formada por precipitação) não é incomum em camadas de areia sob este tipo de rocha.

Todas essas fontes podem ser encontradas nos arenitos; elas são ainda mais abundantes nos sedimentos de granulação fina. Isto induziu à hipótese de que as águas vindas de lamias para areias podem transportar sílica dissolvida. Em qualquer seção em que haja lenta elevação do nível hidrostático, ou ainda, quando há soerguimento do arenito, as águas de poro são resfriadas. Como resultado, as águas tornam-se supersaturadas e deve ser esperada a precipitação do excesso em forma de quartzo. Então, quanto maior o tempo de duração da circulação, maior será o volume de quartzo precipitado. Esta pode ser uma explicação para o fato de existir quartzo diagenético tardio que sucede uma paragênese precoce de quartzo e outros cimentos como carbonato e óxidos. Por causa da relativa rapidez com que as fases de sílica opalina se precipitam, é de se duvidar que esta sílica possa permanecer em solução por longos períodos ou que tenha a capacidade de ser transportada por longas distâncias sem ocorrer precipitação. Isto torna mais provável a hipótese de que a área fonte de sílica opalina é bem próxima. Alternativamente, soluções oriundas de rochas vulcânicas sobrepostas, quando presentes, podem suprir a sílica.

Millot (1970 *apud* Thiry, 1997) acredita que os processos de precipitação e dissolução da sílica são similares às reações de polimerização e despolimerização. Sendo assim, os diferentes tipos de sílica resultariam de um crescimento mais ou menos ordenado de cristais com maior desordem causada pela incorporação de impurezas no retículo cristalino. Com isso, as soluções que geram opala, calcedônia e quartzo, nesta ordem, seriam decrescentes em impurezas. Também se demonstra que silicificações, em suas diversas formas e tipos mineralógicos, resultam do crescimento de cristais alimentados por soluções naturais contendo sílica "monomérica" dissolvida.

3.3. Silicificação em laboratório

Neste experimento, Paraguassu (1972) observou que a sílica é facilmente mobilizada através da água que percola o arenito. O autor concluiu que quando a água meteórica (sem sílica) penetra nos sedimentos da Formação Botucatu, ela adquire rapidamente sílica e depois vagarosamente alcança um valor de máxima capacidade. A quantidade de sílica na água que percola através do arenito é

suficiente para produzir, mesmo nas condições climáticas atuais, alguns dos fenômenos de silicificação observados na região de São Carlos, SP (como cimentação, laterização e estalactites). As condições experimentais retratam duas condições encontradas na natureza: (a) ascensão de água e sílica trazidas em solução irá precipitar sobre uma superfície arenosa exposta em clima que favoreça a evaporação; e (b) a sílica é fornecida predominantemente por minerais silicosos e também grãos de quartzo (Paraguassu, 1972).

Segundo Pettijohn *et al.* (1972), durante a cimentação, para produzir redução de até 10% da porosidade de um arenito por precipitação de quartzo ou carbonato, as águas devem circular muitas vezes para que o excesso da supersaturação precipite constantemente em forma de crescimentos secundários. Essa circulação intensa é típica de areias fluviais, mas pode ocorrer também em areias de planícies costeiras, em áreas onde a recarga de água subterrânea é suficiente para ocorrer infiltração, ou até mesmo em areias de zona costa afora ou da plataforma continental.

Blatt (1979 *apud* Pettijohn *et al.*, 1972) discutiu os tipos de taxas de fluxo necessárias para a redução de porosidade por cimentação de quartzo e concluiu que tais taxas em formações profundamente soterradas são muito lentas e que a maior parte do cimento de quartzo em quartzo-arenitos deve ser precipitada em ambientes mais rasos.

3.4. Sobre as localidades e respectivas formações estudadas

3.4.1. Considerações para geologia regional

A silicificação do Arenito Botucatu foi diretamente associada a sils e derrames do evento Serra Geral por diferentes autores (Florence, 1907 *apud* Paraguassu, 1968; Freyberg, 1927; Washburne, 1930). Estes autores sugerem que a própria lava básica à intermediária libera sílica para o arenito. Outros consideram que a atividade magmática forneceria pressão, promoveria perda d'água intersticial dos arenitos e elevaria a temperatura, o que dissolveria a sílica da rocha sedimentar e assim criaria condições de reprecipitação desta sílica (Coimbra *et al.*, 1981). Mas nem todas as cuestas de arenitos do Grupo São Bento apresentam vestígios de rochas magmáticas. Isso pode ser um indício de que o processo de silicificação dos arenitos das referidas formações possa ser independente da influência direta da intrusão ou derrame. Constata-se que o topo da Formação Pirambóia, em algumas localidades, também se apresenta silicificado apesar de não contar com a presença de corpos magmáticos.

Amaral (1961) apresenta uma pesquisa específica sobre arenitos silicificados de duas regiões bem distintas no Brasil: no litoral do Estado de Sergipe ("Série" Barreiras) e em Varnhagem, no interior do Estado de São Paulo. O autor enfatiza a importância das observações de campo, as quais mostrariam que realmente a *silicificação pode ter diversas causas*. Dentre estas, cita as magmáticas e toma como exemplo, o Arenito Botucatu em contato com basaltos ou diabásios. Menciona, logo em seguida, causas climáticas envolvendo também rochas ígneas, desta vez ultrabásicas em Tanganica, pesquisadas por Basset (1954). Essas

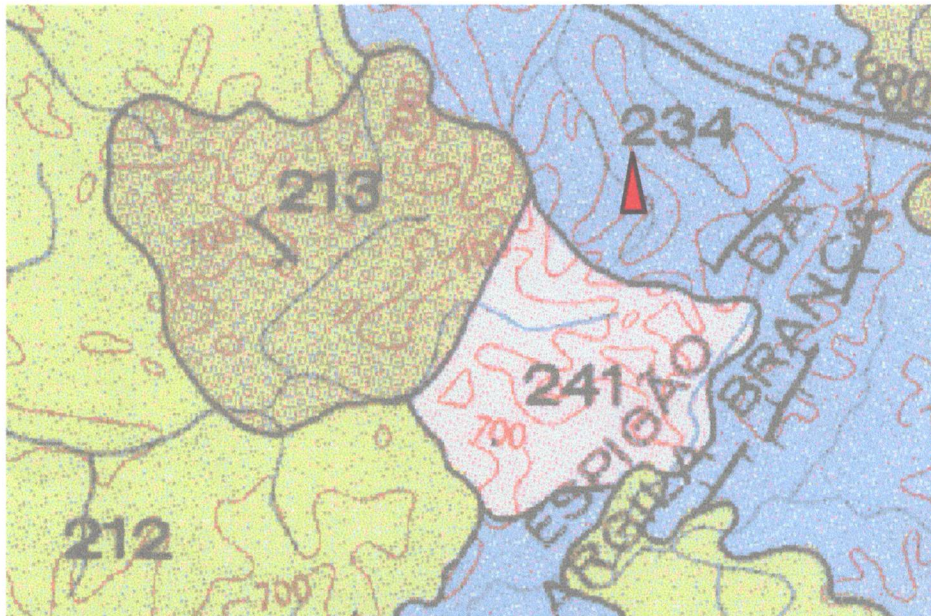
rochas seriam decompostas em clima tropical, fornecendo a sílica cimentante às rochas situadas em posição topográfica inferior. O autor pondera ser perfeitamente plausível que nos casos por ele próprio estudados mais de uma causa tenha agido na silicificação.

Coimbra *et al.* (1981) estudaram a silicificação nos arenitos da Formação Bauru, no Estado de São Paulo. Tiveram como alvo a serra de Itaqueri, no norte do estado, além de outras serras onde afloram os arenitos Botucatu e Bauru silicificados. Suas conclusões incluem a origem hidrotermal do processo iniciado por percolação de águas termais silicosas em fraturas. Encontram em Wernick (1966) justificativa para o processo não estar ligado aos basaltos Serra Geral, já que a deposição da Formação Bauru é posterior ao término das atividades magmáticas da Bacia do Paraná.

Fernandes (1992, 1998) afirma que os processos de silicificação na Formação Bauru têm origem hidrotermal e desenvolveram-se maiormente nos estágios finais de deposição das unidades cretáceas suprabasálticas, provavelmente relacionados ao magmatismo alcalino neocretáceo.

Este autor acrescenta dados bastante interessantes a esta pesquisa, ao tratar dados estruturais da Bacia do Paraná como um todo, que possui principais falhas transcorrentes com direções NW e NE. Descreve ainda, que a silicificação está associada preferencialmente a estruturas de direção NE.

Tem-se nas figuras 2 a 4 a seguir, os mapas geomorfológicos para cada área estudada. Nota-se que a orientação das serras de Botucatu, São Pedro e Itaqueri seguem o controle das estruturas citadas, tanto a NW como para NE.



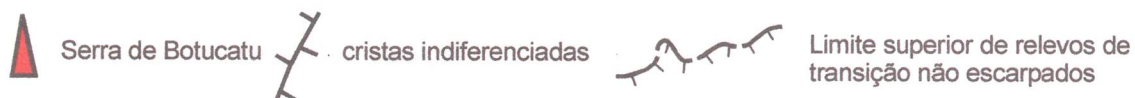
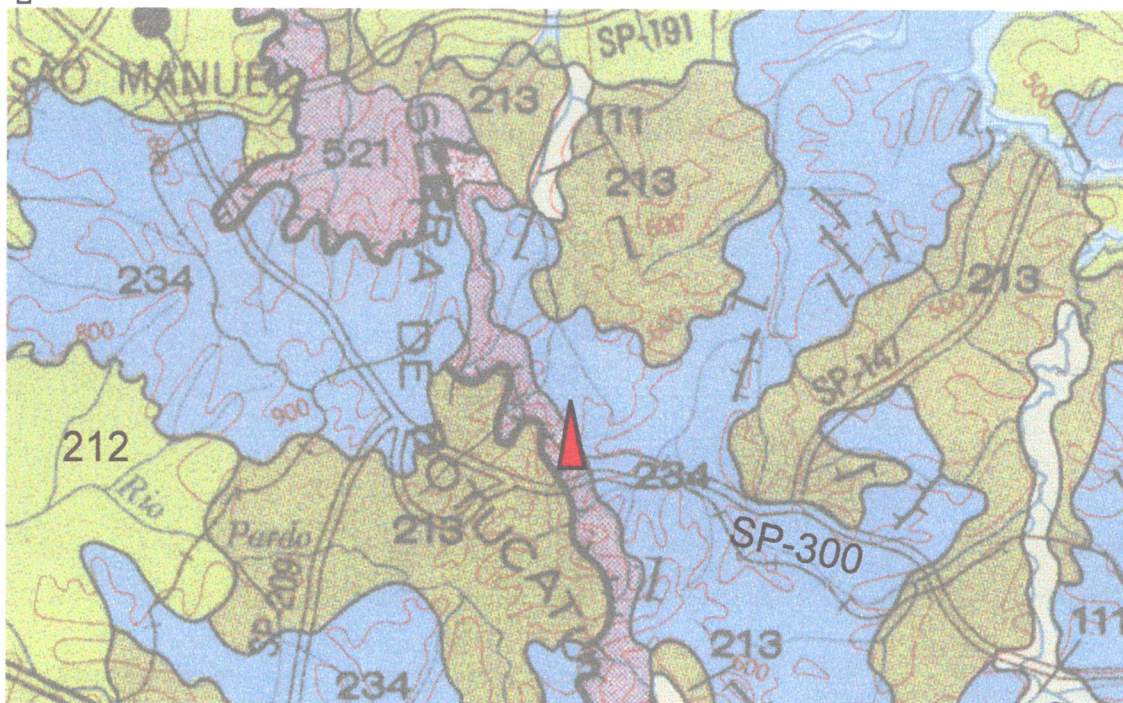
Torre de Pedra



cristas indiferenciadas

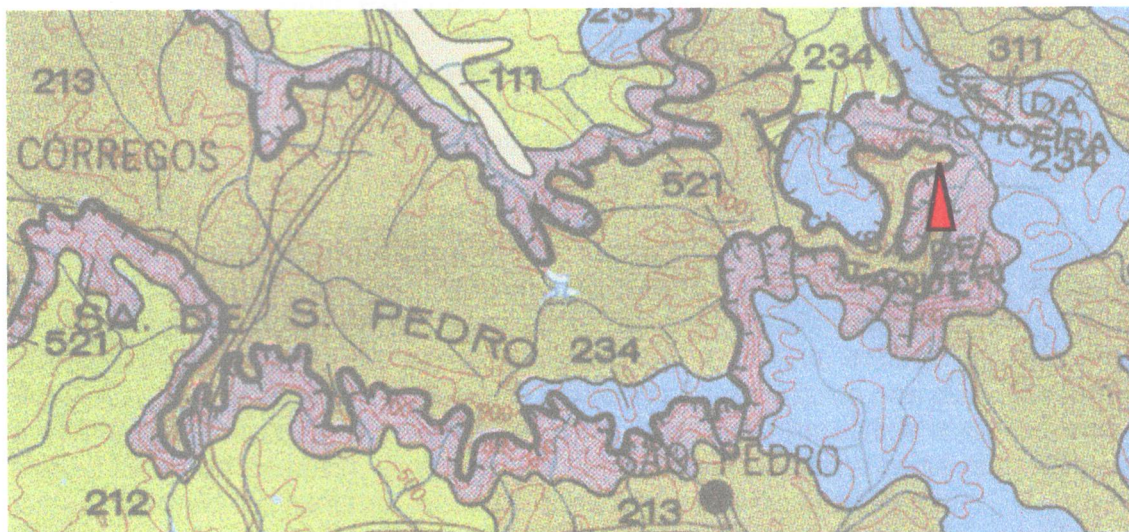
- 212 - COLINAS AMPLAS - predominam interflúvios com área superior a 4 Km², topos extensos e aplainados, vertentes com perfis retilíneos a convexos. Drenagem de baixa densidade, padrão subdendrítico, vales abertos, planícies aluviais interiores restritas, presença eventual de lagoas perenes ou intermitentes.
- 213 - COLINAS MÉDIAS - predominam interflúvios com áreas de 1 a 4 Km², topos aplainados, vertentes com perfis convexos a retilíneos. Drenagem de média a baixa densidade, padrão sub-retangular, vales abertos a fechados, planícies aluviais interiores restritas, presença eventual de lagoas perenes ou intermitentes.
- 234 - MORROTOS LONGADOS E ESPIGÕES - predominam interflúvios sem orientação preferencial, topos angulosos a achatados, vertentes ravinadas com perfis retilíneos. Drenagem de média a alta densidade, padrão dendrítico, vales fechados.
- 241 - MORROS ARREDONDADOS - topos arredondados e localmente achatados, vertentes com perfis convexos a retilíneos, localmente ravinados. Exposições locais de rocha. Presença de espigões curtos locais. Drenagem de média densidade, padrão dendrítico a subdendrítico, vales fechados.

Figura 2 - Mapa Geomorfológico da região da Torre de Pedra



- 111 - PLANÍCIES ALUVIAIS - terrenos baixos e mais ou menos planos, junto às margens dos rios, sujeitos periodicamente a inundações.
- 212 - COLINAS AMPLAS - predominam interflúvios com área superior a 4 Km², topos extensos e aplainados, vertentes com perfis retilíneos a convexos. Drenagem de baixa densidade, padrão subdendrítico, vales abertos, planícies aluviais interiores restritas, presença eventual de lagoas perenes ou intermitentes.
- 213 - COLINAS MÉDIAS - predominam interflúvios com áreas de 1 a 4 Km², topos aplainados, vertentes com perfis convexos a retilíneos. Drenagem de média a baixa densidade, padrão sub-retangular, vales abertos a fechados, planícies aluviais interiores restritas, presença eventual de lagoas perenes ou intermitentes.
- 234 - MORROTOS LONGADOS E ESPIGÕES - predominam interflúvios sem orientação preferencial, topos angulosos a achatados, vertentes ravinadas com perfis retilíneos. Drenagem de média a alta densidade, padrão dendrítico, vales fechados.
- 311 - MESAS BASÁLTICAS - morros testemunhos isolados (peões e baús), topos aplainados a arredondados, vertentes com perfis retilíneos, muitas vezes com trechos escarpados e exposições de rocha. Drenagem de média densidade, padrão pinulado a subparalelo, vales fechados.

Figura 3 - Mapa Geomorfológico da região da Serra de Botucatu



- 111 - PLANÍCIES ALUVIAIS - terrenos baixos e mais ou menos planos, junto às margens dos rios, sujeitos periodicamente a inundações.
- 212 - COLINAS AMPLAS - predominam interflúvios com área superior a 4 Km², topos extensos e aplainados, vertentes com perfis retilíneos a convexas. Drenagem de baixa densidade, padrão subdendrítico, vales abertos, planícies aluviais interiores restritas, presença eventual de lagoas perenes ou intermitentes.
- 213 - COLINAS MÉDIAS - predominam interflúvios com áreas de 1 a 4 Km², topos aplainados, vertentes com perfis convexas a retilíneos. Drenagem de média a baixa densidade, padrão sub-retangular, vales abertos a fechados, planícies aluviais interiores restritas, presença eventual de lagoas perenes ou intermitentes.
- 234 - MORROTOS LONGADOS E ESPIGÕES - predominam interflúvios sem orientação preferencial, topos angulosos a achatados, vertentes ravinadas com perfis retilíneos. Drenagem de média a alta densidade, padrão dendrítico, vales fechados.
- 311 - MESAS BASÁLTICAS - morros testemunhos isolados (peões e baús), topos aplainados a arredondados, vertentes com perfis retilíneos, muitas vezes com trechos escarpados e exposições de rocha. Drenagem de média densidade, padrão pinulado a subparalelo, vales fechados.
- 521 - ESCARPAS FESTONADAS - desfeitas em anfiteatros separados por espigões, topos angulosos, vertentes com perfis retilíneos. Drenagem de alta densidade, padrão subparalelo a dendrítico, vales fechados.

Figura 4 - Mapa Geomorfológico da região da Serra de Itaqueri

3.4.2. Considerações para estudos petrográficos

Wu & Caetano-Chang (1992 a) apresentam o estudo mineralógico dos arenitos alvos do presente trabalho. Notam que há raros estudos desta natureza sobre tais arenitos e citam como exemplos Carvalho (1954), Paraguassu (1968), Wu & Soares (1971) e Wu (1981).

A assembléia mineralógica vista em lâminas confeccionadas para este trabalho de formatura, (descritas no item 3.2. deste relatório) está bastante de acordo com aquela descrita pelos autores. A matriz por eles referida nos arenitos Pirambóia corresponderia provavelmente ao que neste Trabalho de Formatura classifica-se como cimento.

É interessante considerar suas análises sedimentológicas, com base nas quais os autores interpretam abrasão seletiva eólica em clima semi-árido de ambiente desértico e deposição em bacia estável. São observados, segundo eles, apenas minerais mais duros, como quartzo, microclínio, turmalina, estauroilita, magnetita, illmenita, granada, epídoto e zircão. A presença de estauroilita nas duas formações é atribuída pelos autores à sua resistência à abrasão mecânica e ao paleoclima seco (típicos de deserto), uma vez que este mineral possuiria baixa resistência ao ataque químico; os minerais de baixa dureza teriam sido eliminados.

Em Wu & Caetano-Chang (1992 b), a análise restringe-se aos arenitos da Formação Pirambóia. Vale lembrar que são somente tratadas regiões dentro do Estado de São Paulo, assim como no texto anterior. Aqui, é novamente explorada a mineralogia do arenito, com destaque para os seguintes aspectos:

- a- grãos do arcabouço caracterizados por alta porcentagem de quartzo (80%), moderada porcentagem de feldspato («20%) e raros fragmentos de rocha,
- b- matriz e cimento escassos,
- c- rochas classificadas como subarcóseos.

Dentre os tipos de quartzo, o monocristalino ocorre em quantidades maiores que 78% em todas amostras, o policristalino em quantidades menores que 4% e o sílex, quando presente, ocorre como traço. Predominam os feldspatos potássicos sobre os plagioclásios.

3.4.3. Importância econômica

Em pesquisa realizada por Paraguassu *et al.* (1988), foram executados ensaios tecnológicos de caracterização do Arenito Botucatu silicificado e estudadas formas de exploração e uso.

Os resultados permitiram classificar este arenito silicificado como material de extrema dureza e resistência, apresentando valores comparáveis aos de rochas cristalinas de qualidade já reconhecida em termos geotecnológicos. Apesar disso e do fato de existir grande número de pedreiras que exploram estas rochas, boa parte do potencial econômico dos arenitos silicificados Botucatu não é utilizado. Portilho (1988 *apud* Paraguassu, 1988) cita como principais fatores do mau aproveitamento dos recursos materiais existentes: (a) a forma pouco planificada como a exploração é processada, deixando-se de extrair quantidade muito grande de arenito de boa qualidade e gerando acumulações de rejeitos, o que prejudica o

posterior uso da jazida; (b) a falta de "mão-de-obra especializada", dado o fato da extração ser basicamente manual.

Segundo Amaral (1961), não é suficiente que os arenitos silicificados tenham alta pureza de quartzo para terem bom uso econômico; necessitam também possuir 30% de cimento silicoso de fácil transformação em vidro (cristobalita e tridimita). É de grande interesse a textura que tiver menor granulação ou grau de cristalinidade bastante baixo. Deste modo, a transformação do cimento é mais fácil porque a superfície de contato entre os componentes é maior.

Observa-se que parte importante da produção de areia para indústria concentra-se na região entre Analândia e Bofete (SP). Os arenitos silicificados são ainda muito apreciados como pedra de revestimento ou calçamento, por sua tenacidade e cor avermelhada. As cidades próximas à escarpa possuem quantidades prodigiosas de pedreiras, bem como de lajes de arenito silicificado usadas como revestimento de construções em geral.

4. Materiais e Métodos

4.1. Obtenção de dados de campo

Realizou-se trabalho de campo de 24 a 26 de agosto de 2001, na região centro-sul do Estado de São Paulo, arredores de Botucatu e Torre de Pedra, e na região central, serra do Itaqueri e proximidades (Figura 1).

Foi essencial a investigação de campo para a conclusão das pesquisas. Os planos de coleta de amostras e confecção de perfis foram estritamente direcionados para a obtenção de informações relevantes ao estudo da silicificação. Observaram-se relações de contato entre as formações e, principalmente, estruturas propícias à percolação de soluções silicificadoras pelas rochas (falhas, fraturas, acamamentos e limites de camadas em geral).

Foram feitas fotografias em filme de papel convencional e também em *slides*.

A finalidade dessas atividades foi confeccionar seções geológicas, com base topoplanimétrica em cartas topográficas 1:50.000, fotografias aéreas 1:25.000 e medidas de aparelho GPS. Durante a realização das seções, as principais atividades foram: análise de fácies e horizontes estratigráficos, com confecção de seções colunares; análise geométrica de estratificações cruzadas de médio e grande porte e superfícies de truncamento, com ênfase para sua relação espacial com corpos magmáticos; coleta sistemática, por fácies e/ou horizontes diferenciados, medidas de atitude de estratificação cruzada com bússola Clar, e amostragem seletiva de arenitos consolidados, destinados a estudos laboratoriais.

4.2. Estudos laboratoriais

4.2.1. Análise petrográfica

A finalidade do estudo petrográfico foi confrontar as fácies e unidades reconhecidas em campo com possíveis petrofácies estabelecidas por microscopia

óptica, e avaliar a possibilidade de existência de contrastes de história diagenética entre amostras com diferentes graus de silicificação aparente.

Os estudos petrográficos serviram também para a seleção prévia das amostras e microfeições submetidas a detalhamento químico-textural no equipamento de MEV-EDS. As análises de MEV-EDS foram realizadas preferencialmente em amostras situadas em posições estratigráficas ou geomorfológicas consideradas chaves. Uma vez localizadas ao microscópio óptico, as microfeições de interesse foram assinaladas na própria lâmina descoberta, com uso de caneta para retroprojektor, ponta fina, para poderem ser facilmente encontradas durante a análise ao MEV-EDS.

Foi realizada a Impregnação de cada amostra pouco consolidada posteriormente enviada para laminação. O procedimento deu-se da seguinte maneira:

- a) As amostras foram acondicionadas em estufa para retirar a umidade, e lá permaneceram por 24 horas.
- b) As amostras foram reduzidas a um tamanho aproximado de 1cm^3 para serem colocadas em porta-amostras de borracha.
- c) A proporção de cada item para impregnação foi de: 50g de resina (Epoxyglass 1204- XGY11); 7g de álcool etílico ($\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$); 19 de corante azul de Orasol; 5g de endurecedor (Epoxyglass), este colocado por último para evitar o endurecimento da mistura antes de terminar a impregnação.
- d) Em seguida, deixaram-se as amostras no vácuo dentro dos frascos de borracha (Struers) de 30mm de diâmetro e deu-se início ao gotejamento após algum tempo de repouso das amostras no aparelho até a pressão parecer estabilizada.
- e) A velocidade de gotejamento mais eficiente para o aparelho de vácuo foi de cerca de uma gota por segundo. Atentou-se para que as gotas caíssem ao lado da amostra e nunca sobre esta.
- f) Após o término do processo, retirou-se o vácuo, e deixaram-se as amostras ao menos duas horas sobre a bancada, para só então acondicioná-las na estufa. Esperou-se um dia para que elas estivessem secas e rígidas.

O estudo das lâminas petrográficas de cada amostra foi efetivado em onze passos (Giannini 2001). A finalidade dessa organização em passos foi disciplinar escalas e enfoques de exame da amostra. Desse modo, pretendeu-se partir da escala meso para a microscópica, do geral para o particular, das feições deposicionais para as diagenéticas, e dos aspectos descritivos para os interpretativos. Os passos podem ser descritos como segue:

1. Descrição mesoscópica sucinta, com destaque para cor, grau de alteração e estruturas sedimentares
2. Estimativa modal percentual de componentes petrográficos deposicionais (arcabouço e matriz) e diagenéticos (cimento e porosidade secundária)
3. Descrição dos aspectos deposicionais do arcabouço, isto é, mineralogia, textura e petrotrama. No estudo da textura, procurou-se avaliar a granulação modal, o desvio-padrão e o grau de seleção granulométricos de acordo com a tabela de estimativa visual de Pettijohn *et al.* (1972), e os parâmetros de forma (esfericidade e arredondamento) segundo a escala de Powers (1953). No estudo da petrotrama, atentou-se para orientação,

imbricação e empacotamento, bem como para segregação granular gerada por diferenças de textura, mineralogia ou pelo arranjo espacial.

4. Descrição da matriz, incluindo mineralogia e textura, e identificação de matriz falsa (pseudo, orto e epimatriz), seguindo critérios de Dott (1964) e Dickinson (1970).
5. Descrição da mineralogia e textura do cimento, com indicação de possíveis gerações de cimentos.
6. Descrição de tipos de contato intergranular e de feições de quebra ou deformação de grãos, e avaliação de seu significado enquanto indícios de compactação química e mecânica, respectivamente.
7. Descrição do tipo de porosidade secundária segundo a classificação de Choquette & Pray (1971).
8. Avaliação da maturidade mineralógica do arenito, segundo classificação de Folk (1968).
9. Avaliação da maturidade textural do arenito, segundo o critério triplo escalonado de Folk (1968).
10. Classificação petrográfica da rocha segundo Dott (1964).
11. Tentativa de interpretação paleoclimática e paleotectônica, baseada nos critérios de Krynine (1948) e Dickinson e Suczek (1971).

4.2.2. Análise ao sistema MEV-EDS

Este método mostrou-se essencial no reconhecimento dos diversos tipos de cimento encontrados, visto que estes eram quase em totalidade compostos de micro a criptocristais que não podiam ser identificados ao microscópio comum. As amostras são recobertas com uma fina camada de ouro quando se quer obter boas imagens da textura e feições específicas das amostras. Para a caracterização dos elementos contidos nestas, o melhor recobrimento é o de carbono.

De acordo com a descrição de Giannini (2001), o sinal eletrônico produzido pela interação do feixe de elétrons com a superfície da amostra pode ser colhido por três tipos de detectores. Um primeiro detector, de elétrons secundários (SE1), capta preferencialmente os elétrons ejetados a partir da própria amostra, cuja energia é controlada pela distância percorrida. Desse modo, a imagem produzida pelo detector SE1 pode ser considerada um reflexo da topografia da amostra. O segundo detector capta os elétrons retroespalhados (*backscattered detector* ou QSBD), isto é, os elétrons incidentes difratados após o choque e penetração na camada superficial da amostra. A energia destes elétrons depende da densidade atômica da amostra penetrada, de modo que a imagem produzida denota variação composicional (peso atômico médio da área afetada pelo feixe): os elementos mais leves produzem tonalidades de cinza mais escuras enquanto os elementos mais pesados produzem tonalidades mais claras. O terceiro detector é dimensionado para captar sinais de raios X produzidos pela interação entre feixe de elétrons e amostra. Este detector é conhecido como espectrômetro de energia dispersiva (*energy dispersive spectrometer* ou, abreviadamente, EDS). O sistema MEV-EDS permite executar análises químicas pontuais, com controle visual sobre

o ponto que está sendo analisado, em aumentos de até centenas de milhares de vezes.

O equipamento utilizado para as análises foi o Leo 440I adquirido pelo antigo Departamento de Paleontologia e Estratigrafia do IGc-USP, através de Projeto de Infra-Estrutura Multiusuários da FAPESP (processo 1995/5635-4).

4.2.3. Captura de imagens das lâminas petrográficas

Imagens das lâminas petrográficas foram obtidas a partir de uma câmera acoplada ao microscópio do Laboratório de Petrografia Sedimentar do IG-USP, por sua vez, conectada à um microcomputador. A intenção é de registrar a petrofábrica das amostras.

5. Desenvolvimento do Trabalho

O trabalho foi dividido em duas etapas: o primeiro, de organização e estudo das coleções de amostras já existentes, pertencentes ao orientador e sua equipe; o segundo, de execução de trabalhos de campo, com coleta de amostras próprias, e respectivos estudos destas.

Da coleção de amostras das formações Pirambóia e Botucatu coletadas em trabalhos de campo prévios, foram selecionadas para estudo petrográfico aquelas de maior interesse em relação ao tema da silicificação desses arenitos. As amostras foram enviadas para laminação em lotes de 20 lâminas (número máximo admitido, por lote, pela Seção de Laminação para trabalhos de formatura), e executada a petrografia. Estes estudos petrográficos foram orientativos para a escolha das amostras analisadas ao MEV-EDS, que se constituiu no passo a seguir.

Os trabalhos de campo possibilitaram obter novas amostras, que seguiram o mesmo roteiro analítico já descrito.

Os dados e resultados de campo e analíticos foram então integrados permitindo a comparação e discussão dos diversos aspectos e modelos genéticos existentes sobre silicificação na literatura. Os dados, descrições, interpretações, discussões e conclusões alcançadas foram consubstanciadas, permitindo a elaboração do presente relatório final.

O quadro abaixo ilustra de forma resumida as principais atividades realizadas, em ordem cronológica:

Atividades realizadas	Mês do Ano de 2001											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Revisão bibliográfica	X	X	X	X					X	X		
Análises petrográficas: seções delgadas				X	X	X	X	X	X			
Análises ao sistema MEV-EDS						X				X		
Trabalhos de campo: perfis-amostragem								X				
Tratamento de resultados de campo								X	X			
Tratamento de resultados analíticos							X	X	X	X		
Elaboração de relatórios		X	X			X				X	X	

Quadro 1 – Cronograma das atividades realizadas no período proposto para pesquisa

A principal dificuldade encontrada foi a elaboração de um modelo genético consistente e adequado para explicar o processo de silicificação, a partir daqueles já existentes na literatura, através da abordagem metodológica adotada neste trabalho. Notou-se que para uma caracterização mais precisa e confiável destes processos são necessários estudos e métodos complementares (tanto de campo como laboratoriais), os quais entretanto, fogem do escopo deste trabalho. Pode-se ainda citar que nenhum trabalho anterior foi inteiramente bem sucedido na elaboração de um modelo genético totalmente satisfatório para a área.

6. Resultados Obtidos e Comentários

6.1. Torre de Pedra

O morro testemunho denominado Torre de Pedra fica próximo à cidade homônima, a 170 quilômetros de São Paulo, na margem da Rodovia Castelo Branco. O acesso é feito por uma estrada de terra que contorna a propriedade na qual se encontra a torre de 80 metros de altura composta por Arenito Pirambóia. O perfil esquemático pode ser visto na figura 5.

Foram explorados dois afloramentos nessa localidade. No primeiro (ponto 3), perto da base da torre, ainda na estrada de acesso, tem-se a Formação Pirambóia Inferior, próxima ao contato com a Formação Teresina, esta observada nos cortes ao longo da estrada, durante a subida em direção à Torre de Pedra, sob a forma de ritmitos argilosos verdes que se apresentam empastilhados.

No ponto 3 (PRANCHA 1, fotos 1 e 2), observa-se uma soleira de diabásio pouco espessa (<1,5m) com apófises, que trunca as estratificações dos arenitos. São estratificações cruzadas acanaladas de séries métricas com clastos de lama em arenito muito fino a médio, bege avermelhado. Foram coletadas oito amostras de arenito com controle em relação à distância do sill: A (0 a 10cm acima), B (15 a 20cm acima), C (10 a 15cm abaixo), D (30 a 35cm abaixo), E (75 a 85cm abaixo), F (65 a 75cm acima), G (0 a 10cm acima) e H (1,30 a 1,20m acima).

As amostras retiradas imediatamente em contato com o corpo magmático são nitidamente mais resistentes que as demais. Esse é o caso da amostra C, cujas análises petrográficas indicaram a presença de óxidos/hidróxidos de ferro, resultantes de dissolução de minerais opacos (PRANCHA 2, imagem 1), porém sem cimento intersticial de sílica.

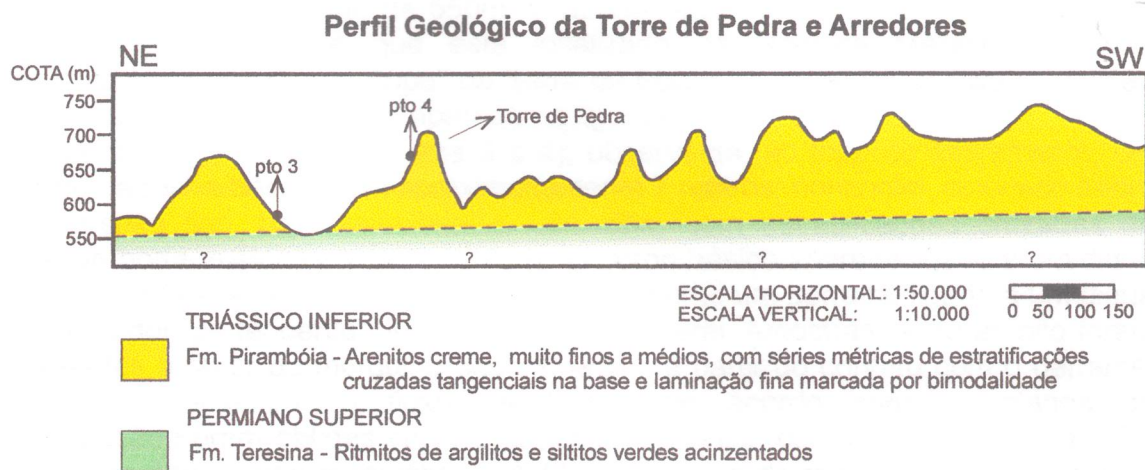


Figura 5 - Perfil Geológico da Torre de Pedra

O segundo afloramento (ponto 4) (PRANCHA 5, foto3) compreende o trecho de quase 30m que se pode alcançar ao subir a torre pela estreita trilha adjacente.

Ele foi dividido em três fácies (PRANCHA 1, foto4): a inferior é constituída de arenito maciço siltoso pouco silicificado, com granulação variando de areia fina a grossa e grãos bem arredondados; a intermediária, com 1m de espessura, é formada de arenito fino a grosso siltoso com laminação ondulada e feições de interduna úmida soterrada (flocos de lama verde encurvados isolados, confinados em camada de areia grossa de 5cm de espessura); e a superior é formada por arenito fino bem selecionado, com séries de estratificações cruzadas tangenciais na base e níveis de areia grossa que ocorrem imediatamente abaixo desses pacotes. A fácies superior mostra-se a mais resistente. É importante observar que

a torre possui muitas fraturas verticais, estas, certamente influenciam na intensidade pontual da silicificação, seja intempérica ou por percolação de fluidos hidrotermais.

Petrograficamente, as amostras de arenito Pirambóia, provenientes da Torre de Pedra, contêm, em média 65% de quartzo e 35% de feldspato e apresentam filossilicatos, na forma de película fina, como cimento principal.

Ao MEV, o primeiro cimento, constituído supostamente de óxidos/hidróxidos de ferro, apresenta-se em quantidade bem menor que nos arenitos Botucatu. Além da análise por fácies, também foram examinadas amostras da crosta enrijecida que recobre toda a superfície da torre (PRANCHA. 2, imagens 2, 3, 4, 5 e 6). Nas imagens 5 e 6, observa-se um cimento que recobre heterogeneamente toda a amostra e, conforme a microanálise de EDS, contém Mg, Fe, Al e Si. Trata-se de esmectita.

6.2. Serra de Botucatu

A altitude da zona urbana de Botucatu é 780 m, mas o pico mais alto da região está situado a 920m de altitude (Morro de Rubião Júnior). A Depressão Periférica na região registra altitude de 550m. O afloramento dos pontos 1 e 2 encontra-se em frente ao Mirante que está localizado na Rodovia Marechal Rondon (PRANCHA 3, foto1), no "topo" da Serra de Botucatu, onde fica a Capela de São Cristóvão. O perfil geológico aparece na figura 6.

No ponto 1 (PRANCHA 3, fotos 3 e 4), observa-se, ao topo do afloramento, um corpo de rocha básica com aproximadamente 7 metros, horizontal, colocado sobre um arenito fino, bem selecionado, vermelho, com estratificações cruzadas de grande porte, métricas a decamétricas. O corpo básico aparece ligado a um dique com 5m de espessura, constituindo aparentemente um derrame ligado a um dique alimentador, pertencentes à Formação Serra Geral. Amostras deste arenito foram coletadas a favor do mergulho das camadas, a partir do contato com o derrame, para se considerar o fluxo de fluidos de acordo com os planos de percolação. Foram obtidas cinco amostras de arenito, com controle em relação à distância dos corpos magmáticos: A (2m abaixo do derrame, e entre 2 e 12m a esquerda do dique), B (0,2m abaixo, e 2 a 12 m a esquerda), C (1,5m abaixo, e 5 a 12m a esquerda), D (15m abaixo, e 15,4 a 7m a esquerda), E (15m abaixo, e 3,5 a 7m a esquerda). As amostras B e C mostram-se silicificadas, sendo que a C pertence a uma camada heterogeneamente silicificada.

O segundo afloramento (PRANCHA 3, imagens 2 e 4), constitui-se de conjuntos de lentes métricas de arenitos cimentados, intercomunicadas por finas vênulas horizontais a diagonais, de mesma litologia, que preenchem fraturas em meio a camadas de derrames basálticos. Tais conjuntos consistem em arenitos intratrapeanos que possuem suas bordas aparentemente "cozidas" por silicificação. Há também, abaixo desses, alguns poucos xenólitos de arenito bastante silicificado.

O contato inferior do basalto dá-se com arenitos silicificados com resistências pontualmente diferentes do qual foram coletadas amostra e diversos níveis de distância ao derrame: D_{topo} (10 a 23cm abaixo do derrame), D_{meio} (23 a 33cm

abaixo), D_{base} (45 a 55cm abaixo), E (55 a 60cm abaixo), F (75 a 85cm abaixo), G (100 a 110cm abaixo).

Nos arenitos intratrapeanos da Formação Serra Geral, especialmente naqueles coletados imediatamente acima de corpos vulcânicos, são encontrados clastos de agregado criptocristalino ferruginoso, às vezes formando espessa carapaça sobre material fibro-radiado, criptocristalino, de baixíssima birrefringência, com alongação positiva (+) (quartzina ou zeólita?). Estes clastos exibem, algumas vezes, hábito drusiforme, como em um geodo. Podem provir de retrabalhamento de amígdalas vulcânicas e, portanto ser resultado de contribuição dos derrames Serra Geral.

Ao longo da mesma rodovia, é observado o contato da Formação Serra Geral com os Arenitos Botucatu. Estes, possuem as mesmas texturas e estruturas sedimentares que os arenitos intratrapeanos. Foram examinadas amostras retiradas de proximidades do contato entre as formações.

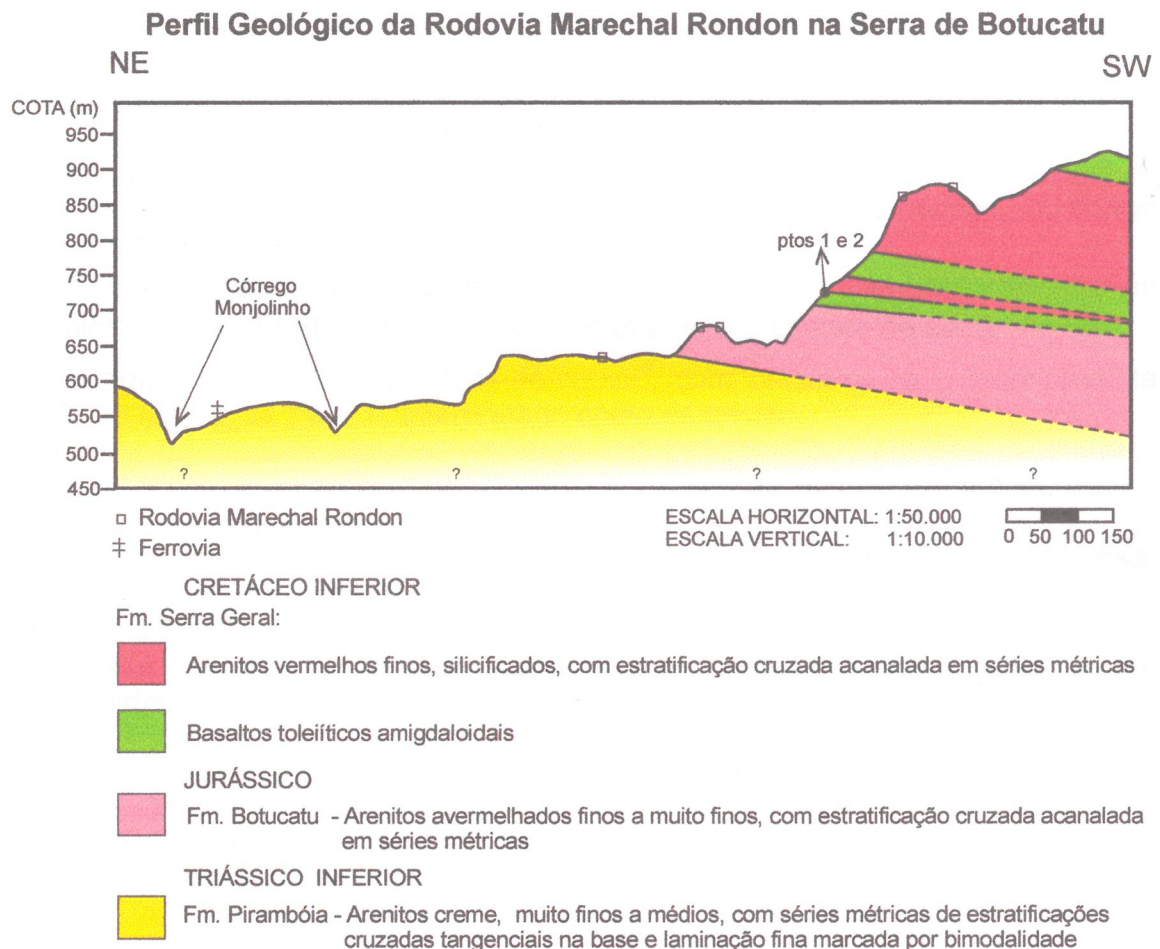


Figura 6 - Perfil Geológico da Serra de Botucatu

Petrograficamente, o principal cimento nos arenitos Botucatu é o óxido/hidróxido de ferro. Aparece em forma de películas, cutículas ou até intersticial e confere ao arenito a clássica coloração vermelha.

É comum a ocorrência de película bastante fina de material incolor isótropo (« 0,002 mm), em torno dos grãos do arcabouço. O mesmo tipo de material ocorre também formando cimento espesso (até 0,025 mm), com bandas concêntricas. Em algumas lâminas, observa-se o cimento, em forma de cutícula fibrosa, lamelar, com extinção cintilante, que aparenta ser esmectita. Poucas vezes foi possível detectar crescimento secundário de quartzo. Este tipo de cimento só pôde ser distinto em presença de uma fina linha de partículas de óxidos ("primeira cimentação") que define os limites dos grãos de quartzo clástico. Sem esta linha não seria possível a identificação do crescimento secundário de quartzo, uma vez que este possui continuidade ótica com o quartzo clástico e, por vezes, aparece arredondado, indicando retrabalhamento do sedimento. Existem várias gerações dessas linhas de óxidos, inclusive como cimento externo ao crescimento secundário. Crescimento secundário sobre grãos de feldspato ocorre com menos frequência.

Na análise ao MEV, foi possível distinguir sete tipos de material, que se encontram numerados na PRANCHA 4, IMAGEM 2.

1- Grão prismático subarredondado, com formas clivadas angulosas superpostas, interpretado como feldspato com crescimento secundário euédrico, conforme encontrado em microscópio óptico.

2- Cobertura aparentemente espessa (até 0,01 mm) de massa botrioidal. Através da microanálise por EDS, detectou-se unicamente a presença de sílica.

3- Agregado com hábito em "pés-de-couve", com presença, à microanálise de EDS, de Mg, Al, Si, Fe e Ti, interpretado como esmectita.

4- Forma de "parede tortuosa" formada por camadas concêntricas de material fibro-radiado que preenche poro à direita do cristal de feldspato marcado com o número 1. Há apenas sílica em sua composição.

5- Botrióides de material fibro-radiado. Sua composição também é apenas silicosa.

6- Feição similar à analisada no número 2, porém mais espessa. Este material também é constituído por sílica.

7- Crosta de material similar a 2, 5 e 6, porém com aspecto de menor cristalinidade. A composição detectada é mais uma vez silicosa.

Em algumas amostras foi observado um outro cimento, de formação posterior aos demais. Ocorre na forma de flocos de até 0,005mm que recobrem o cimento esmectítico. Os resultados de análise EDS mostraram Al, Ca, Si como componentes que foram interpretados como caulinita.

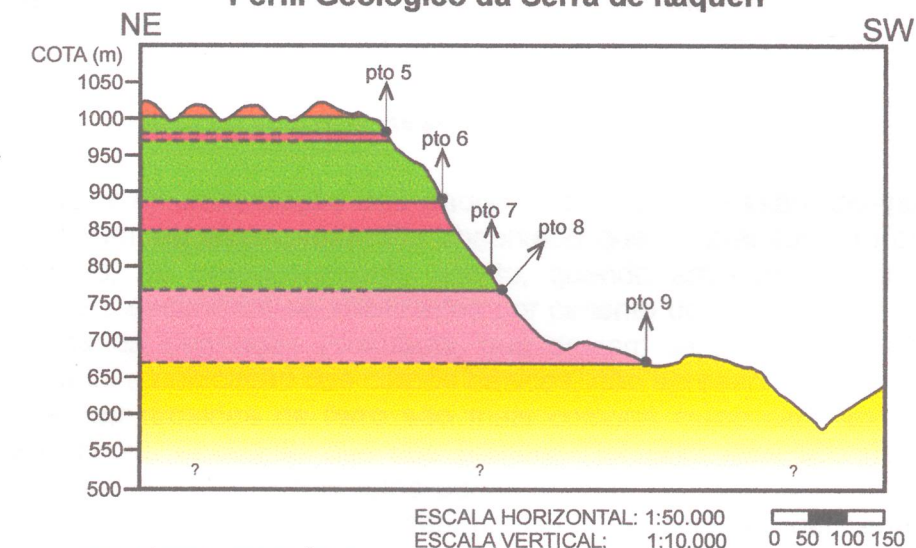
6.3. Serra do Itaqueri

A Serra de Itaqueri localiza-se próxima ao município de Ipeúna, e possui cotas máximas em torno de 1.020m, enquanto sua base alcança os 600m. Este desnível favorece a observação da estratigrafia, conforme mostrado no perfil da figura 7.

Este perfil foi elaborado a partir do caminhamento efetuado do topo da serra em direção à base. No ponto 5 observou-se arenito fino bem selecionado, bege, pouco consolidado, com séries de estratificação cruzada acanalada maiores que 2m, de onde foram coletadas duas amostras (A e B) das quais as seções petrográficas confirmaram a não silicificação desta rocha (PRANCHA 6, imagem 1). Acima e abaixo deste arenito ocorrem derrames basálticos, que indicam se tratar de um arenito intratrapeano, com pequena espessura (aproximadamente 10m).

No ponto 6, é encontrado um arenito médio, maciço, bem selecionado, vermelho, extremamente silicificado, sotoposto a um derrame básico com muitas amígdalas centimétricas de material argiloso. Os estudos petrográficos e de MEV demonstram a intensa silicificação sofrida por este arenito (PRANCHA 6, Imagens 3 e 4). Este arenito é limitado em sua base por outro derrame. O ponto 8 marca o contato deste primeiro derrame com os arenitos da Formação Botucatu, abaixo.

Perfil Geológico da Serra de Itaqueri



CRETÁCEO - TERCIÁRIO

- Fm. Itaqueri - arenitos vermelhos médios a grossos com níveis conglomeráticos; laterizados, maciços

CRETÁCEO INFERIOR

Fm. Serra Geral:

- Arenitos intratrapeanos, beges a vermelhos, finos a muito finos, pouco a extremamente silicificados, com estratificação cruzada acanalada em séries métricas

- Basaltos toleíticos amigdaloidais com disjunções colunares

JURÁSSICO

- Fm. Botucatu - Arenitos avermelhados finos a muito finos, com estratificação cruzada acanalada em séries métricas

TRIÁSSICO INFERIOR

- Fm. Pirambóia - Arenitos creme, muito finos a médios, com séries métricas de estratificações cruzadas tangenciais na base e laminação fina marcada por bimodalidade

Figura 7 - Perfil Geológico da Serra de Itaqueri

No ponto 9, ocorre o contato entre as formações Botucatu e Pirambóia. Ambas formações são representadas por arenitos extremamente friáveis neste afloramento. Foram coletadas amostras de cada uma destas formações.

Petrograficamente, os arenitos não silicificados (PRANCHA 6, imagens 1 e 5) possuem nítida porosidade, com empacotamento aberto com grãos em contato pontual, cimento de óxidos/hidróxidos de ferro preenchendo poros, e cimento de filossilicatos em hábito de cutículas, e não apresentam nenhum tipo cimento silicoso. Já os arenitos silicificados (PRANCHA 6, imagens 2 e 3) também apresentam empacotamento aberto, embora se note nestes a quase total ausência de porosidade, devido ao fechamento dos poros ocorrido através do espessamento das películas de cimento silicoso ao redor dos grãos do arca-bouço. As análises de MEV auxiliaram no reconhecimento dos cimentos dos arenitos. Foi observada cristobalita (PRANCHA 6, imagem 4) como cimento silicoso, enquanto esmectita (PRANCHA 6, imagem 6) ocorre como cimento em forma de cutícula sobre os grãos não silicificados.

7. Interpretação dos Resultados;

A partir da observação dos dados e de sua discussão, diversas interpretações puderam ser alcançadas. Foi observado que os arenitos da Formação Botucatu, eólicos, de empacotamento aberto, quando em contato com rochas básicas, sempre encontram-se silicificados por cimento de cristobalita a até 2m do contato. Já os da Formação Pirambóia, que deviam se apresentar saturados em água durante a colocação dos corpos básicos, não apresentam silicificação.

Óxidos/hidróxidos de ferro são mais comuns como cimento tardio nos arenitos Pirambóia, enquanto que nos arenitos Botucatu este tipo de cimento é quase sempre precoce. Estes fatos parecem levar à hipótese de que a colocação dos corpos básicos propiciou metamorfismo de contato, que enrijece a superfície atingida em poucos metros de espessura, no caso do arenito Botucatu. Se houvesse água de poro, a espessura de silicificação poderia ser maior.

Mais detalhadamente, ao MEV, identificou-se duas camadas de cimentos sobre o cimento silicoso, quando este está presente: a primeira, mais comum, constituída por esmectita, e a segunda, mais restrita e posterior, por caulinita, indicando a mudança tanto da composição do fluido como das condições físico-químicas de precipitação. Para o cimento esmectítico são necessárias condições de clima sazonal e mais seco para que haja a preservação da argila de bissialitização. Já a caulinita deve representar uma alteração da esmectita inicial, devido novamente a mudanças climáticas e na composição do fluido, agora menos magnesianas.

Segundo os dados de evolução da Bacia do Paraná compilados por Fernandes (1992 e 1998), silicificação também ocorreu nos arenitos do Grupo Bauru. Todavia, é arriscado afirmar que a cimentação por sílica deu-se concomitantemente, ou pelos mesmos processos, em ambos grupos São Bento e Bauru. Deve-se atentar para o fato da existência de processos cíclicos de diversas naturezas, tais como variações do nível hidrostático causadas por mudanças

tectono-estruturais ao longo do tempo, e que também podem gerar silicificação. Estas variações poderiam explicar a ocorrência da silicificação, de uma forma satisfatória com os dados observados, também nos arenitos do Grupo São Bento, com a sobreposição de dois eventos de silicificação, o primeiro ligado ao magmatismo básico, e o segundo ao levantamento terciário a quaternário destes grupos por compensação isostática, que causaria basculamento da Plataforma Sul-Americana e variações nos níveis dos aquíferos, induzindo altos gradientes e fluxos hidráulicos na borda leste da bacia. Estes fluxos causariam dissolução de sílica, e reprecipitação posterior, por resfriamento das soluções, que com isto se tornariam supersaturadas. Com a diminuição do fluxo d'água, ocorreria então, a deposição do cimento argiloso, agora mais pobre em sílica.

8. Conclusões

A silicificação dos arenitos pode estar relacionada a diversos modelos genéticos; no caso particular da Serra do Itaqueri, duas hipóteses podem estar associadas: "cozimento" dos arenitos Botucatu durante o magmatismo Serra Geral, por metamorfismo de contato, sem minerais neoformados; e a segunda, a cimentação por sílica, a partir da elevação e posterior rebaixamento do lençol freático.

Os arenitos silicificados do interior do Estado de São Paulo foram cimentados principalmente por fechamento dos poros dos arenitos por cimentação de espessas camadas de cristobalita (sílica microcristalina) ao redor dos grãos do arcabouço.

Para a hipótese que envolve percolação de fluidos na geração da cimentação, as soluções cimentantes poderiam ter pH extremamente alcalino quando adquiriram a sílica, ou alternativamente, a dissolução poderia ser explicada também por um intenso fluxo d'água circulante no paleo-aquífero, causando altas razões de interação fluido/rocha, em pH não tão alto. Isso pode ter ocorrido durante a elevação regional terciário-quaternário da porção leste da bacia, que causaria os altos gradientes hidráulicos necessários, além do resfriamento das águas de poro, com a conseqüente supersaturação e precipitação do excesso de sílica da solução como cimento.

E compreensível que os arenitos Botucatu e Serra Geral, estudados na seção ao longo da Rodovia Marechal Rondon, possam ser encaixados no mesmo modelo que o da Serra de Itaqueri. As principais características mineralógicas, relações estruturais e geomorfológicas, e litologias envolvidas encontram-se em contexto idêntico.

Para os arenitos da Formação Pirambóia na região de Torre de Pedra, as teorias mais coerentes para a falta de cimento de sílica seriam: a) a ausência de sílica dissolvida nas soluções percolantes; b) o baixo gradiente termal na relação destes arenitos com os corpos magmáticos intrusivos; e c) a de mais remota possibilidade em relação aos dados disponíveis, haveria a "dessilicificação" destes arenitos.

9. Bibliografia

- ALMEIDA, F.F.M. & BARBOSA, O. 1953. Geologia das quadrículas de Piracicaba e Rio Claro, Estado de São Paulo, Brasil. Bol. DNPM/DGM, 143:96p.
- ALMEIDA, F.F.M. 1954. Botucatu, um deserto triássico da América do Sul. DNPM Notas Preliminares e Estudos, Rio de Janeiro, 86, p.1-21.
- AMARAL, S. E. 1961. Silicificação intersticial de arenitos de Sergipe (Série Barreiras) e de Varnhagem, SP (Série Itararé). Departamento de Geologia e Paleontologia da Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras da Universidade de São Paulo. Bol. Soc. Bras. Geol., vol. 10, nº 1, Maio, 1961).99 p.
- BÓSIDO, N.J. 1973. Geologia da Área de São Pedro, SP. Rio Claro, SP, Fac. Filos. Ciências e Letras. Tese de Doutorado (inéd.). 125 p.
- CAETANO-CHANG, M.R. 1993. Estado d'arte dos Conhecimentos Sedimentológicos/Estratigráficos das Formações Pirambóia e Botucatu no Estado de São Paulo. In: SIMP. CRONOEST. DA BACIA DO PARANÁ, 1, Rio Claro, SP. Bol. Res. Expandidos...Rio Claro, UNESP-SBG, p.84-85.
- CAETANO-CHANG, M.R. 1997. A Formação Pirambóia no Centro-Leste do Estado de São Paulo. Rio Claro, SP, Inst. Geoc. e Ciências Exatas, UNESP. Tese de Livre-Docência (inéd.). 196 p.
- CLAISSE, G. 1972. Étude sur la solubilization du quartz en voie d'alteration. Cahier Orstom, Serie Pedologie, Vol. X, nº 2: p. 97-122.
- COIMBRA, A. M.; BRANDT NETO, M.; COUTINHO, J. M. V., 1981. Silicificação dos arenitos da Formação Bauru no Estado de São Paulo. In: A FORMAÇÃO BAURU NO ESTADO DE SÃO PAULO E REGIÕES ADJACENTES – MESA REDONDA, São Paulo, 1981. Coletânea de trabalhos e debates. São Paulo, SBG. p. 103-111.
- CORDANI, U.G. & VANDOROS, P. 1967. Basaltic rocks of the Paraná Basin. In: BIGARELLA, J.J.; BECKER, R.D.; PINTO, J.D. ed. Problems in Brazilian Gondwana Geology. Curitiba, UFPR. p.207-231.

- DE ROS, L. F.; MORAES, M. A. S. 1984. Seqüência diagenética em arenitos; uma discussão inicial. In: Anais do XXXIII Congresso Brasileiro de Geologia, Rio de Janeiro, RJ. p. 894-904.
- DICKINSON, W.R. 1970. Interpreting detrital modes of graywacke and arkose. Jour. Sedim. Petrol., 40(1/2): 695-707.
- DICKINSON, W. R.; SUCZEK, C. A. 1979. Plate Tectonics and Sandstone Compositions. The American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 63 (12): 2164-2182.
- DOTT, R.H., Jr. 1964. Wacke, graywacke and matrix - what approach to immature sandstone classification? J. Sediment. Petrol., 34(3):625-632.
- FAUCK, R. 1972. Contribution a l'etude des sols des régions tropicales - Les sols rouges sur sables des régions d'Afrique Occidentale. Memoire Orstom, Vol. 13: 257p.
- FERNANDES, L A. 1992. Cobertura cretácea suprabasáltica no Paraná e Pontal do Paranapanema (sp) :os grupos Bauru e Caiuá /Luiz Alberto Fernandes ; [Orient] Armando Marcio Coimbra. Dissertação (mestrado) - universidade de São Paulo. Instituto de Geociências - 25/09/92. São Paulo : S.N., 1992. 129p.
- FERNANDES, L A. 1998. Estratigrafia e evolução geológica da parte oriental da Bacia Bauru (Ks, Brasil) /Luiz Alberto Fernandes. Tese (Doutorado)--Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, 06.07.98. São Paulo, 1998. 216 p.
- FERNANDES, L A.; COIMBRA, A. M.; BRANDT NETO, M., 1993. Silicificação hidrotermal neocretácea na porção meridional da Bacia Bauru. In: Revista do Instituto Geológico, v.14, n.2 , p.19-26, 1993.
- FERNANDES, L. A.; COIMBRA, A. M.,1993. Silicificação hidrotermal neocretácea na porção meridional na Bacia Bauru. In: Simpósio Sul-Brasileiro de Geologia, 5. Boletim de Resumos e Programa. Curitiba: Sbg-Núcleos Pr/Sc/Rs. p.54-5.
- FOLK, R. L. 1968. Petrology of Sedimentary Rocks. Texas, Hemphill's Publish.Co.,1980. 185p.

- FÚLFARO, V.J. & BÓRIO, N.J. 1968. Novas observações sobre a faciologia do Arenito Botucatu no Estado de São Paulo. In: CONG. BRAS. GEOL., 22, Bol. Resumos... Belo Horizonte, SBG, p.57-59.
- GIANNINI, P.C.F. 1993. Sistemas Depositionais no Quaternário Costeiro entre Jaguaruna e Imbituba, SC. Inst. Geoc. Univ. S. Paulo. São Paulo - SP, Tese de Doutorado (inéd.) 2v, 2 mapas, 439p.
- GIANNINI, P.C.F. 2001. As Formações Pirambóia e Botucatu nos Estados de São Paulo e Paraná. São Paulo, Inst. Geoc. Univ. S. Paulo. Relatório final de pesquisa FAPESP. Inédito. 115p.
- KRYNINE, P.D. 1948. Petrology and genesis of the Third Bradford sand. Bull. Pennsylvania State College, 29: 134p.
- LEINZ, V. & SALIENTIEN, B. 1962. Água Subterrânea no Estado de São Paulo e Regiões Limítrofes. *Bol. Soc. Bras. Geol.*, São Paulo, **11**: 27-36.
- LEINZ, V. 1949. Contribuição à geologia dos derrames basálticos do Sul do Brasil. *Bol. Faculd. Filos. Ciênc. Letras Univ. S. Paulo, Bol. Geologia*, **91**(5):61p.
- MAGRO, S.O.; CELESTINO, T.B.; BORTOLUCCI, A.A., 1994. Ensaio de percolação radial em um arenito da Formação Botucatu. In: Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas, 1., Foz do Iguaçu, 6-10 nov. 1994. Anais. São Paulo, ABMS/CBMR, 1994. p.65-72
- MENDES, J.C. 1961. Algumas considerações sobre a estratigrafia da Bacia do Paraná. *Bol. Paran. Geogr.*, **415**:3-33.
- MILANI, E.J.; FRANÇA, A.B.; SCHNEIDER, R.L. 1994. Bacia do Paraná. *Bol. Geoc. Petrobrás*, **8**(1):69-82.
- MORAES REGO, L.F. 1941. A geologia do Estado de São Paulo. São Paulo, 153p. (separata do Boletim D.E.R.).
- PARAGUASSU, A.B. 1968. Contribuição ao Estudo da Formação Botucatu - Sedimentos Aquosos, Estruturas Sedimentares e Silicificação., Esc. Eng. de São Carlos, Univ. S. Paulo. São Carlos, SP. Tese de Doutorado (inéd.),

131p.

PARAGUASSU, A.B. 1972. Experimental silicification of sandstone. The Geological Society of America Bulletin, Vol. 83, nº 9, p. 2853-2858, September 1972.

PARAGUASSU, A.B. 1988. Caracterização Tecnológica do Arenito Botucatu Silicificado na Região de São Carlos - SP. In: Anais do Congresso Latino-Americano de Geologia, Belém, PA. Vol. 1, p. 486-491.

PETTIJOHN, F. J.; POTTER, P. E.; SIEVER, R. 1972. Sand and Sandstone. Heidelberg, Springer-Verlag. 618p.

POWERS, M.C. 1953. A new roundness scale for sedimentary particles. Jour. Sedim.Petrol., 23:117-119.

RENNE, P. R.; ERNESTO, M.; PACCA, I. G.; COE, R. S.; GLEN, J. M.; PRÉVOT, M.; PERRIN, M. 1992. The age of Parana Flood Volcanism, rifting of Gondwanaland, and the Jurassic-Cretaceous boundary. Science, 258: 975-979.

RICCOMINI, C. 1995. Tectonismo Gerador e Deformador dos Depósitos Sedimentares Pós-Gondvânicos da Porção Centro-Oriental do Estado de São Paulo e Áreas Vizinhas. São Paulo, Inst. Geoc. Univ. S.Paulo. Tese de Livre-Docência (inéd.), 100 p.

RODRIGUES, J. E.; VILAR, ORÊNCIO MONJE; BJORNBERG, A J S; PARAGUASSU, A B, 1986. Fenômeno de silicificação em taludes. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 34. Resumos. Goiânia: Sociedade Brasileira de Geologia. Vol.1, p. 519-22.

SALAMUNI, R. & BIGARELLA, J.J. 1967. The Botucatu Formation. In: BIGARELLA, J.J.; BECKER, R.D.; PINTO, J.D. eds. Problems in Brazilian Gondwana Geology. Curitiba, UFPR. p. 197-206.

SANFORD, R.M. & LANGE, F.W. 1960. Basin study approach to evolution of Parana miogeosynclines of South Brazil. Bull.Am. Assoc. Petrol. Geologists, 44(8):1316-1370.

- SCHMIDT, V. e MCDONALD, D. A., 1979. The role of secondary Porosity, in the Course of Sandstone Diagenesis. In: Scholle, P. A. e Schluger, P. R; Eds; Aspects of Diagenesis. Soc. Econ. Paleont. Mineral. Spec. Pub. nº 26, p. 175-207.
- SCHOLLE, P. A. 1979. A Color Illustrated Guide To: Constituents, Textures, Cements, and Porosities of Sandstones and Associated Rocks. MPG. Memoir 28. Published by MPG. Tulsa, Oklahoma, U.S.A., 1979.
- SILVA, F.V. & FERREIRA, F.J.F. 1996. Aplicação combinada dos métodos sinal analítico e deconvolução de Euler a dados aeromagnéticos residuais da região de Fartura (SP-PR). Bol. Paranaense Geociências, 44: 87-96.
- SOARES, P.C. 1973. O Mesozóico Gondwânico no Estado de São Paulo. Rio Claro, SP Fac.Filos.Ciências e Letras. Tese de Doutorado (inéd.). 153 p.
- SOARES, P.C. 1975. Divisão estratigráfica do Mesozóico do Estado de São Paulo. Rev.Bras.Geociências, 5:229-251.
- SOUZA, N.C.D.C.; CELESTINO, T.B.; BORTOLUCCI, A.A.; 1990. Influência do grau de silicificação no comportamento pós-ruptura de arenitos brasileiros. In: CONGRESO SURAMERICANO DE MECANICA DE ROCAS, 3., Caracas, 16-20 oct. 1990. Memorias. Caracas, Soc. Venezolana de Mecanica del Suelo e Ingenieria de Fundaciones/ISRM. Sesión 1, p.113-121
- TEIXEIRA, C.Z.; CELESTINO, T.B.1993. Correlações envolvendo velocidades sônicas, parâmetros elásticos, propriedades-índice e resistência mecânica do arenito Botucatu silicificado da região de São Carlos-SP. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 7., Poços de Caldas, 12-16 set. 1993. Anais. São Paulo, ABGE. Vol.1, p.339-350
- TERRA, G. J. S.; DE ROS, L. F.; MORAES, M. A. S. 1982. Porosidade Secundária nos Arenitos Jurássicos da Bacia do Recôncavo. In: Anais do XXXII Congresso Brasileiro de Geologia, Salvador, BA, Vol. 5, p. 2286-2299.
- THIRY, M. 1997. Continental Silicifications: A Review. In: PAQUET, H.; CLAUER, N. [editors] Soils and sediments: mineralogy and geochemistry. Springer, 1997. NewYork. Cap. 10: 191-221.

TRUCKENBRODT, W. 1997. Petrografia de Arenitos. Cap. Diagênese de Arenitos e Sílex. Apostila (inéd.).

TURNER, S.; RAGELOUS, M.; KELLEY, S.; HAWKESWORTH, C.; MANTOVANI, M. 1994. Magmatism and continental break-up in the South Atlantic: high precision $^{40}\text{Ar} / ^{39}\text{Ar}$ geochronology. *Earth and Planetary Science letters*, 121: 333-348.

VIEIRA, A. J. & MAINGUÉ, E. 1973. Geologia de Semi-Detalhe do Centro e Nordeste do Paraná e Centro-Sul de São Paulo. Ponta Grossa, Petrobras/Desul, 49p (Relatório Petrobras/Desul, 425).

VILAR, O. M.; RODRIGUES, J. E.; BJORNBERG, A. J. S.; PARAGUASSU, A. B., 1986. Fenômeno de silicificação em taludes In: Congresso Brasileiro de Geologia, 34. Resumos. Goiânia: Sociedade Brasileira de Geologia, p. 68. Vol.1 , p. 519-22.

WASHBURNE, C.W. 1930. Geologia do petróleo no Estado de São Paulo. *Bol.Com.Geogr.Geol.Est.S.Paulo*, 22:1-282.

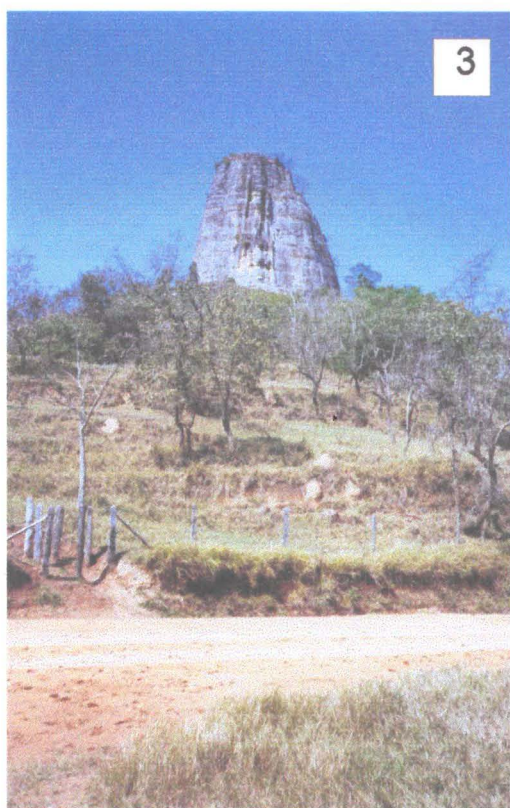
WU, F.; CAETANO-CHANG, M. R. 1992 a. Estudo mineralógico dos arenitos das formações Pirambóia e Botucatu no Centro-Leste do Estado de São Paulo. In: *Rev. IG, São Paulo*, 13(1), 58-68, jan/jun/1992.

WU, F.; CAETANO-CHANG, M. R. 1992 b. Estudo petrográfico de arenitos da Formação Pirambóia a partir de testemunhos de poços na região de Anhembi (SP). In: Congresso Brasileiro de Geologia, 37- SBG/SP, São Paulo, SP, 1992.

ZALÁN, P.V.; WOLF, S.; CONCEIÇÃO, J.C.; ASTOLFI, A.M.; VIEIRA, I.S.; APPI, V.T.; ZANOTTO, O.A.; MARQUES, A. 1991. Tectonics and sedimentation of the Paraná Basin. In: ULBRICH, H.H.G.J. & ROCHA-CAMPOS, A.C. eds. *Gondwana Seven*. São Paulo, Inst. Geoc. Univ. S. Paulo, p.83-117.

Anexos

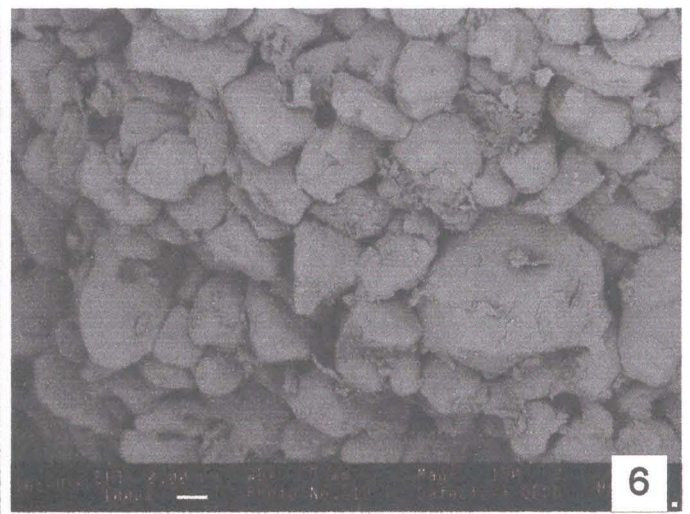
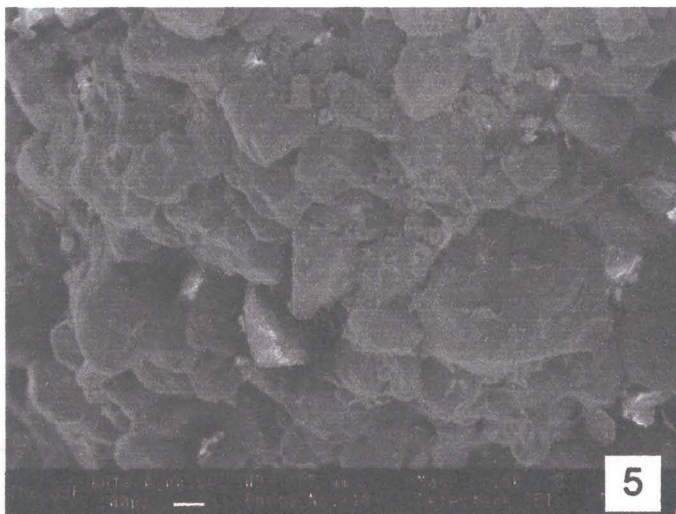
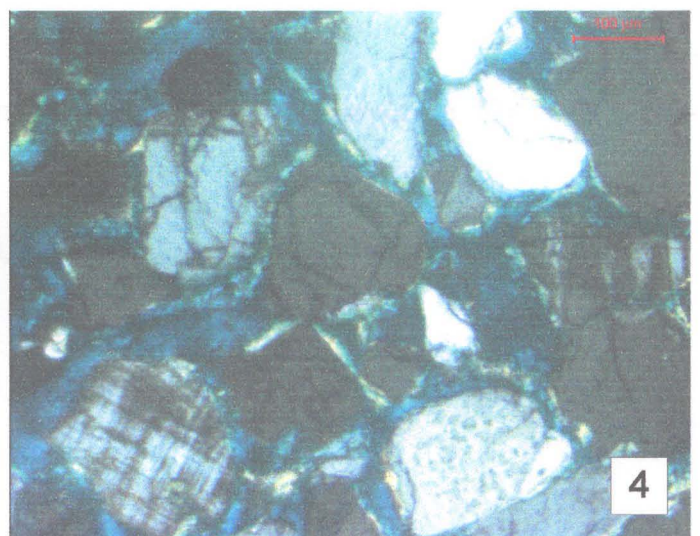
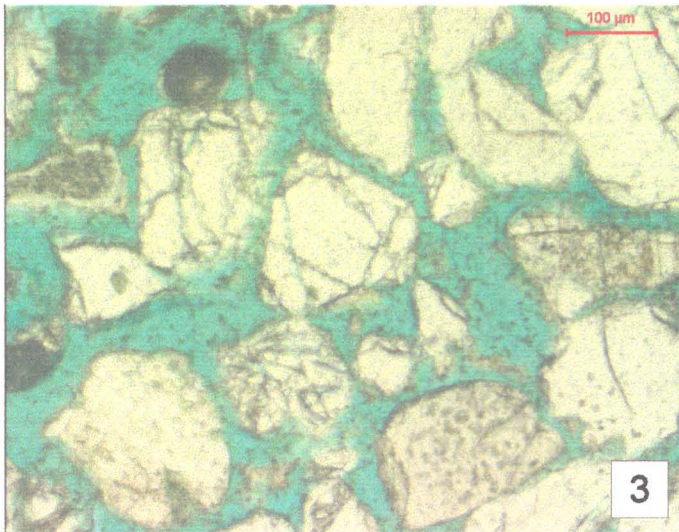
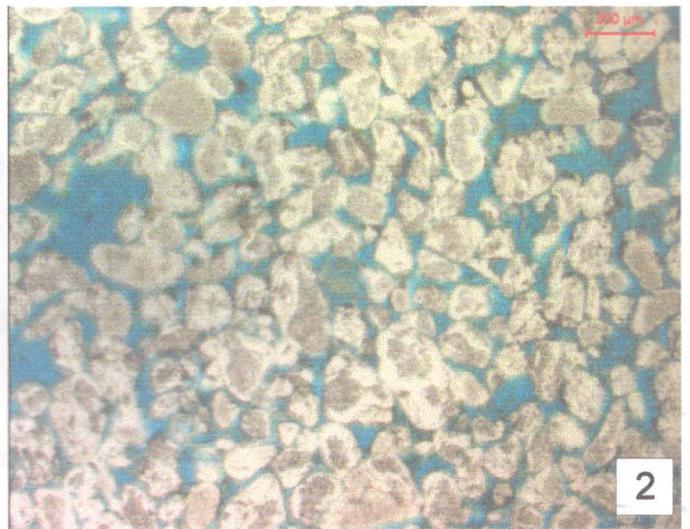
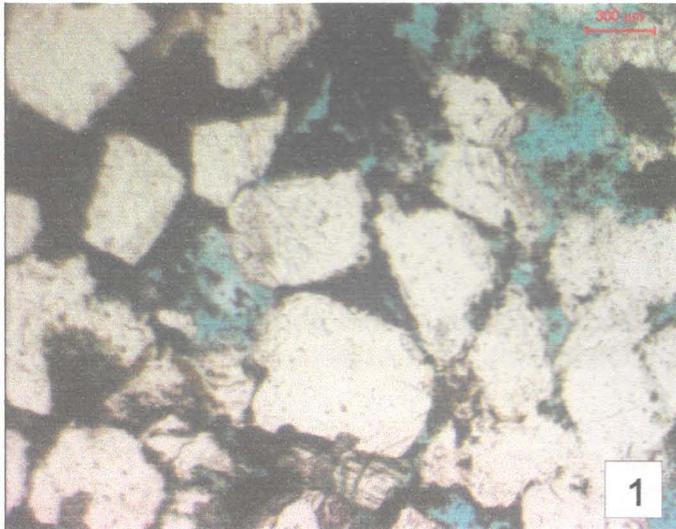
PRANCHA 1-Fotos da Torre de Pedra



PRANCHA 1 - LEGENDA

- 1 - Afloramento 3: Arenitos da Formação Pirambóia intrudidos por sill de rocha básica
- 2 - Detalhe do afloramento 3
- 3 - Visão geral da Torre de Pedra
- 4 - Afloramento 4, alto da Torre de Pedra

PRANCHA 2- Imagens



PRANCHA 2 - LEGENDA

1 - Imagem da lâmina petrográfica da amostra 3C, vista em aumento de 10x, luz transmitida, polarizadores descruzados

2 - Imagem da lâmina petrográfica da amostra 4D, vista em aumento de 2,5x, luz transmitida, polarizadores descruzados

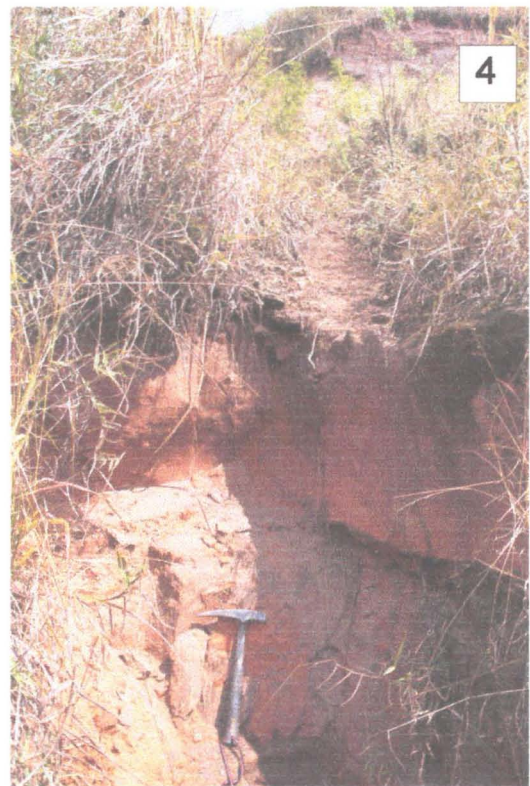
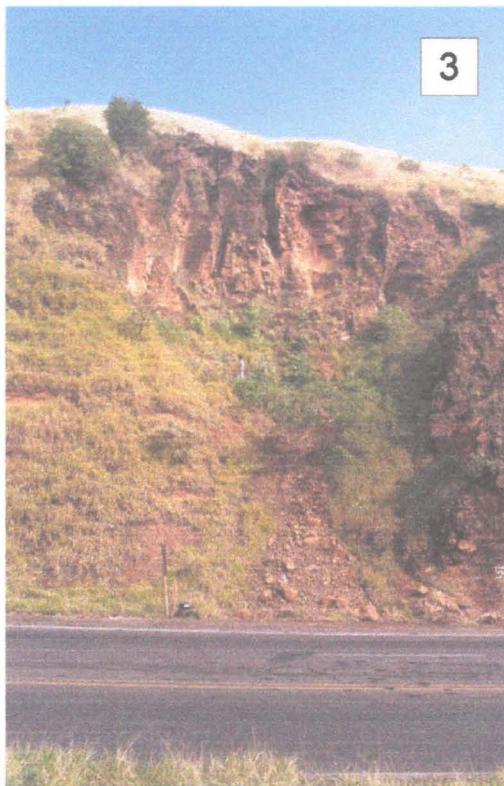
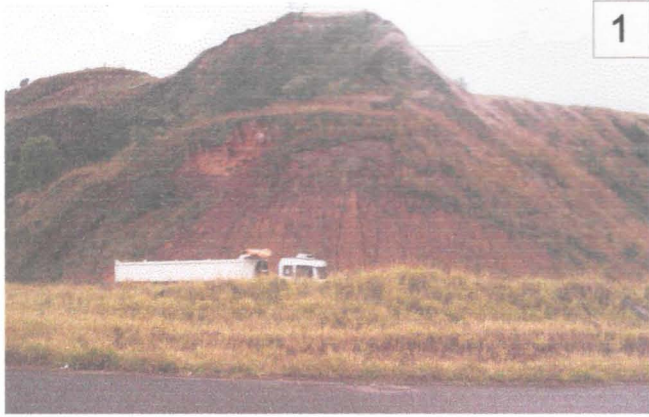
3 - Imagem da lâmina petrográfica da amostra 4D, vista em aumento de 10x, luz transmitida, polarizadores descruzados

4 - Imagem da lâmina petrográfica da amostra 4D, vista em aumento de 10x, luz transmitida, polarizadores cruzados

5 - Imagem de MEV da amostra 4D, vista em aumento de 150x, elétrons secundários

6 - Imagem de MEV da amostra 4D, vista em aumento de 150x, elétrons retroespalhados

PRANCHA 3 - Fotos da Serra de Botucatu



PRANCHA 3 - LEGENDA

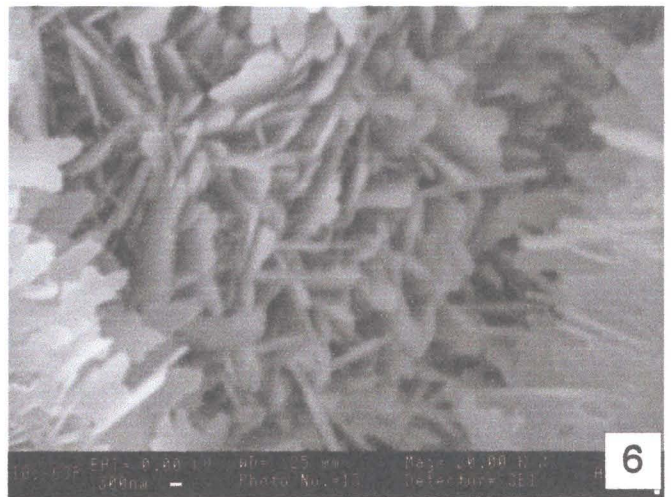
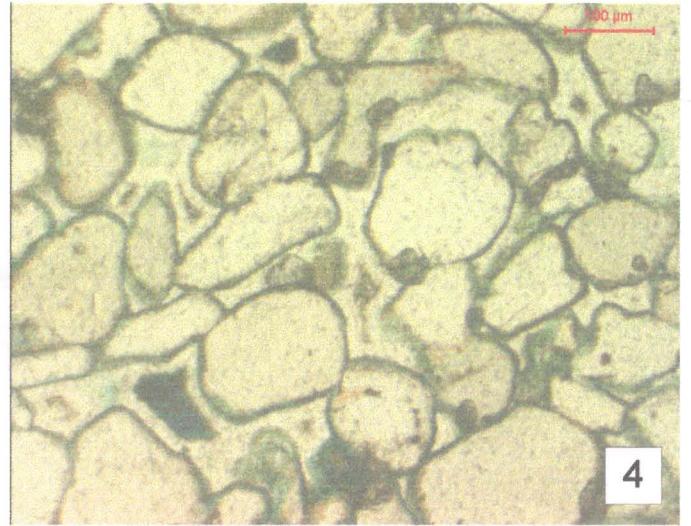
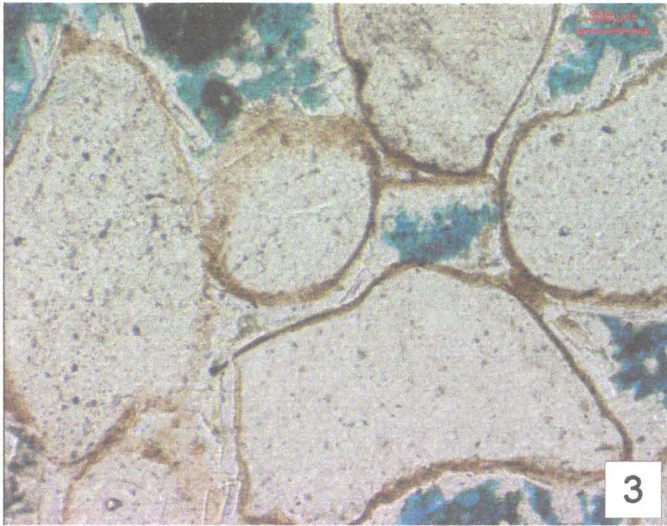
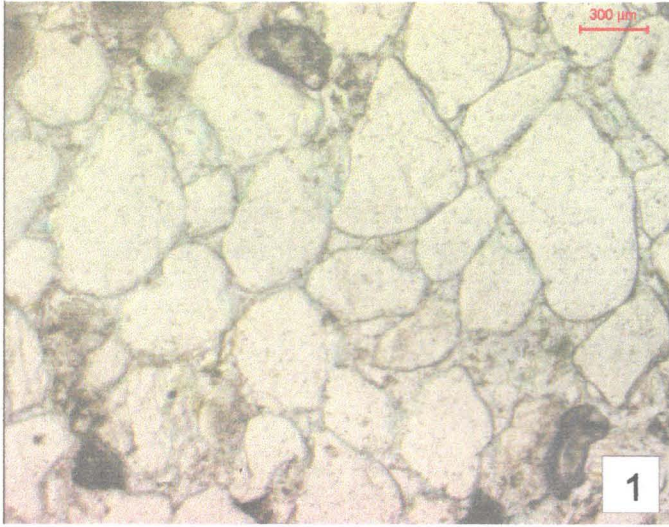
1 - Visão geral do afloramento 2 na rodovia Marechal Rondon

2 - Detalhe do afloramento 2

3 - Visão geral do afloramento 1 na rodovia Marechal Rondon

2 - Detalhe do afloramento 1

PRANCHA 4 - Imagens



PRANCHA 4 - LEGENDA

1 - Imagem da lâmina petrográfica da amostra 1B, vista em aumento de 10x, luz transmitida, polarizadores descruzados

2 - Imagem de MEV da amostra 4D, vista em aumento de 750x, elétrons secundários

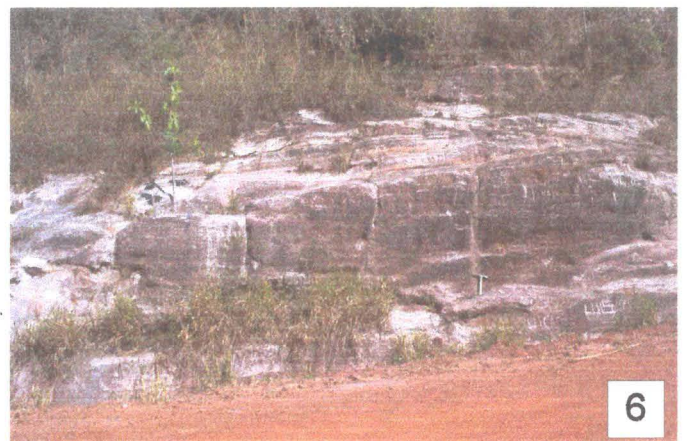
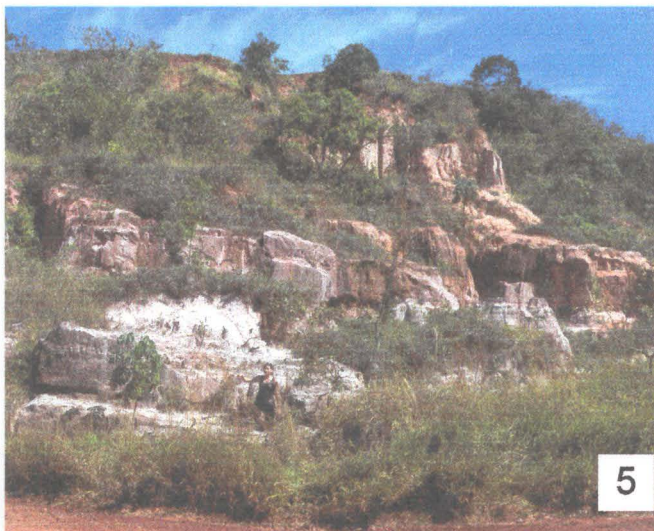
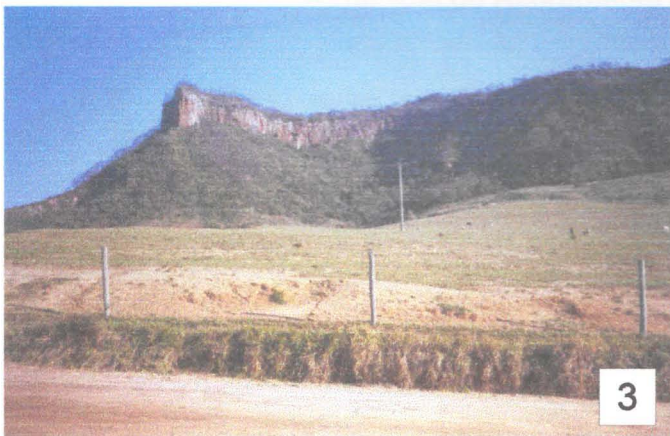
3 - Imagem da lâmina petrográfica da amostra 2C, vista em aumento de 20x, luz transmitida, polarizadores descruzados

4 - Imagem da lâmina petrográfica da amostra 1C, vista em aumento de 10x, luz transmitida, polarizadores descruzados

5 - Imagem de MEV da amostra 1C, vista em aumento de 2.500x, elétrons secundários

6 - Imagem de MEV da amostra 1C, detalhe em aumento de 20.000x, elétrons secundários

PRANCHA 5 - Fotos da Serra do Itaqueri



PRANCHA 5 - LEGENDA

1 - Visão geral da Serra de Itaqueri

2 - Aproximação da Serra de Itaqueri, com ênfase na escarpa sustentada pelos arenitos silicificados

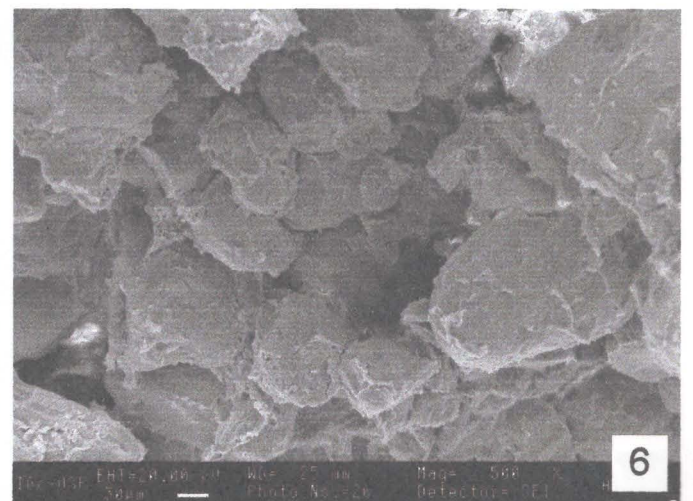
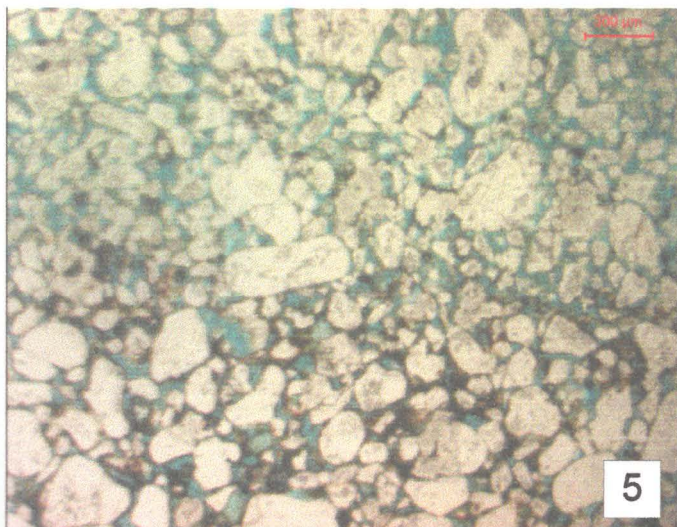
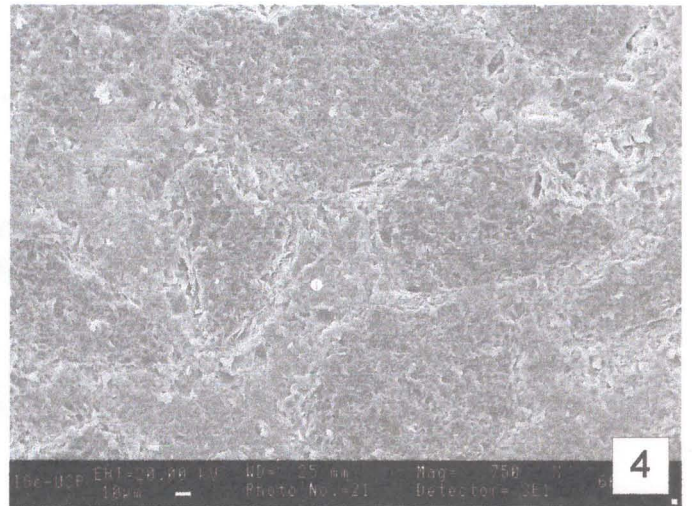
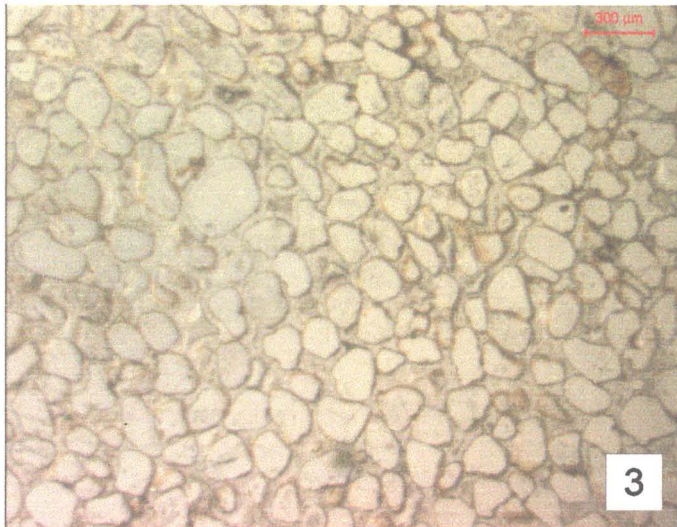
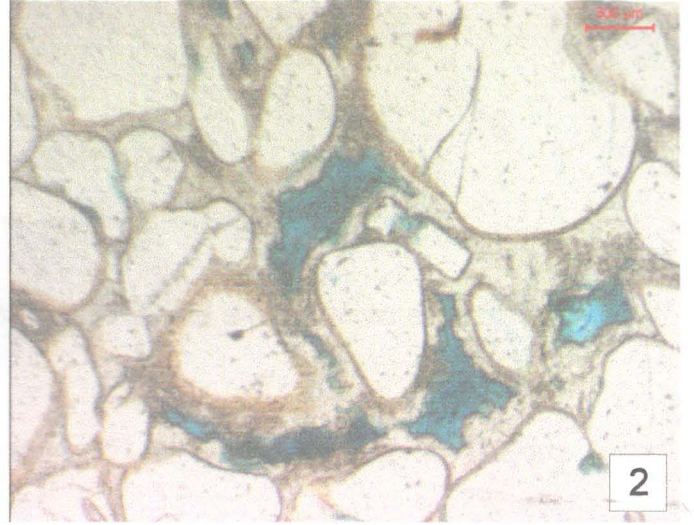
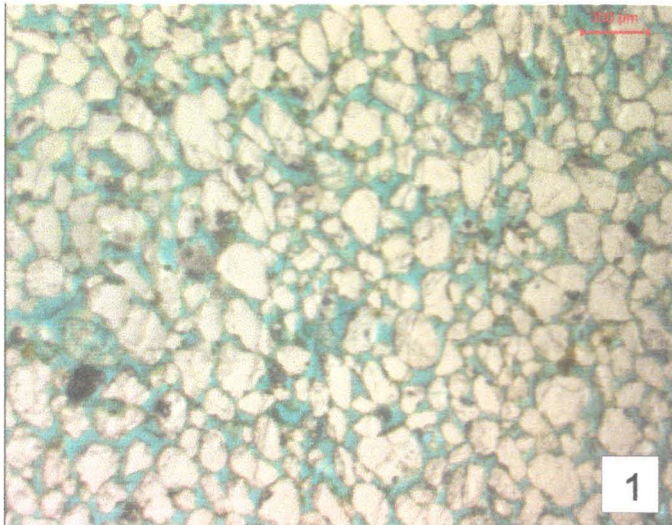
3 - Visão da escarpa da Serra de Itaqueri

4 - Basalto amigdaloidal do Afloramento 6

5 - Contado entre as Formações Pirambóia (abaixo, mais claro), e Botucatu (acima, avermelhado), do afloramento 9

6 - Afloramento 9, arenitos da Formação Pirambóia.

PRANCHA 6 - Imagens



PRANCHA 6 - LEGENDA

1 - Imagem da lâmina petrográfica da amostra 5B, vista em aumento de 2,5x, luz transmitida, polarizadores descruzados

2 - Imagem da lâmina petrográfica da amostra 6B, vista em aumento de 10x, luz transmitida, polarizadores descruzados

3 - Imagem da lâmina petrográfica da amostra 6A, vista em aumento de 2,5x, luz transmitida, polarizadores descruzados

4 - Imagem de MEV da amostra 6A, vista em aumento de 750x, elétrons secundários

5 - Imagem da lâmina petrográfica da amostra 9A, vista em aumento de 10x, luz transmitida, polarizadores descruzados; arenito Botucatu no contato com Pirambóia

6 - Imagem de MEV da amostra 9A, vista em aumento de 500x, elétrons secundários