UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**GEOLOGIA E CARACTERÍSTICAS TECNOLÓGICAS
DAS ARGILAS ESMECTÍTIAS DA
REGIÃO DE FRANCA-SP**

Luiz Carlos Tanno

Orientador: Prof. Dr. Adilson Carvalho

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Programa de Pós-Graduação em Geoquímica e Geotectônica

São Paulo
1995

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**GEOLOGIA E CARACTERÍSTICAS TECNOLÓGICAS
DAS ARGILAS ESMECTÍTIAS DA
REGIÃO DE FRANCA-SP**

Luiz Carlos Tanno

Orientador: Prof. Dr. Adilson Carvalho

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

COMISSÃO JULGADORA

	nome	ass.
Presidente:	<u>Adilson Carvalho</u>
Examinadores:	<u>Cláudio Riccomini</u>
	<u>Alexandre Romildo Zandonadi</u>

São Paulo
1995

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

DEDALUS - Acervo - IGC

30900005764

**GEOLOGIA E CARACTERÍSTICAS TECNOLÓGICAS
DAS ARGILAS ESMECTÍTICAS DA
REGIÃO DE FRANCA-SP**

Luiz Carlos Tanno

Orientador: Prof. Dr. Adilson Carvalho

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Programa de Pós-Graduação em Geoquímica e Geotectônica

São Paulo
1995

RESUMO

A região de Franca está localizada na borda nordeste da Bacia do Paraná no Estado de São Paulo. As suas unidades geológicas, representadas por rochas vulcânicas e sedimentares, comportam diversas ocorrências de argilas esmectíticas, concentradas principalmente nas áreas de Restinga, Pedregulho e Serra da Faquinha.

Os trabalhos realizados tiveram por finalidade a caracterização dessas argilas, quanto aos aspectos relacionados com a geologia, geomorfologia, tipos de depósitos e características tecnológicas, bem como a avaliação de suas reservas. Para tanto, foram efetuadas várias atividades técnicas em campo e em laboratórios do IPT, tais como levantamento geológico, sondagem e amostragem, análises e ensaios tecnológicos preliminares.

Os estudos permitiram identificar dois tipos distintos de depósitos de argilas: residual e sedimentar. O jazimento residual está associado à alteração de derrames de basaltos da Formação Serra Geral, localizados na Serra da Faquinha (NE de Franca). O jazimento sedimentar está relacionado com a sequência suprabasáltica (Unidade Franca) correspondendo aos depósitos de lamitos e lamitos arenosos que ocorrem em Restinga (SW de Franca) e Pedregulho (N de Franca), respectivamente.

Os ensaios de caracterização tecnológica revelaram que as argilas poderão ter diversas aplicações industriais, preferencialmente como argila ativada para descoramento de óleos vegetais.

Quanto às reservas, os depósitos mais importantes foram avaliados em torno de 440.000 t de material argiloso composto essencialmente por argilas do grupo das esmectitas.

ABSTRACT

The region of Franca is located on the northeastern border of Paraná basin in the State of São Paulo. The geological units of Paraná basin are formed by volcanic and sedimentary rocks where several smectite clay occurrences, mainly in Restinga are placed, Pedregulho and Serra da Faquinha.

The subjects of this work were the characterization of the clay occurrences, and their relationship with geological and geomorphological evolution, deposit types, and technological characteristics, as well as the reserves evaluation. A great deal of technical activities were done, such as geological mapping, shallow wells and sampling, and laboratorial analysis and experiments.

Through geological studies two different types of clay deposits: residual and sedimentary could be identified. The residual ore deposit is related to weathered basaltic rocks of Serra Geral formation, sited at Serra da Faquinha (NE of Franca). The sedimentary ore deposits are related to post-basaltic sedimentary sequence (Unidade Franca) and occur as mudstones and sandy mudstones in Restinga (SW of Franca) and Pedregulho (North of Franca), respectively.

The technological characterization has shown that the clays can be used in several fields, mainly as activated clay for decoloring vegetable oils.

As far as the reserves are concerned the best quality deposit was evaluated around 440,000 tons of clayey material compound essentially by smectites.

AGRADECIMENTOS

O meu agradecimento ao Professor Doutor Adilson Carvalho pela orientação e apoio no desenvolvimento deste trabalho.

Ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, que patrocinaram a realização do projeto de estudo que resultou neste trabalho.

Aos colegas Marsis Cabral Junior, José F. M. Motta e Zeno Hellmeister Junior do Agrupamento de Planejamento Mineral (Digeo/IPT), que participaram do desenvolvimento de diversas etapas dos estudos.

Ao colega Ayrton Sintoni da Divisão de Geologia (IPT) pelas discussões e sugestões.

Ao colega Doutor Alexandre R. Zandonadi do Agrupamento de Produtos Inorgânicos (DQ/IPT) pelas análises dos ensaios tecnológicos e discussões a respeito.

Ao Professor Doutor Armando Marcio Coimbra (IG/USP) pela colaboração prestada em trabalhos de campo e discussões sobre a estratigrafia da área.

Ao Professor Doutor Max Brandt Neto (Unesp/S.J.do Rio Preto) pela elaboração das micrografias eletrônicas de varredura (MEV) e análises dos resultados.

Aos estagiários Fabiana Alves Cagnon e Cícero Ramalho Foz Neto e aos técnicos Eliel Souza Miranda e Luís C.C. da Silva do Agrupamento de Planejamento Mineral (Digeo/IPT), que auxiliaram na preparação de gráficos e tabelas.

Aos colegas do Agrupamento de Tecnologia de Rocha (Maria Cristina de Moraes, Jairo de Sant'Anna Tadeo e Nilson de Paula), do Laboratório de Geoquímica (Duilio Rondineli e Eliana Antunes Rezende) e da Seção de Apoio Técnico (Arturo Enrique Prieto Ibars, Marlene Santana e Maria Inês do Prado Consoni) da Divisão de Geologia do IPT, pela sua colaboração na realização deste trabalho.

À técnica administrativa Luciana A. Alves do Aplam (Digeo/IPT) pela editoração final do texto.

À Fundação Salim Farah Maluf que liberou relatório interno de pesquisa de argila no Vale do Paraíba, em particular ao geólogo José Luiz Fernandes pela atenção dispensada.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I.....	1
INTRODUÇÃO.....	1
1 GENERALIDADES	1
2 OBJETIVOS.....	2
CAPÍTULO II.....	3
CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE AS ESMECTITAS.....	3
1 DEFINIÇÃO E CLASSIFICAÇÃO.....	3
2 MODOS DE OCORRÊNCIA.....	5
3 PROPRIEDADES E USOS.....	9
4 PRINCIPAIS DEPÓSITOS	12
4.1 Depósitos Americanos	13
4.2 Depósitos Nacionais	15
CAPÍTULO III.....	21
METODOLOGIA E TÉCNICAS DE ANÁLISE.....	21
1 LEVANTAMENTO E ANÁLISE DE INFORMAÇÕES.....	21
2 TRABALHOS DE CAMPO	21
2.2 Sondagem e Amostragem	22
3 TÉCNICAS DE ANÁLISE.....	23
3.1 Análises Granulométricas.....	23
3.2 Análises Mineralógicas	23
3.2.1 Difração de raios X	25
3.2.2 Análise térmica diferencial (ATD).....	25
3.2.3 Microscopia ótica	25
3.2.4 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	26
3.3 Análises Químicas.....	26
3.4 Ensaios Tecnológicos	26
3.4.1 Preparação de amostra.....	27
3.4.2 Ensaio preliminar de bentonita	27

CAPÍTULO IV	29
CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	29
1 GEOLOGIA REGIONAL	29
1.1 Introdução	29
1.2 Embasamento Cristalino (Pré-C)	34
1.3 Bacia do Paraná	34
1.3.1 Formação Pirambóia	34
1.3.2 Formação Botucatu	39
1.3.3 Formação Serra Geral e Intrusivas Básicas	39
1.3.4 Unidade Franca	41
1.4 Sedimentos Cenozóicos	44
2 GEOMORFOLOGIA REGIONAL	44
CAPÍTULO V	47
RESULTADOS E DISCUSSÕES	47
1 INTRODUÇÃO	47
1 TIPOS DE DEPÓSITOS	51
1.1 Depósitos Residuais	51
1.1.1 Geologia Local	51
1.1.2 Tipologia	51
1.1.3 Estimativa de Reserva	57
1.2 Depósitos Sedimentares	58
1.2.1 Geologia Local	58
1.2.2 Tipologia	61
1.2.3 Estimativa de reserva	62
2 CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA	63
2.1 Generalidades	63
2.2.1 Argila esmectítica de Restinga	65
2.2.2 Argila esmectítica de Pedregulho e Serra da Faquinha	69
CAPÍTULO VI	72
CONSIDERAÇÕES FINAIS	72
1 EVOLUÇÃO GEOLÓGICO-GEOMORFOLÓGICA DA ÁREA	72
2 TIPOLOGIA DOS DEPÓSITOS	73
2.1 Depósito Residual	73
2.2 Depósitos Sedimentares	75
3 CARACTERÍSTICAS TECNOLÓGICAS	75

4 RESERVAS DOS DEPÓSITOS.....	76
5. CONCLUSÕES	77
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	79

ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 - Ilustrações das possíveis origens das esmectitas em ambientes sedimentares (segundo Chamley, 1989).....	5
FIGURA 2 - Relações dos minerais secundários desenvolvidos sobre rochas basálticas, em várias localidades da Ásia, Havai e Europa (baseado em Chamley, 1989).....	6
FIGURA 3 - Abundância relativa dos principais grupos de argilominerais em lamitos fanerozóicos (segundo Blatt, 1982).....	8
FIGURA 4 - Principais depósitos e minas de argilas esmectíticas brasileiras.....	16
FIGURA 5 - Consumo de bentonita no Brasil (DNPM, 1993)	17
FIGURA 6 - Mapa de localização das áreas pesquisadas	30
FIGURA 7 - Perfil geológico do Grupo São Bento em Pedregulho	32
FIGURA 8 - Perfil geológico Morro do Sapecado	33
FIGURA 9 - Perfil geológico de Restinga	35
FIGURA 10 - Seção geológica esquemática (Rodovia Pedregulho-Igarapava, km 27). ..	36
FIGURA 11 - Coluna estratigráfica adotada para a área.....	37
FIGURA 12 - Mapa geológico da área.....	38
FIGURA 13 - Modelo deposicional esquemático da Unidade Franca e suas relações estratigráficas	43
FIGURA 14 - Mapa de localização da área - Serra da Faquinha	52
FIGURA 15 - Perfil de alteração da Fazenda Pontal (SW Serra da Faquinha).....	54
FIGURA 16 - Perfil de alteração do Morro do Sapecado (NE Serra da Faquinha).....	55
FIGURA 17 - Mapa de localização da área - Restinga	59
FIGURA 18 - Mapa de localização da área - Pedregulho.....	60
QUADRO 1 - Principais usos e aplicações das argilas esmectíticas (baseado em O'Driscoll, 1989).	11
QUADRO 2 - Produção mundial de bentonita (DNPM, 1993).....	13
QUADRO 3 - Fluxograma de análises e ensaios tecnológicos de argilas esmectíticas para usos industriais (baseado em Zandonadi, 1972 e Souza Santos, 1976).....	24
QUADRO 4 - Relação de amostras e resultados analíticos da região da S.da Faquinha.	48
QUADRO 5 - Relação de amostras e resultados analíticos da área de Restinga.....	49
QUADRO 6 - Relação de amostras e resultados analíticos da região de Pedregulho	49
QUADRO 7 - Resultado das análises químicas	50

QUADRO 8 - Principais estágios de geração de argilominerais e paragênese associada na região de Franca.	56
QUADRO 9 - Variações das viscosidades de suspensões aquosas de argilas esmectíticas tratadas com quantidades crescentes de carbonato de sódio (Na_2CO_3)	64
QUADRO 10 - Resultados analíticos comparativos de argilas esmectíticas como agente isotrópico de fluido de perfuração	66
QUADRO 11 - Resultados analíticos comparativos de argilas esmectíticas (na forma sódica) como aglomerantes de areias de moldagem em fundição	66
QUADRO 12 - Resultados analíticos comparativos de argilas esmectíticas (na forma sódica) como aglomerante de finos de minério de ferro	68
QUADRO 13 - Resultados analíticos comparativos de argilas esmectíticas ativadas para descoramento de óleo de soja na proporção argila:óleo - 16%.	68
QUADRO 14 - Resultados analíticos comparativos de argilas esmectíticas da região de Franca.....	70

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1 GENERALIDADES

É importante destacar neste estudo o papel desempenhado pelas argilas através do tempo, desde a sua descoberta. O uso da argila como matéria-prima remete ao passado longínquo, antes mesmo da era cristã, quando esta era empregada na fabricação rudimentar de peças cerâmicas. Os povos antigos aprenderam também que as argilas não serviam somente para tais fins. Existem registros de diversos povos, principalmente egípcios, gregos e romanos, que já mineravam argilas do tipo esmectítico, muito usadas na preparação de tintas, cosméticos e em desengordurantes de utensílios domésticos, lãs e roupas. Em 1888, na região de Rock Creed, no Estado do Wyoming (EUA), descobriu-se outra variedade de argila que possuía a capacidade de absorver grande quantidade de água, formando massa volumosa com aspecto gelatinoso. Este material foi motivo de estudo detalhado por Knight em 1898, que o denominou "bentonita", visto que a ocorrência estava localizada nas imediações do Fort Benton, na referida região.

A descoberta de argila esmectítica em território americano fomentou o seu rápido aproveitamento industrial. Os americanos desenvolveram suas aplicações, tornando-se os maiores produtores mundiais deste bem mineral, utilizado amplamente em diversos segmentos industriais.

As esmectitas compõem um grupo de argilominerais, também denominado montmorilonitas que, muito embora de composição química diferente, possuem o mesmo tipo de estrutura cristalina. Uma das características mais importantes destes argilominerais é a capacidade de adsorver moléculas de água entre as folhas, produzindo expansão acentuada da estrutura.

Em consequência de suas características físico-químicas, as argilas esmectíticas adquiriram grande relevância econômica. Tais características conferem às esmectitas uma série de propriedades como a tixotropia, a troca catiônica e a plasticidade, as quais lhes propiciam grande variedade de aplicações industriais, principalmente nas indústrias metalúrgica, química, de produtos alimentares, entre outras.

Essas argilas formam-se na natureza em condições diversas, geralmente em meio úmido com alta concentração de cátions, pela ação do intemperismo sobre rochas, geralmente ferromagnesianas, em ambiente rico em água ou em condições hidrotermais, em temperatura próxima à ambiente. Os grandes jazimentos estão mais frequentemente associados com ambientes marinhos e lagunares.

No Estado de São Paulo, os paleoambientes e litotipos mais propícios para a formação de tais argilas estão relacionados com as unidades geológicas de idade jurocretácea, da borda NE da Bacia do Paraná e às unidades terciárias da Bacia de Taubaté.

A região de Franca encerra diversas ocorrências de argilas esmectíticas associadas à sequência suprabasáltica da Bacia do Paraná, que serão motivo de estudo no presente trabalho.

2 OBJETIVOS

Este trabalho tem por objetivo o estudo das argilas esmectíticas que ocorrem na região de Franca, no nordeste do Estado de São Paulo, enfocando os aspectos relacionados com a geologia, geomorfologia, tipologia dos depósitos e as características tecnológicas, com vistas no seu aproveitamento industrial.

Esta região foi selecionada como alvo para estudo devido ao seu contexto geológico-geomorfológico favorável à geração e acumulação de tais argilas, evidenciado pelas diversas ocorrências situadas nas áreas de Restinga, Pedreguho e Serra da Faquinha.

CAPÍTULO II

CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE AS ESMECTITAS

1 DEFINIÇÃO E CLASSIFICAÇÃO

A primeira referência encontrada na literatura sobre a argila esmectítica data de 1788, com a denominação de *smectis*. Posteriormente, em 1847, essa variedade de argila foi descoberta em Montmorillon, região de Vienne, na França, e designada de montmorilonita (Andrews 1992). Em 1888, na região de Rock River no Estado de Wyoming (EUA), foi descoberta uma nova variedade de esmectita que possuía a capacidade de absorver grande quantidade de água. Esta argila foi estudada em detalhe por W.C.Knight, em 1898, e denominada bentonita (Lira Filho 1973).

No início do século 20, pesquisadores americanos detectaram, em várias regiões dos EUA, a ocorrência de bentonita em camadas do Cretáceo e Terciário, associadas a alteração de material vulcânico. Tal constatação levou Ross & Shannon (1926) à seguinte definição: "Bentonita é uma rocha composta essencialmente por um argilomineral montmorilonítico formado pela devitrificação e subsequente alteração química de um material vítreo, de origem ígnea, usualmente um tufo ou cinza vulcânica".

A melhor definição de bentonita como mineral industrial foi dada por Grim em 1962, que a definiu como uma argila constituída essencialmente de argilominerais do grupo das esmectitas, independentemente da origem ou do tipo de ocorrência.

No Brasil, o termo bentonita tem sido empregado para designar qualquer material argiloso com predominância de esmectita, independentemente da origem geológica.

Nos EUA, utiliza-se o termo "terra *fuller*" para a bentonita cálcica composta de diversos argilominerais, com predominância da montmorilonita, nontronita, caulinita, atapulgita e illita, tendo como cátions trocáveis o cálcio e o magnésio.

Na Inglaterra, a denominação terra *fuller* é empregada para indicar as argilas decorantes e adsorventes que, no estado natural ou após tratamento químico ou físico, têm a capacidade de adsorver impurezas e corantes de óleos vegetais, minerais, gorduras e ceras.

Os argilominerais esmectíticos pertencem ao grupo de silicatos lamelares ou filossilicatos. São compostos de duas folhas de tetraedros separadas por uma de octaedros do tipo 2.1. As folhas tetraédricas são compostas por tetraedros contendo um átomo de

silício circundado por 4 átomos de oxigênio, enquanto que as folhas octaédricas são compostas de octaedros contendo um átomo de alumínio, e/ou magnésio e/ou ferro, circundado por 6 grupos de hidroxilas.

Os argilominerais do grupo das esmectitas diferem entre si devido a substituições isomórficas e aos cátions trocáveis. As substituições isomórficas têm lugar nas folhas tetraédricas e nas folhas octaédricas (o Si^{4+} tetraédrico por Al^{3+} e o Al^{3+} octaédrico por Mg^{2+} , Fe^{2+} ou Li^+). Quando as posições octaédricas estão todas preenchidas, o argilomineral tem estrutura cristalina na forma trioctaédrica como a saponita, sauconita e hectorita. Quando as posições octaédricas são preenchidas em apenas dois terços delas, a estrutura toma a forma dioctaédrica, como a montmorilonita, beidelita e nontronita.

Desse modo, a população das posições catiônica é tal que as camadas ficam eletricamente desequilibradas, com eficiência de cargas positivas. Este desequilíbrio é compensado pela introdução de cátions hidratados entre as camadas estruturais, com arranjos orientados e regulares coordenando cátions trocáveis e que podem dar lugar a certas moléculas orgânicas. A ligação entre camadas se deve às forças de Van der Waals. O espaçamento entre camadas estruturais pode variar de acordo com a natureza do cátion interlamelar de 10 a 17,5 Å, sendo de aproximadamente 12,5 Å quando o cátion é o Na^+ ; e de 15,5 Å quando o cátion é o Ca^{2+} (Gomes 1988). A espessura entre camadas varia também com a quantidade de água disponível ou de outras moléculas polares sem alterar os valores das reflexões cristalinas $hk0$ (Souza Santos 1975).

Além das substituições isomórficas, outro fator que pode influenciar na adsorção dos cátions trocáveis nas esmectitas refere-se às valências insatisfeitas, produzidas por ligações quebradas nas faces e arestas das partículas.

Güven (1988) analisa alguns critérios para diferenciar as espécies de esmectita, baseando-se principalmente nas suas características estruturais e cristaloquímicas, tais como: (1) natureza di ou trioctaédrica das folhas octaédricas; (2) as quantidades relativas de cargas em excesso em camadas tetraédricas e octaédricas; (3) cátion octaédrico predominante. Para este autor, as feições químicas e estruturais das folhas octaédricas determinam a identidade das espécies de esmectita.

As principais formas de identificação das esmectitas são análises de difração de raios X, análise térmica diferencial, análises químicas, microscopia eletrônica e capacidade de troca de cátions (CTC).

Dentre os diversos estudos que forneceram grande quantidade de informações sobre as argilas esmectíticas (mineralogia, estrutura, química, morfologia, comportamento tecnológico, etc.), merecem destaque os autores: Ross & Hendricks (1945), Grim (1962, 1968), Caillière & Hénin (1963), Millot (1964), Weaver & Pollard (1973); Souza Santos

(1975, 1989), Grim & Güven (1978), Nemecz (1981), Velde (1985), Gomes (1988), Chamley (1989) e Weaver (1989).

2 MODOS DE OCORRÊNCIA

As argilas esmectíticas podem ter diversas origens, associadas aos processos de intemperismo e alteração hidrotermal ou a processos sedimentares e diagenéticos. Necessitam, como elementos essenciais à sua formação, de silício, alumínio ou ferro, magnésio, cálcio e água. A Figura 1 ilustra as possíveis origens das esmectitas nos diversos ambientes sedimentares.

FIGURA 1 - Ilustrações das possíveis origens das esmectitas em ambientes sedimentares (baseado em Chamley 1989).

A ação do intemperismo sobre rochas de tipos variados, sob condições de intensidade média em climas temperados e drenagem moderada pode levar à formação de argilas do grupo das esmectitas (Jackson 1959). O caráter di ou trioctaédrico do argilomineral produzido deve-se, em grande parte, à composição da rocha matriz. As rochas ultrabásicas e básicas contêm minerais magnesianos, que tendem a gerar argilas trioctaédricas, e minerais ferro-magnesianos, a formar argilas dioctaédricas. As rochas ácidas, por sua vez, produzem normalmente minerais contendo íons trivalentes, resultando na formação de minerais dioctaédricos.

Segundo Bates (1962) a decomposição de basaltos andesíticos do Havai pode se processar de duas maneiras: em locais onde a lixiviação é mais intensa, formam-se caulinita ou haloisita, gibsit, limonita e, às vezes, alofana; em locais onde a drenagem é confinante e a lixiviação é dificultada, formam-se esmectitas. Situação semelhante ocorre nos basaltos da Bacia do Paraná, na região de Sacramento (MG) onde a nontronita é o argilomineral predominante (DNPM 1964). A Figura 2 mostra uma sucessão de minerais secundários formados a partir da alteração de basaltos, em várias regiões da Ásia, Havai e Europa.

FIGURA 2 - Relações dos minerais secundários desenvolvidos sobre rochas basálticas, em várias localidades da Ásia, Havai e Europa (baseado em Chamley 1989).

Alguns estudos (Melfi 1967, Tardy 1969 e outros) sobre intemperismo de granitos e rochas básicas mostram que os feldspatos e outros minerais, tais como anfibólios, são transformados em vários filossilicatos, freqüentemente esmectitas, durante os processos intempéricos.

Grim (1968) apresentou algumas generalizações possíveis sobre a formação de argilominerais a partir de rochas básicas e ácidas. No primeiro caso, sob condições de drenagem pobre ou de pequena quantidade de chuva, forma-se esmectita. Em condições de drenagem boa ou chuvas intensas, quando o magnésio é lixiviado, forma-se caulinita. Ilita e esmectita são geradas a partir de rochas ácidas que contêm potássio e magnésio. Se o conteúdo de magnésio é baixo, forma-se ilita; no caso de ser baixo o conteúdo de potássio, forma-se esmectita. Remoção rápida de potássio e magnésio conduz à formação de caulinita.

As esmectitas ocorrem ainda, às vezes, de maneira abundante, nos solos onde atuam as hidrólises, mas a drenagem é bastante fraca suficiente para que as soluções permaneçam enquanto a evaporação as concentra. Isto é característico dos solos calcimórficos hidromórficos de países quentes. Nos solos calcimórficos, a má drenagem e a evaporação acumulam a sílica, o alumínio, o magnésio e muitas vezes o ferro num meio alcalino rico em íons Mg^{++} e Ca^{++} (Milot 1964).

As seqüências de rochas sedimentares, principalmente as de idade pós-cretácea, contêm geralmente grande quantidade de argilas esmectíticas. Os ambientes marinhos e lacustres são os mais favoráveis para a formação destes argilominerais. Nos ambientes lacustres, as condições de pH são geralmente alcalinas, com águas calmas e afluxo de íons predominantemente de Mg^{++} , Ca^{++} e Na^{+} . Estas condições ocorrem comumente em regiões de climas áridos e semi-áridos, associados geralmente com evaporitos, carbonatos e *chert*.

A freqüência de esmectitas, entretanto, decresce em rochas mais antigas, especialmente no Paleozóico (Weaver 1959, Millot 1964, Ramos & Formoso 1975, Blatt 1982), como ilustra a Figura 3.

Alguns estudos (Weaver 1959, Dunoyer De Segonzac 1969, entre outros) demonstram que a transformação de uma esmectita dioctaédrica para outros argilominerais, numa seqüência de rochas sedimentares em profundidade, independe do tempo ou da idade geológica e parece ser função do gradiente geotermal, ao qual as rochas foram submetidas. Tais estudos indicam que o tipo dioctaédrico não é estável acima de 100°C à profundidade de 2.000 m ou mais em sedimentos argilosos.

Em zonas de alteração hidrotermal, a formação de esmectitas é diretamente condicionada pela composição e temperatura das soluções percolantes, e ao tipo de rocha sobre o qual os fluidos hidrotermais agem (Velde 1985). É provável que concentrações de alto magnésio poderiam gerar clorita, em vez de minerais esmectíticos. Alguns autores

(Lovering, Kerr, Anderson *apud* Grim 1968) defendem que a ação hidrotermal se desenvolve em estágios por soluções diferentes, aparecendo em diversos períodos de tempo separadas por fases de relativa inatividade. Em certos casos, os produtos desenvolvidos num dado estágio apresentaram zoneamento, sendo o mais freqüente o que produzia sericita junto ao veio, seguida pela haloisita, caulinita e esmectita, e, por último, acha-se a clorita.

FIGURA 3 - Abundância relativa dos principais grupos de argilominerais em lamitos fanerozóicos (segundo Blatt 1982).

As argilas esmectíticas podem também ocorrer associadas a processos de origem deutérica. A ocorrência de tais argilas, a partir de minerais ferromagnesianos em rochas eruptivas, parece estar relacionada com a fase tardia de resfriamento e tem sido considerada como produto de equilíbrio na cristalização a condições termais acima daquelas de superfície (Velde 1985). Isto parece evidente em algumas rochas extrusivas básicas, nas quais as esmectitas substituem olivina, numa matriz vítrea inalterada. Nos basaltos da Bacia do Paraná, tem sido registrada a ocorrência de esmectitas resultantes de fenômenos de origem deutérica (Rüegg 1975, Roisenberg *et al.* 1984).

Roisenberg *et al.* (1984), com base em estudos em rochas basálticas inalteradas, da Formação Serra Geral, estabelecem as relações entre minerais primários e produtos argilosos: a nontronita se associa essencialmente com piroxênio e olivina; a montmorilonita encontra-se relacionada, em sua maior parte, com piroxênio; a caulinita aparece junto ao plagioclásio e a clorita é relacionada com o piroxênio e o plagioclásio.

Sluder & Bertrand (1981 *apud* Velde 1985) constataram a presença de esmectita associada a auréolas de metamorfismo em diques básicos intrusivos em rochas carbonáticas argilosas. O mais alto grau de metamorfismo alcança a fácies grossulário-vesuvianita. Esmectitas e argilominerais de camadas mistas são encontrados em várias zonas da auréola metamórfica que atinge 80 metros de largura. A formação destes argilominerais pode ser atribuída aos processos de resfriamento e à interação entre as fases aquosas, ricas em gases, com os minerais metamórficos.

3 PROPRIEDADES E USOS

As propriedades das argilas, em geral, estão relacionadas com a pequena dimensão de seus grãos. A maioria das partículas de argila tem dimensão, total ou parcialmente, dentro da gama coloidal, o que reflete na sua capacidade de permanecer em suspensão na água por períodos relativamente longos. Além disto, as argilas podem ser floculadas por eletrólitos e também adsorver íons em solução, que podem, por outro lado, ser substituídos por outros íons (Krauskopf 1967).

Quanto às argilas esmectíticas, estas compõem um grupo de argilominerais que apresenta estrutura constituída por duas folhas tetraédricas de silicato com uma folha octaédrica, unidas entre si por oxigênios comuns às folhas. A ligação fraca entre as folhas e a natureza e o grau de substituição isomórfica permitem não apenas a excelente clivagem, mas também a adsorção de cátions metálicos e substâncias orgânicas nas superfícies dos argilominerais.

Os cátions neutralizantes, normalmente hidratados, não estão rigidamente fixos entre as camadas (2:1) e podem ser trocados por outros cátions em solução aquosa, de modo reversível, sem que isto venha a resultar modificações na estrutura cristalina. As moléculas de H_2O situam-se particularmente no espaço entre camadas estruturais e/ou hidratam os cátions ou estão adsorvidas nas superfícies internas e externas dos cristais, podendo ser eliminadas para temperaturas situadas entre 120 e 300°C.

Esta propriedade é denominada capacidade de troca catiônica (CTC), que é medida em miliequivalentes (mEq) do cátion trocável em 100 g de argila seca a 110°C. Os cátions de troca mais comuns são Na^+ , Ca^{++} e Mg^{++} .

A elevada capacidade de troca catiônica evidenciada pelas esmectitas advém do alto grau de substituição isomórfica, resultante da compensação que ocorre na estrutura cristalina em virtude de deficiência de carga. Esta deficiência pode ser causada pela substituição do silício tetravalente por alumínio trivalente ou pela substituição do

alumínio por magnésio divalente ou outros íons de valência igual ou inferior. Na esmectita, a CTC se deve, principalmente, a substituições isomórficas da camada tetraédrica.

As esmectitas do tipo sódica são as que mais se destacam em virtude de sua capacidade de troca catiônica. São caracterizadas por sua propriedade específica de inchar até 20 vezes o volume da argila seca, quando imersas em água. Quando expandida, a argila entra em suspensão formando espontaneamente um sol ou gel tixotrópico, permanecendo em suspensão estável por meses (Souza Santos 1975).

A CTC de uma argila pode ainda ser resultado do desequilíbrio de cargas resultante das substituições isomórficas na estrutura cristalina, das ligações químicas quebradas nas arestas das partículas e da substituição de hidrogênio por hidroxilas (Souza Santos *op. cit.*).

Estas substituições influem também no aumento da massa específica e na redução da área específica e, conseqüentemente, na redução da dispersão das partículas, o que reflete no desempenho tecnológico de tais argilas. Por exemplo, a plasticidade das argilas está relacionada com sua capacidade de reter água entre as camadas cristalinas e a dimensão de seus cristais, geralmente menor que 0,01 mm, e que podem formar colóides por adição de água.

Características físico-químicas, como a tixotropia, a troca catiônica e a plasticidade, determinam diferentes aplicações, sendo empregadas em cerca de trinta segmentos industriais, conforme mostra o Quadro 1.

Dentre os diversos usos industriais, são destacados a seguir aqueles em que as argilas esmectíticas têm papel fundamental:

- a) **em lamas de perfuração:** tem como função, nos trabalhos de sondagem, a sustentação das paredes do furo, resfriamento da broca e meio de transporte para os detritos resultantes da ação da broca, e também para confinar os fluidos subterrâneos às suas formações. Para tanto, a lama deve ser suficientemente viscosa para manter tais materiais pesados em suspensão;
- b) **na indústria metalúrgica:** tem função de aglomerante de areia para preparação de moldes para fundição de grandes peças metálicas; para esta finalidade, a argila deve ter alto poder ligante, de modo que a areia tenha elevada resistência mecânica a verde, depois de seca, e a quente (superior a 800°C); pode ser empregada a esmectita sódica ou cálcica;
- c) **na pelletização de minérios:** é usada como aglomerante de finos de minério de ferro e de manganês, que normalmente são rejeitados na metalurgia devido à sua granulometria; consiste na produção de pelotas de diâmetro de 8 mm a 18 mm resistentes à compressão, para uso em alto-fornos;

QUADRO 1: Principais usos e aplicações das argilas esmectíticas (baseado em O "Driscoll 1989).

- d) na clarificação de óleos:** é utilizada para eliminar o máximo possível de impurezas e corantes contidos em óleos vegetais, animais ou minerais. Para tanto, a argila deve reter um mínimo de óleo, filtrar bem e não agir quimicamente sobre o óleo; para esta finalidade, pode ser usada argila natural ou artificialmente ativada.

As argilas esmectíticas podem ter seus característicos físico-químicos incrementados quando submetidas a tratamento químico. Este processo de tratamento é denominado ativação.

A ativação de uma argila esmectítica pode ser feita de várias maneiras dependendo do seu uso final:

- a) ativação por ácido clorídrico ou sulfúrico** - consiste em aumentar o poder descorante da argila, isto é, incrementar a sua capacidade de adsorção e catálise a determinadas substâncias (Siddiqui 1968);
- b) ativação por barrilha (Na_2CO_3)** - consiste em melhorar as propriedades físico-químicas principalmente a CTC da argila não-sódica.

4 PRINCIPAIS DEPÓSITOS

Os depósitos mundiais mais importantes de argilas esmectíticas estão concentrados nos Estados Unidos (800 milhões t) e na CEI (250 milhões), que detêm mais da metade do total. Em 1990, a produção mundial dessas argilas foi da ordem de 9,8 milhões t, com três países das reservas mundiais, avaliadas em cerca de 1.600 milhões t (Ampians 1985).

Em 1990, a produção mundial deste tipo de argila foi de aproximadamente de 9,8 milhões t, com três países detendo em torno de 74% desse total: os EUA participaram com 32%, a CEI com 30% e a Grécia com 12%. A produção brasileira é bastante inexpressiva, tendo representado apenas 1% do total mundial, como demonstra o Quadro 2 (DNPM 1992).

As maiores minas dos EUA estão localizadas nos Estados do Wyoming e Mississippi, e a extração é feita por várias empresas, algumas das quais ligadas a grupos mineradores internacionais. Geralmente, as usinas de beneficiamento estão situadas próximas da mina e fazem parte do mesmo grupo, constituindo, na maioria das vezes, empresas de grande porte.

No Brasil, as mineradoras normalmente se restringem à secagem e moagem da argila. A ativação desta é feita por poucas empresas que depois comercializam a argila com as indústrias do setor.

PAÍSES	PRODUÇÃO	
	(10 ³ t)	(%)
Estados Unidos	3.432	37,0
C.E.I.	2.400	25,9
Grécia	1.000	10,8
Japão	554	6,0
Itália	230	2,5
Alemanha	230	2,5
Brasil	160	1,7
Espanha	145	1,5
México	134	1,4
Romênia	120	1,3
Argentina	100	1,0
Zimbabwe	100	1,0
Turquia	100	1,0
Outros	559	6,0
TOTAL	9.264	100,0

QUADRO 2 - Produção Mundial de Bentonita em 1992 (DNPM 1993)

Com a intenção de fornecer um panorama de diferentes depósitos de argilas esmectíticas, com relação à idade, aspectos concernentes ao ambiente gerador e características tecnológicas, apresenta-se a seguir uma síntese dos principais depósitos americanos e brasileiros.

4.1 Depósitos Americanos

Nos EUA os depósitos mais importantes estão associados às unidades geológicas do Cretáceo Superior e Terciário (Harben & Bates 1990). A principal área produtora situa-se em Black Hills, na região que compreende os Estados de Dakota do Sul, Wyoming e Montana, local onde a bentonita foi primeiramente descoberta e descrita (Paterson & Murray 1983). As argilas esmectíticas são produzidas também nos Estados da região do Golfo do México, principalmente no Texas e Mississippi e na região das Montanhas Rochosas, no Arizona, Nevada e Califórnia, entre outros.

Descrevem-se, a seguir, os depósitos considerados mais importantes e tradicionais, que suprem parcialmente a demanda interna americana desse tipo de argila e abastecem, em parte, ainda o mercado externo, inclusive o Brasil:

a) Distrito de Black Hills (Wyoming)

Nesta região, ocorrem muitas camadas de argila esmectítica numa seção de aproximadamente 1.200 m de folhelhos marinhos, margas e arenitos argilosos do Cretáceo

Inferior e Superior. Os depósitos são normalmente lenticulares, embora alguns possam atingir vários quilômetros de comprimento.

A parte inferior dos horizontes mineralizados é constituída por folhelho, localmente silicificado, que grada para uma camada do tipo *chert*. A espessura da zona silicificada tende a aumentar com o espessamento da camada de bentonita. O topo dos horizontes mineralizados é menos definido, transicionando gradualmente ou intercalando-se na formação sobreposta.

A argila esmectítica possui geralmente cor amarelo-clara ou verde, em superfície, e azulada em profundidade. A qualidade do material também varia verticalmente, com diminuição das propriedades coloidais em superfície. São freqüentes níveis arenosos intercalados nos corpos argilosos, assim como concreções ferruginosas e manganíferas.

Quanto à gênese, estas argilas estão associadas à alteração *in situ* de cinza vulcânica de composição riolítica, em ambiente marinho. Fragmentos de rocha inalterada (cinerito), grãos de feldspato, quartzo e biotita comumente perfazem menos do que 10% do material argiloso.

O mais importante jazimento do distrito é o de "Clay Spur", situado na parte superior do Formação Mowry, no topo do Cretáceo Inferior. Este depósito tem espessura que varia de 0,76 m a 1,2 m e produz esmectita sódica com propriedades coloidais extremamente altas.

b) Região do Golfo do México

As argilas esmectíticas ocorrem amplamente em formações do Cretáceo Superior e Terciário Médio. A Formação Eutaw (Ks), localizada no NW do Mississippi, contém diversas camadas de esmectitas, algumas alcançando espessura superior a 4 m. Estas camadas são recobertas por arenito friável e sobrepostas a um arenito argiloso, micáceo, que varia para arenito glauconítico. Em geral, ambos os contatos são gradacionais.

No Texas, os jazimentos de argilas esmectíticas são encontrados num amplo cinturão paralelo à costa, associados a sedimentos cretáceos e terciários, constituídos predominantemente por folhelhos, e arenitos subordinados. Estas argilas são do tipo cálcico e, em muitos casos, ocorrem associadas com caulinitas, e têm sido utilizadas como aglomerantes de areia para fundição, como agentes descorantes e para lama de perfuração.

c) Região das Montanhas Rochosas e Califórnia

Os depósitos de argilas esmectíticas são conhecidos em muitos Estados dessa região (Arizona, Colorado, Nevada) e estão relacionadas com formações de idade variando do Triássico ao Pleistoceno.

O depósito mais conhecido localiza-se em Cheto (Arizona), no âmbito da Formação Bidahochi (Pleistoceno), onde uma espessa camada de cinza vulcânica de composição "latítica" foi alterada para esmectita sódica de cor esbranquiçada. Localmente, encontram-se fragmentos da rocha matriz ainda inalterada. Esta argila é usada na produção de argila ativada para descoloramento e catalisadores no refino de petróleo.

Na Califórnia, tais argilas são encontradas nas formações Terciárias. Em Otay, sudeste do Estado, existem diversos jazimentos de esmectitas cálcicas, que são exploradas para uso no refino de petróleo.

4.2 Depósitos Nacionais

O Brasil detém jazidas importantes de argilas esmectíticas localizadas principalmente na região Nordeste e em São Paulo (Figura 4). Além dessas, verifica-se uma série de outras ocorrências, destituídas, no entanto, de interesse econômico, devido ao caráter restrito dos jazimentos ou à baixa qualidade tecnológica de suas argilas. É o caso da região do Triângulo Mineiro, próximo a Sacramento, onde diversas ocorrências de argila foram parcialmente lavradas na década de sessenta.

No Nordeste, os depósitos mais expressivos estão localizados no distrito de Boa Vista, município de Campina Grande (PB) e na região de Vitória da Conquista (BA). No Estado de São Paulo, destacam-se os jazimentos situados na região do Vale do Paraíba, próximo a Taubaté.

As reservas brasileiras estão estimadas em torno de 53 milhões t e correspondem aos depósitos localizados nos Estados da Paraíba, Bahia, Minas Gerais e São Paulo (DNPM 1991). A produção brasileira em 1990 foi de 105.809 t, das quais 86.015 t sofreram algum tipo de tratamento.

O Brasil importa ainda de outros países, como Argentina (53%), México (25%) e EUA (15%). Em 1991, as importações de bentonita foram de pouco mais de 21.000 t (DNPM 1992). Os preços (FOB) desse material em 1991 girou em torno de US\$ 322/t. O produto argentino foi comprado (preço médio anual) a US\$ 145/t, o mexicano a US\$ 350/t e o norte-americano a US\$ 445/t.

FIGURA 4 – Principais depósitos e minas de argilas esmectíticas brasileiras.

Segundo DNPM (1993), está havendo tendência declinante do consumo de bentonita no País nos últimos anos. Estima-se que em 1991 foi em torno de 28% e 35% menor em relação a 1990 e 1989, respectivamente. Esta queda de consumo é decorrência do estágio recessivo da economia brasileira, contribuindo também a substituição destes materiais por outros produtos sintéticos.

O consumo interno de argila esmectítica reflete essencialmente o nível de atividade da indústria de fundição, que absorve em torno de 45% do volume total dessa substância, conforme mostra a Figura 5.

FIGURA 5 - Consumo de Bentonita no Brasil (DNPM 1993)

O segmento de pelotização de minérios de ferro consome mais de 30% do total, e a atividade de perfuração de poços responde por cerca de 15%.

Os depósitos de argilas esmectíticas nacionais começaram a ser estudados com mais detalhe na década de 60 (Souza Santos & Santini 1965, Caldasso 1967, Berg & Souza Santos 1968). Estes depósitos ocorrem em contextos geológicos distintos, permitindo diferentes interpretações genéticas.

A seguir, descrevem-se alguns depósitos que forneceram parâmetros físico-químicos e geológicos comparativos que auxiliaram no desenvolvimento da pesquisa na região de Franca.

a) Depósitos de Boa Vista - Campina Grande (PB)

Os depósitos de argilas esmectíticas de Boa Vista foram estudados por diversos autores (Caldasso & Andrade 1979, Gopinath *et al.* 1979; Gopinath *et al.* 1981, entre outros).

Segundo Gopinath *et al.* (1981) as argilas esmectíticas da região de Boa Vista são resultantes da alteração dos materiais piroclásticos (tufos e *lapilli*), oriundos do vulcanismo local. Durante as atividades vulcânicas, os materiais de caráter explosivo, em sua maioria vidro vulcânico, foram depositados em paleodepressões lacustres. A devitrificação dos materiais vítreos, em condições alcalinas, levou à formação de argilas esmectíticas.

As argilas esmectíticas de Boa Vista são lavradas em pequenas bacias circulares e ocorrem associadas a sedimentos arenosos com estratificação horizontal ou ondulada. Estes sedimentos lacustres estão assentados sobre basaltos de idade terciária ou diretamente sobre rochas pré-cambrianas (gnaisses e migmatitos). Regionalmente, afloram granitos, gnaisses, migmatitos e basaltos.

Estas argilas são compostas de uma mistura de nontronita ou nontronita-beidelita, com illita, caulinita e camadas mistas (I-M) (Souza Santos 1976). Após tratamento com carbonato de sódio, apresentam propriedades tecnológicas semelhantes às bentonitas sódicas do Wyoming, podendo ser aproveitadas nas seguintes aplicações: agente tixotrópico em fluidos de perfuração rotativa de poços; agente ligante de areia de moldagem para fundição; agente ligante para a pelletização de minérios de ferro. Sem ativação, tais argilas funcionam como *terra fuller*, no descoramento de óleos vegetais.

As reservas no Estado da Paraíba (Campina Grande e Cubati) estão avaliadas em torno de 21,8 milhões t (DNPM 1991) e abastecem a maior parte do mercado brasileiro para esse tipo de matéria-prima. A produção do Estado no ano de 1990 foi superior a 72.000 t, deste total, 67.000 t sofreram tratamento.

b) Depósitos de Taubaté (SP)

Estes depósitos ocorrem associados à Formação Tremembé do Grupo Taubaté (Riccomini 1989), constituída por siltitos e argilitos de cor verde, com tonalidades variáveis, intercalados com arenitos, folhelhos pirobetuminosos e calcários. A composição mineralógica é dada pelos argilominerais esmectita, illita, caulinita, clorita, camadas mistas (I-M), além de outros minerais. Em superfície, a esmectita degrada-se originando caulinita, conforme verificado por Suguio (1969) e Riccomini (*op.cit.*)

Tais sedimentos foram depositados em ambiente lacustre, sob condições climáticas de semi-aridez, caracterizando sistema do tipo *playa-lake*. As esmectitas ocorrem fundamentalmente sob a forma de finas placas de bordos arqueados, o que evidencia a sua origem detrítica (Brandt Neto 1990).

Paiva Neto & Nascimento (1956) foram os primeiros autores que fizeram referência à presença de argilas esmectíticas nesses sedimentos, e destacaram as suas propriedades coloidais.

Zandonadi (1972) caracteriza tecnologicamente tais argilas, enfatizando seu uso industrial como agente aglomerante de areias de moldagem para fundição e agente descorante de óleos vegetais. Souza Santos (1963, 1975) classifica estas argilas como *terra fuller* de baixo rendimento *in natura*.

As argilas de Taubaté são as únicas similares atualmente exploradas no Estado com aplicação restrita, sendo utilizadas como *terra fuller*, no descoramento de óleos

vegetais e minerais. Atualmente, encontram-se em operação quatro minas na região: Aligra e Argos, em Taubaté. Santa Fé, em Tremembé, e Eucatex Mineração, em Pindamonhangaba, com reservas que superam, conjuntamente, 30 milhões t (Franchi *et al.* 1992).

Segundo DNPM (1991), a produção paulista em 1990 foi superior a 33.000 t, correspondendo a 30% da produção nacional deste tipo de argila, e destinou-se aos seguintes fins industriais: descoramento de óleos industriais, aglomerantes em moldes de fundição, agente higroscópico (antiaglomerante) em fertilizantes e clarificante de óleos e gorduras.

c) Depósitos de Vitória da Conquista (BA)

As argilas esmectíticas de Vitória da Conquista são resultantes da alteração de uma grande lente de anfibólio-xisto intercalada em gnaiss, aflorando ao longo da borda de pediplano terciário recoberto por areias e argilas inconsolidadas (Moreira 1984). O corpo argiloso, juntamente com a rocha gnaissica que o envolve, encontra-se sobreposto por uma camada sub-horizontal de quartzito. A profundidade da alteração varia de alguns centímetros a um máximo de 50 m, particularmente sob a cobertura terciária e ao longo de sua borda.

Segundo Moreira (*op.cit.*), como a presença de anfibólio-xisto parcialmente alterado contendo esmectita, intercalações de gnaiss alterado no corpo de minério, e a forma irregular do depósito de argilas esmectíticas, sugerem origem intempérica.

A argila é predominantemente do tipo esmectita dioctaédrica Mg-Ca, com quantidades variáveis de caulinita. Alguns horizontes contêm vermiculita e óxidos de ferro.

As reservas estão avaliadas em 4 milhões t de argilas, que poderão ser utilizadas em fluidos para perfuração de poços, como aglomerante de areias de fundição, como clarificante de óleos vegetais e minerais, entre outros (Moreira 1986).

d) Depósitos de Sacramento (MG)

As argilas esmectíticas de Sacramento são formadas a partir da alteração de rochas vulcânicas de composição básica a ultrabásica, sob influência de processos hidrotermais e intempéricos (DNPM 1964). Seus depósitos localizam-se, de modo geral, nas bordas dos chapadões areníticos que cobrem os derrames basálticos. O argilomineral predominante é uma esmectita dioctaédrica do tipo nontronita. Secundariamente, têm-se caulinita, illita, quartzo, magnetita e hematita. Na parte superior dos depósitos, ocorre argila laterítica avermelhada, resultante da degradação das argilas esmectíticas subjacentes, composta de caulinita e haloisita, gibsitita e hidróxidos de ferro.

Segundo Zandonadi (1972), estas argilas, após tratamento com carbonato de sódio, podem ter as seguintes aplicações: fluido tixotrópico para perfuração de poços; agente aglomerante de areias de moldagem para fundição; agente descorante de óleo de algodão (após ativação ácida).

As reservas de argilas esmectíticas de Sacramento estão avaliadas em 83.837 t (DNPM 1991). O porte restrito dos jazimentos e a heterogeneidade química das argilas prejudicam o seu aproveitamento industrial.

CAPÍTULO III

METODOLOGIA E TÉCNICAS DE ANÁLISE

O estudo proposto configura-se basicamente como um trabalho de pesquisa mineral, complementado por análises e ensaios de caracterização tecnológica. Para atingir tais propósitos, executou-se uma série de atividades técnicas em campo e em laboratórios do IPT, que permitiram a localização e caracterização geológica dos depósitos de argilas esmectíticas, bem como a avaliação de suas reservas e propriedades tecnológicas.

Os trabalhos realizados podem ser agrupados nas etapas a seguir descritas.

1 LEVANTAMENTO E ANÁLISE DE INFORMAÇÕES

Os levantamentos bibliográficos foram dirigidos de modo a obter informações sobre as características físico-químicas, geológicas e usos industriais das argilas esmectíticas, tanto quanto aos jazimentos estrangeiros como aos nacionais. Na mesma oportunidade, enfocou-se a bibliografia geológica sobre as unidades litoestratigráficas da Bacia do Paraná na região NE do Estado de São Paulo, visando caracterizar com maior acuidade as ocorrências conhecidas em relação ao contexto geológico regional.

Com relação ao apoio cartográfico, levantaram-se, através do Inventário Cartográfico do Estado de São Paulo, todos os mapeamentos topográficos e aerofotogramétricos realizados na região, optando-se por bases 1:50.000 do IBGE, posteriormente ampliadas, e por aerofotos 1:25.000 do IBC/GERCA (1971).

2 TRABALHOS DE CAMPO

Esta atividade teve início com a fotointerpretação das áreas previamente selecionadas, utilizando-se fotografias aéreas pancromáticas 1:25.000, em que se procurou individualizar as diversas unidades mesozóicas da Bacia do Paraná e as formações cenozóicas mais recentes.

Na fotointerpretação, adotou-se como critério a separação dos substratos pelíticos, com base fundamentalmente na tonalidade, pois tais estratos normalmente retêm mais umidade, dando maior reflexão da luz e mostrando, assim, tons de cinza mais escuros.

Em fotos aéreas, o contato dos derrames basálticos com os sedimentos das unidades sobrepostas é bastante destacado pelas tonalidades de cinza e aspectos gerais do relevo. Menos nítida é a mudança litológica da seqüência suprabasáltica para os depósitos cenozóicos, sendo caracterizada por rupturas de declive côncavas, ocasionadas pela erosão diferencial. Os depósitos cenozóicos foram reconhecidos em fotografias aéreas pelas seguintes peculiaridades: presença de pequenas lagoas circulares e depressões fechadas; baixa densidade de drenagem; tonalidades claras do terreno; colinas amplas e com perfil convexo; presença de boçorocas nas frentes de erosão; cobertura vegetal rala do tipo cerrado.

As informações obtidas na fotointerpretação foram plotadas em bases topográficas, na escala 1:50.000, e checadas posteriormente em campo, durante o levantamento geológico e as campanhas de sondagem.

2.1 Levantamento Geológico

Esta atividade envolveu a checagem da fotointerpretação, através de seções e perfis geológicos ao longo de caminhos e drenagens da região. Paralelamente, executaram-se sondagens a trado mecânico e amostragens sistemáticas.

No presente trabalho, a unidade suprabasáltica não foi individualizada em relação às coberturas cenozóicas, em face da ampla e delgada distribuição dos sedimentos mais jovens que ocorrem principalmente sob a forma de elúvios e colúvios, capeando as diversas unidades litoestratigráficas da região.

Neste levantamento, deu-se ênfase especial à caracterização geológica dos derrames de basalto, em virtude da sua importância como provável fonte de argilas esmectíticas, e à unidade suprabasáltica, em face da sua potencialidade para depósitos econômicos dessa substância mineral.

2.2 Sondagem e Amostragem

Nas campanhas de sondagem, optou-se pela realização de sondagens pioneiras e de extensão ao longo da faixa de exposição do material pelítico. Os objetivos principais desta atividade foram a caracterização do comportamento espacial dos depósitos argilosos e a amostragem representativa, com vistas na sua caracterização analítica.

As perfurações foram executadas com trados manuais e mecânico, utilizando-se os seguintes equipamentos:

- a) trado manual do tipo concha (convencional) com 2,5" de diâmetro empregado em substratos arenosos em sondagens pouco profundas (máximo de 6 m);
- b) trado mecânico motorizado MB/1 com 3" de diâmetro: apropriado para sondagens mais profundas, chegando a atingir até 20 m.

Os testemunhos de sondagem foram amostrados e descritos em campo, e as amostras submetidas à triagem para selecionar de forma criteriosa os materiais coletados e, posteriormente, encaminhadas ao laboratório.

Para estudo de micromorfologia de alteração, coletaram-se amostras não-perturbadas e orientadas, a partir de canais verticais em perfis de alteração na Serra da Faquinha. A extensão desses canais e o intervalo de amostragens variaram de acordo com a espessura dos perfis e as mudanças texturais e estruturais nos horizontes.

3 TÉCNICAS DE ANÁLISE

A metodologia laboratorial foi definida a partir de parâmetros físico-químicos e tecnológicos, com base em estudos desenvolvidos por Zandonadi (1972), que permitiram caracterizar o material argiloso amostrado e avaliar as suas qualidades.

As análises e os ensaios foram efetuados em laboratórios do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. Os métodos analíticos adotados nos diversos laboratórios são abordados a seguir, e o fluxograma de análises simplificado é apresentado na Quadro 3.

3.1 Análises Granulométricas

As análises granulométricas foram executadas por um processo combinado de pipetagem e peneiramento. Através da pipetagem, são analisadas as partículas silte e argila (de 0,062 mm a 0,004 mm). Após a pipetagem, as partículas menores que 0,062 mm são eliminadas por elutriação a fim de se processar o peneiramento, que é realizado empregando-se um conjunto de peneiras de 1/2 em 1/2 phi segundo a escala granulométrica de Wentworth (1922).

3.2 Análises Mineralógicas

As análises mineralógicas tiveram por objetivo a caracterização dos sedimentos pelíticos amostrados e dos materiais de alteração de rochas basálticas. Para estas

QUADRO 3 - Fluxograma de análises e ensaios tecnológicos de argilas esmectíticas para usos industriais (baseado em Zandonadi 1972; Souza Santos, 1976).

análises, utilizaram-se métodos de difração de raios X, análise térmica diferencial, microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura.

3.2.1 Difração de raios X

A preparação das amostras da fração argila envolveu inicialmente a desagregação do material argiloso. Posteriormente, porções representativas das amostras foram dispersadas em água deionizada. A fração argila (0,004 mm) de cada amostra foi pipetada, obedecendo-se à lei de Stockes, e aplicada de maneira orientada sobre lâminas de vidro, e submetendo-se a exame por difratometria de raios X, nos estados natural, glicolado e aquecido a 495°C/2 h.

A preparação das amostras para análise total consistiu na moagem até a granulometria inferior a 44 micrômetros, e o pó obtido foi disposto, de maneira não-orientada, em lâmina suporte de cavidade.

O equipamento utilizado em ambas as análises foi o Rigaku Denki, modelo Gergeiflex, operado com radiação K_{alfa} do cobre.

A determinação dos minerais presentes foi efetuada com a utilização do Mineral Power Diffraction File Search Manual (JCPDS/ASTM 1980).

A avaliação semiquantitativa dos argilominerais foi calculada utilizando os espectros das amostras glicoladas, medindo as áreas dos picos principais dos argilominerais presentes, a saber: esmectita aproximadamente região dos 17 Å⁰; illita região dos 10 Å⁰; caulinita região dos 7 Å⁰. As áreas contidas por estes picos principais foram medidas com planímetro e calculadas suas porcentagens.

3.2.2 Análise térmica diferencial (ATD)

A amostra foi seca em estufa a 60°C, moída em gral de ágata, até granulação menor que 44 micrômetros, e o pó obtido foi pesado e acondicionado em porta-amostra de cerâmica e submetido a aquecimento. O comportamento térmico do material foi registrado em gráficos (curvas TD), com temperatura atingindo até 1.200°C.

Este método foi utilizado para auxiliar na identificação dos argilominerais presentes na amostra.

3.2.3 Microscopia ótica

O estudo petrológico-micromorfológico sobre lâminas delgadas foi efetuado a partir de amostras de basalto alterado não-pertubadas e orientadas, impregnadas com resina artificial. Para a preparação de lâminas utilizou-se técnica desenvolvida pelo

Laboratório de Petrologia do IPT, que consiste na preservação dos constituintes mineralógicos, das suas características texturais e descontinuidades.

3.2.4 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Utilizaram-se os equipamentos do laboratório de microscopia do Instituto de Química de Araraquara (Unesp), constantes do evaporador (Vacuum Evaporator, tipo JEE.SS - JEOL) e do microscópio de varredura JEOL, modelo JSM.P 15. Este aparelho permitiu a obtenção de fotomicrografias com aumentos que variavam de 6.000 a 10.000 vezes.

Este método de análise possibilita obter informações de caráter morfológico dos argilominerais presentes nas amostras.

3.3 Análises Químicas

As análises químicas foram realizadas no Laboratório de Geoquímica do IPT utilizando-se métodos gravimétricos e instrumental. Determinaram-se por gravimetria, a partir de fusão com Na_2CO_3 , por calcinação em mufla a 1.000°C - SiO_2 , Fe_2O_3 , CaO , MgO e PF e, por análise instrumental (absorção atômica), no mesmo ataque para gravimetria - Al_2O_3 , TiO_2 , Fe_2O_3 , MgO , Na_2O e K_2O .

3.4 Ensaios Tecnológicos

O ensaio tecnológico baseia-se na verificação experimental da transformação de uma argila esmectítica não-sódica, em uma argila esmectítica sódica a qual deve apresentar desempenho similar às amostras-padrão (argilas sódicas, tipo Wyoming). O grau de transformação ou de troca catiônica obtido é medido através da determinação das viscosidades aparente e plástica de suspensões aquosas da argila tratada.

Este método foi baseado em Zandonadi *et al.* (1970), que desenvolveram um método preliminar de ensaio que antecederia aos ensaios laboratoriais, mediante o qual é determinado se essa transformação é possível ou não e o grau de transformação ou de troca catiônica conseguido.

A determinação das viscosidades torna-se um ensaio seletivo e significativo, partindo-se do pressuposto que as suspensões aquosas de argilas sódicas naturais na concentração de 6% dão viscosidades aparente e plástica de 15,0 cP e de 8,0 cP (no mínimo), respectivamente. Quando as viscosidades dão valores dentro das especificações, todas as outras propriedades também atendem aos valores especificados (Zandonadi 1972). Ressalta-se que, para algumas argilas com viscosidades abaixo de padrão, é

possível uma ativação ácida com desenvolvimento de propriedades para descoramento de óleo com bom rendimento, como é feito com as argilas lavradas na Bacia de Taubaté (Vale do Paraíba, SP).

Grim (1962), Zandonadi (1972) e Souza Santos (1976) descrevem em detalhe o método de estudo para caracterização de argila para uso industrial. No caso do uso como agente tixotrópico de fluido de perfuração, as especificações para os característicos desejados de uma argila sódica foram fixados pelo American Petroleum Institute (1962 *apud* Zandonadi 1972) e adotados pela Petrobrás.

3.4.1 Preparação de amostra

As amostras foram secas a 70°C e moídas em britador de mandíbulas até granulometria inferior à peneira ABNT no 200 (abertura de 0,074 mm). Posteriormente, foram separadas cinco alíquotas de 100 g cada de argila seca, para tratamento com solução concentrada (200 g/litro) de carbonato de sódio (Na_2CO_3).

Feita a homogeneização até a perda da aparência de material seco, a mistura foi mantida em câmara úmida por 3 dias. Posteriormente, preparam-se suspensões aquosas a 6%, procedendo-se a seguir a medida das viscosidades aparente e plástica conforme norma Petrobrás (1981).

O tratamento com carbonato de sódio foi feito com solução concentrada (200 g/litro) em alíquotas das amostras selecionadas secas a 70°C e moídas até granulometria inferior à peneira ABNT 200 (abertura de 0,074mm), com a adição crescente de Na_2CO_3 .

3.4.2 Ensaio preliminar de bentonita

No estudo de caracterização tecnológica, tiveram destaques os ensaios visando à troca catiônica (CTC) do material argiloso, naturalmente policatiônico, mediante diferentes processos de tratamento com carbonato de sódio. Deu-se ênfase especial também à viscosidade aparente de suspensões aquosas a 6% da argila tratada como prova da capacidade de troca catiônica, sendo a determinação da viscosidade um ensaio adotado para caracterizar esmectitas sódicas. O método adotado para medir a CTC foi o do acetato de sódio.

A capacidade de troca catiônica (CTC) é definida por Gomes (1988) como o quantitativo máximo de cátions que um mineral argiloso pode permutar, e exprime-se normalmente em meq/100 g de argila (milequivalentes por cem gramas) e varia de acordo com o tipo de argilomineral.

A adição de 100 meq de carbonato de sódio por 100 g de argila baseia-se na capacidade de troca de cátions, que para a maioria das argilas brasileiras varia de 50 a

100 meq/100 g. A partir destes valores, adotou-se 100 meq de carbonato de sódio como um teor prático para o tratamento de argilas visando à troca de cátions (Zandonadi *et al.* 1970, Zandonadi 1972, Souza Santos 1976).

CAPÍTULO IV

CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área está localizada no extremo nordeste do Estado de São Paulo, compreendendo a região de Franca e Pedregulho, no divisor de águas dos rios Sapucaí Mirim e Grande. As coordenadas limites são os paralelos $20^{\circ}45'$ e $21^{\circ}00'$ da latitude sul e os meridianos $47^{\circ}15'$ e $47^{\circ}45'$ a oeste de Greenwich (Figura 6).

Geologicamente, a região situa-se na borda nordeste da Bacia do Paraná, o que confere à sua estratigrafia características peculiares. Estas se devem principalmente ao seu posicionamento em área marginal da Bacia, onde a movimentação tectônica acentuada foi particularmente importante na deposição e preservação do conjunto vulcano-sedimentar.

O limite da Bacia do Paraná é marcado por elementos tectono-estruturais positivos, representados pela Flexura de Goiânia (Paleozóico) e pelo arco do Alto Paranaíba (Jurássico Superior a Cretáceo), como referido em Almeida (1986).

A região abrange, basicamente, terrenos mesozóicos constituídos por rochas sedimentares de caráter siliceoclástico e magmatitos básicos, pertencentes ao Grupo São Bento. A estes se associam diversas ocorrências de argilas esmectíticas (Del Monte *et al.* 1988, Tanno *et al.* 1990, Tanno *et al.* 1992).

Sedimentos cenozóicos, representados por delgadas coberturas areno-argilosas e conglomeráticas, recobrem extensos chapadões e espigões, e ocorrem também ao longo das principais drenagens.

Geomorfologicamente, a região está inserida na província das Cuestas Basálticas (Ponçano 1981).

1 GEOLOGIA REGIONAL

1.1 Introdução

Para o conjunto mesozóico abordado nesta pesquisa, a análise do acervo bibliográfico concernente à geologia da área revela aceitação bastante convergente para o estabelecimento de duas seqüências estratigráficas, traduzidas pelos grupos São Bento

FIGURA 6 - Mapa de localização das áreas pesquisadas.

e Bauru (por exemplo, Soares & Landim 1973, Soares *et al.* 1973, Yamamoto *et al.* 1977, IPT 1981a, Melo & Ponçano 1983, Barcelos 1984, Tanno *et al.* 1990). Enquanto o limite entre estas duas seqüências é tido consensualmente como uma discordância erosiva, a individualização do pacote superior (suprabasáltico) em relação à cobertura cenozóica é mais controversa, tanto no estabelecimento do contato, como no próprio significado destes depósitos mais jovens.

Assim, a Figura 7 ilustra um dos perfis mais representativos da seqüência suprabasáltica na área, localizada nas imediações da cidade de Pedregulho. O perfil envolve genericamente dois conjuntos litofaciológicos distintos: um basal areno-lamítico (Foto 1) e um superior areno-rudáceo (Fotos 2 e 3), sotopostos à delgada cobertura areno-conglomerática ferruginosa, geralmente inconsolidada (Foto 4).

Para os sedimentos basais, alguns autores são unânimes em posicioná-los no Cretáceo Superior sob denominações diversas dentro do Grupo Bauru, a saber: Formação Bauru (Soares *et al.* 1973, Cottas 1977, Yamamoto *et al.* 1977); Litofácies Itaqueri, da Formação Marília (Soares *et al.* 1980); Formação Adamantina (IPT 1981a, Melo & Ponçano 1983); Formação Itaqueri (Barcelos 1984).

No tocante ao conjunto superior areno-rudáceo, poucos autores, como Barcelos (*op. cit.*) e Yamamoto *et al.* (*op. cit.*), incluem-no também dentro do Grupo Bauru. Os demais tendem a considerar tais sedimentos como seqüência à parte, incluindo-os em contexto evolutivo posterior, no âmbito do Cenozóico Paulista. Neste sentido, destacam-se os trabalhos de Soares *et al.* (1973), IPT (1981a) e Ponçano *et al.* (1982); os dois últimos atribuem-lhe a designação de Formação Itaqueri (KT), considerando-os como correlativos ao esculpimento da superfície do Japi.

No presente estudo adotou-se a reavaliação preliminar feita por Tanno *et al.* (1990) e Cabral Jr. *et al.* (1992) sobre a evolução geológica mesozóica na região, tendo como base algumas observações de campo, a saber:

a) contato da Formação Serra Geral com os sedimentos suprabasálticos -

Observaram-se contatos concordante e transicional em pelo menos dois pontos. Próximo a Pedregulho, os lamitos arenosos tidos como pertencentes ao Grupo Bauru estão concordantes sobre arenitos eólicos da Formação Serra Geral (Figura 7). Neste mesmo local, Souza *et al.* (1984) descrevem a ocorrência de magmatitos intercalados no pacote pelítico. Em afloramento (voçoroca) no Morro da Faquinha, constata-se a interdigitação de arenitos eólicos e basaltos da Formação Serra Geral com a seqüência suprabasáltica, composta predominantemente por arenitos, arenitos conglomeráticos e conglomerados (Figura 8);

FIGURA 7 - PERFIL GEOLÓGICO DE PEDREGULHO.

b) características faciológicas - A ciclicidade dos níveis rudáceos é constante em toda a coluna suprabasáltica, não sendo particularidade os sedimentos com basaltos e nem tampouco do topo dessa seqüência. Por exemplo, em Restinga (Figura 9) observa-se a repetição dos conglomerados em toda a seqüência dos sedimentos. Outro fator a ser salientado refere-se à recorrência de feições eólicas neste conjunto sedimentar, tais como pequenas construções de dunas (Figura 10) e pavimentos desérticos com presença de ventifactos.

A partir destas informações, Tanno *et al.* (1990) consideraram-se o conjunto suprabasáltico como uma seqüência única. As relações desses sedimentos com os derrames basálticos mostram uma relação mais íntima entre as unidades, evidenciando a penecontemporaneidade desses eventos, o que levou à inserção do conjunto areno-lamítico e rudáceo no âmbito do Grupo São Bento, conferindo-lhe a designação informal de "Unidade Franca". As Figuras 11 e 12 apresentam, respectivamente, a coluna estratigráfica adotada e o mapa geológico da área.

Abordam-se, a seguir, os diversos conjuntos litoestratigráficos presentes na área de estudo.

1.2 Embasamento Cristalino (Pré-C)

As rochas do embasamento pré-cambriano afloram no extremo nordeste da região, nas imediações da represa de Jaguará, no Rio Grande. São formadas por quartzitos, quartzo-micaxistos, biotita-xistos, clorita-xistos, metabasitos, milonitos, etc. (IPT 1981a). Estas rochas possuem orientação NW-SE e estão fortemente cisalhadas.

A posição estratigráfica da unidade não está bem definida, sendo atribuída ora ao Grupo Canastra por Barbosa *et al.* (1970 *apud* IPT 1981a), ora ao Grupo Araxá (Hasui *et al.* 1989).

1.3 Bacia do Paraná

A Bacia do Paraná é constituída na região pela seqüência mesozóica do Grupo São Bento compreendida pelas formações Pirambóia, Botucatu, Serra Geral e "Unidade Franca".

1.3.1 Formação Pirambóia

Esta unidade ocorre na parte leste da área e é formada predominantemente por arenitos quartzosos, de cores variando de esbranquiçadas a avermelhadas.

FIGURA 9 - PERFIL GEOLÓGICO DE RESTINGA

FIGURA 10 - SEÇÃO GEOLÓGICA ESQUEMÁTICA (ROD. PEDREGULHO - IGARAPAVA - Km 27)

RELAÇÕES ESTRATIGRÁFICAS

IDADE

FIGURA 11 - COLUNA ESTRATIGRÁFICA ADOTADA PARA A ÁREA

Perfil Geológico Regional Esquemático.

- CENOZÓICO**
- oo Aluvião
- MESOZÓICO**
- Kf Unidade Franca
 - JKag Formação Serra Geral (Derrames e Intrusivas relacionadas)
 - JKb Formação Pirambóia e Botucatu
- PROTEROZÓICO SUPERIOR**
- Pk Grupo Canastra
- ▲ Ocorrências de argilas esmectíticas

FIGURA 12 - Mapa Geológico da Área.

A granulometria varia de média a muito fina, localmente grossa, com até 20% de matriz argilosa, podendo conter finas camadas de lamitos intercalados. O argilomineral dominante nas rochas frescas é a esmectita, a qual se encontra comumente alterada para caulinita nas porções mais expostas.

Os pacotes arenosos são caracterizados por estratificações plano-paralela, cruzada planar, tangencial na base e, mais raramente, acanalada.

A idade da Formação Pirambóia ainda não está bem definida. Soares (1973, 1975), baseando-se em correlações com outras unidades, posiciona-a entre o Triássico Inferior e o Jurássico Superior.

A unidade atinge aproximadamente 60 m de espessura na região de Franca, conforme Soares *et al.* (1973), que lhe atribuíram origem predominantemente fluvial.

Esta unidade recobre o Embasamento, em contato erosivo-angular e com a Formação Botucatu (sobrepsta), pode manter relações de contato abruptas ou transicionais (Soares & Landim 1973), evidenciando sua penecontemporaneidade.

1.3.2 Formação Botucatu

Esta formação é constituída por arenitos quartzosos amarelados a avermelhados, homogêneos, de granulometria fina a média, com grãos foscos e esféricos, bem arredondados, com estratificações cruzadas de grande porte, peculiares. Os arenitos são localmente silicificados (Serra da Faquinha), com baixo conteúdo de matriz argilosa (menor que 3%), com esmectitas nas porções frescas e caulinita nas partes mais alteradas. Os seus minerais pesados compreendem basicamente turmalinas e zircões, e secundariamente estarolita, granada, rutilo e cianita (Yamamoto *et al.* 1977).

Localmente, ocorrem espessos pacotes (10 m) de arenitos conglomeráticos associados, em geral, à base da formação, a qual atinge na região um máximo de 60 m (Soares *et al.* 1973).

Os depósitos da Formação Botucatu são característicos de ambiente em clima árido (Soares 1973, 1975).

A relação de contato com os basaltos sobrejacentes da Formação Serra Geral é de forma transicional, intercalando-se corpos de arenito eólico e lamitos lacustres com derrames basálticos.

1.3.3 Formação Serra Geral e Intrusivas Básicas

A unidade é composta por uma seqüência de derrames basálticos, com intercalações de arenitos eólicos e, mais localizadamente, lamitos lacustres, como na Serra de Rifaina (Foto 5), atingindo na área espessura da ordem de centena de metros (Soares *et*

al. 1973). As rochas basálticas geralmente se destacam na paisagem formando morros testemunhos isolados e superfícies aplainadas elevadas com bordas escarpadas.

Segundo Almeida (1956), o vulcanismo basáltico processou-se sobretudo através de imensas geoclasses de traçado sub-retilíneo. A emissão das lavas à superfície fazia-se sem fenômenos explosivos violentos, sendo muito raros os depósitos piroclásticos, fato este que reflete principalmente nas características texturais e mineralógicas de suas rochas vulcânicas.

Estudos realizados por Bellieni *et al.* (1983, 1984) de amostras de basalto da Bacia do Paraná mostraram a seguinte composição: plagioclásios cálcicos ripiformes (An 58%), microlitos de piroxênios (25% em augita e rara pigeonita), opacos (magnetita, ilmenita, titano-magnetita - 10%), vidro potássico toleítico (8%) e olivina totalmente alterada (3%). Segundo estes autores, a ocorrência de piroxênios ricos e pobres em Ca e a escassez de Mg-olivina e a grande concentração de opacos na matriz afanítica indicam que as rochas básicas representativas do vulcanismo da Bacia do Paraná pertencem à suíte toleítica.

Gonçalves (1987), estudando os derrames na região de Riberão Preto, observou que estes são representados por rochas vulcânicas muito ricas em titânio, o que levou a classificá-las como andesi-basaltos ricos em TiO_2 . Os basaltos dessa região possuem grande quantidade de material vítreo (10-60%), sobretudo na borda dos derrames, sendo constituídos predominantemente por plagioclásios cálcicos (andesina e labradoritas) e clinopiroxênios (augita e pigeonita). Ocorre também quantidade apreciável de magnetita, ilmenita e titanomagnetita, além de olivina, hornblenda, apatita e quartzo. Preenchendo amígdalas, são encontrados minerais secundários, principalmente do grupo das zeólitas e, em menor proporção, quartzo, calcedônia, celadonita e calcita.

Diques e sills, relacionados com o magmatismo mesozóico, se alojam em diferentes horizontes estratigráficos da Bacia. Especificamente na região, Soares *et al.* (1973) indicam a ocorrência do extenso sill da Borda da Mata, no contato entre as unidades Botucatu e Pirambóia. Entretanto, a dificuldade na diferenciação dos corpos intrusivos e extrusivos levou Almeida (1964) a considerá-lo como derrame.

Datações efetuadas nos magmatitos indicam idade entre o Jurássico Superior e o Cretáceo Inferior (Cordani & Vandomos 1967), o que também serve de balizamento geocronológico para o topo da Formação Botucatu.

Com relação ao contato superior da Formação Serra Geral, admite-se sua passagem transicional aos sedimentos da Unidade Franca.

1.3.4 Unidade Franca

A Unidade Franca é constituída por uma seqüência predominantemente detrítica imatura, que envolve desde sedimentos conglomeráticos até fácies essencialmente argilosas. Prevaecem os termos arenosos de granulometria e selecionamento variados, maciços ou estruturados, sendo freqüente a presença de camadas de arenitos conglomeráticos, orto e paraconglomerados polimíticos com seixos de até 20 cm de diâmetro. Intercalam-se comumente camadas de lamitos arenosos e mais raramente argilitos.

Esta unidade caracteriza-se, preferencialmente, pela deposição em ambiente de alta energia, típico de sistemas de leques aluviais, como já sugerido por diversos autores (por exemplo, Soares *et al.* 1980, IPT 1981a). Os sedimentos rudáceos representam as fácies das porções apicais do leque (Fotos 6 e 7), em que imperam a ação de fluxos de massas (*debris flows* e *mud flows*). Já os bancos arenosos devem corresponder a ambientes onde prevaleciam a atuação de processos hidrodinâmicos, referindo-se a depósitos de canais e lençóis de escoamento (*sheet flood*). Depressões situadas entre os eixos dos leques (*bajadas*), ou mesmo nas porções mais distais (*playas*), comportariam pequenas bacias lacustres que acomodariam estratos argilosos mais homogêneos. Esta última litofácia (Tanno *et al.* 1992) compõe o horizonte sedimentar de interesse neste estudo (Foto 8).

As características texturais e mineralógicas dos sedimentos da Unidade Franca indicam que estes foram gerados em condições paleoclimáticas áridas a semi-áridas. Nesse sentido, constata-se a existência freqüente de clastos instáveis em climas mais úmidos (por exemplo, feldspato, basalto - Foto 7), de estratos de natureza arcossiana, bem como a presença constante de argilas esmectíticas, tanto na forma de matriz, quanto constituindo camadas argilosas mais puras (por exemplo, Restinga). Associação de geodos, lentes e veios de sílica em diversos níveis desta unidade também é indicativa de atividade pedogenética evaporítica, típica de clima seco, não se descartando que parte dessas ocorrências, mormente as venulares, pode ser derivada de eventos hidrotermais, tendo em vista a expressiva silicificação de arenitos sotopostos, pertencentes, já neste caso, à Formação Serra Geral.

Os registros de atividade eólica nestes sistemas estão relacionados com as fácies arenosas fina-média, bem selecionadas, limpas, com estratificações cruzadas proeminentes, constituindo pequenas construções dunares e, mais hipoteticamente, a níveis conglomeráticos relativamente puros com seixos facetados (*ventifactos*, indicativos de paleosuperfícies desérticas - *serir*).

A composição petrográfica das rochas que compõem a Unidade Franca fornece subsídios sobre a possível área fonte desses sedimentos. Estes teriam sido formados por

materiais provenientes da região que hoje corresponde à Depressão Periférica e de aportes dos planaltos cristalinos (NE de Franca).

Evidências de possível ação de processos hidrotermais sobre os sedimentos da Unidade Franca foram constatadas em afloramentos da Rodovia Pedregulho-Igarapava, km 27 (Foto 9, Figura 10), em que ocorrem veios de caulinita creme, de espessura centimétrica, seccionam indistintamente basaltos e sedimentos arenosos "Franca". O elevado grau de cristalinidade das caulinitas, observado no difratograma de raios X, sugere a sua origem hidrotermal.

Com base em dados de campo, admite-se contato transicional e interdigitado entre esta Unidade e a Formação Serra Geral, assentando-se sobre basaltos e arenitos silicificados. Em escala de afloramento, podem ser observados ainda contatos abruptos, concordantes e erosivos. O primeiro caso pode ser constatado na base do perfil geológico clássico desta sequência nas proximidades de Pedregulho (Figura 7), onde lamitos arenosos "Franca" se sobrepõem diretamente aos arenitos eólicos Serra Geral. Os contatos erosivos são demarcados por brechas basálticas (Foto 10) e níveis conglomeráticos, evidenciando a exposição subaérea dos derrames basálticos e a existência de diastemas, fato comum em sedimentação continental de borda de bacia.

A unidade encontra-se truncada planarmente pelas superfícies reliquias erosivas, relacionadas com o aplainamento Sul-Americano (King 1956) às quais se associam comumente cascalheiras elúvio-coluvionares cenozóicas.

A rede de drenagem implantada a partir do Cenozóico foi responsável em parte pela dissecação da Unidade, preservada em pequenos espigões e platôs entre as cidades de Batatais, Franca, Pedregulho e Rifaina. Os perfis geológicos mais típicos possuem espessuras máximas da ordem de 40 m na região de Franca e 80 m nas proximidades de Pedregulho.

No contexto paleogeográfico mais amplo, a Unidade Franca possivelmente representou o sistema final de abastecimento da paleobacia São Bento no flanco nordeste da Bacia do Paraná no Estado de São Paulo, correspondendo mais especificamente à preservação de parte do *reg* desértico mesozóico. O interdigitamento da unidade com os derrames basálticos induz à penecontemporaneidade destes dois eventos e a seu posicionamento em caráter preliminar no Cretáceo Inferior (Tanno *et al.* 1990, Cabral Jr. *et al.* 1992). A Figura 13 ilustra o modelo deposicional esquemático da Unidade Franca e suas relações estratigráficas.

FIGURA 13 - MODELO DEPOSICIONAL ESQUEMÁTICO DA "UNIDADE FRANCA" - GRUPO SÃO BENTO - RELAÇÕES ESTRATIGRÁFICAS E MINERALIZAÇÕES ASSOCIADAS

1.4 Sedimentos Cenozóicos

Os sedimentos cenozóicos abrangem depósitos eluviais, coluviais e aluviais, e algumas coberturas de origem incerta. Estão amplamente distribuídos na região, recobrando indistintamente rochas de diferentes unidades.

Os depósitos eluviais representam as coberturas predominantemente conglomeráticas que ocorrem nas partes superiores do Planalto de Franca (acima de 1.000 m), sempre capeando rochas da Unidade Franca. Podem ter espessuras superiores a 3 m (Ponçano *et al.* 1992), apresentando estrutura maciça. Os conglomerados são formados por seixos de quartzito e quartzo, principalmente, bem arredondados, com matriz arenosa mal selecionada. Localmente, os sedimentos rudáceos encontram-se cimentados por material ferruginoso, formando níveis encouraçados (Foto 11). Estes materiais devem ter sido originados pela coalescência de depósitos residuais do ciclo erosivo Sul-Americano (Soares & Landim 1973).

Os depósitos coluvionares ocorrem associados às principais encostas, geralmente à frente das cuestas, e são resultantes de um processo de entalhamento das escarpas, sob condições climáticas provavelmente áridas. São constituídos por areias intercaladas com níveis de cascalho, boa parte retrabalhado dos depósitos sobrejacentes, parcialmente cimentados por óxidos de ferro. Estes depósitos são encontrados, geralmente, em níveis topográficos variando de 700 a 900 m.

Os aluviões são os depósitos mais recentes e constituem as várzeas e terraços relacionados com os rios principais da região (Sapucai Mirim e Grande). Os terraços são compostos principalmente por sedimentos conglomeráticos, em que predominam seixos de quartzo, quartzito e concreções ferruginosas. Localmente, ocorrem cascalheiras parcialmente laterizadas formando níveis encouraçados. Foram constatados na região dois níveis de terraços, balizados pelas cotas 710 e 780 (IPT 1990). As várzeas contêm sedimentos diversos, desde conglomerado até depósitos de argila orgânica. Estes sedimentos de idade quaternária são portadores de mineralizações diamantíferas.

2 GEOMORFOLOGIA REGIONAL

A região de Franca abrange um conjunto de setores de planaltos, em sua maioria acima de 800 m de altitude, às vezes ultrapassando 1.000 m, localizado no interflúvio dos rios Sapucaí Mirim e Grande. Encontra-se integralmente no âmbito da província geomorfológica das Cuestas Basálticas (IPT 1981b).

Esta província caracteriza-se morfologicamente por um relevo escarpado nos limites com a Depressão Periférica, seguido por uma sucessão de grandes plataformas estruturais, sustentadas por rochas basálticas inclinadas para o interior em direção à calha do Rio Paraná (IPT *op. cit.*). As principais formas de relevo compreendem colinas amplas e médias, morros amplos e arredondados e escarpas.

Os derrames basálticos e suas coberturas sofreram intenso entalhamento, permitindo o aparecimento, na porção frontal das cuestras, de testemunhos isolados na forma de pequenas chapadas e espigões (Foto 12). Na porção de reverso, a atuação da drenagem possibilitou a formação de autênticos cânions e relevos residuais, com amplitudes quase sempre superiores a 100 m (IPT 1990). As cuestras são delimitadas por escarpas festonadas que acompanham "grosso modo" o traçado do Rio Grande.

O Planalto de Franca é constituído por relevo de colinas médias, com altitudes em torno de 1.000 m na região próximo à crista da cuesta, perdendo altura rumo a oeste, por influência do caimento das camadas. Nesta região, o reverso das cuestras, a partir de seu rebordo para o interior, é caracterizado por relevo de colinas (Foto 13), resultantes do forte entalhamento da drenagem.

Na porção norte deste Planalto, em face da influência da bacia de drenagem de natureza obsequente (Rio Grande), ocorrem alguns platôs testemunhos, na forma de mesas basálticas (por exemplo, Morro do Sapecado), que se sobressaem de relevos mais baixos do tipo colinas amplas (Foto 14).

As formas variadas de relevo constatadas na área de estudo parecem estar relacionadas com os ciclos erosivos, que atuaram na Região Sudeste brasileira entre o final do Cretáceo e o Terciário Superior, e geraram extensas superfícies de aplainamento (Foto 15). Estas superfícies têm origens diversas, podendo estar associadas a processos poligênicos que envolvem flutuações climáticas e deformações tectônicas cenozóicas (IPT 1981b). As oscilações climáticas cenozóicas tiveram influências desde a definição de processos morfogenéticos até a variação de níveis de bases regionais.

As superfícies cimeiras do planalto, onde se preservam restos da Unidade Franca (Kf) ou então elúvios com concreções ferruginosas, são atribuídas à fase erosiva, que culminou com a formação da Superfície Sul-Americana (King 1956), ou Japi (Almeida 1964). Os níveis mais rebaixados, separados dos anteriores por escarpas, são atribuídos a uma fase de pedimentação que se teria desenvolvido entre o final do Terciário e o início do Quaternário (Bigarella & Andrade 1965).

As couraças ferruginosas que ocorrem com frequência na região correspondem a níveis tabulares de espessura variável, às vezes métrica, em que o ferro aparece cimentando material clástico, provavelmente da própria Unidade Franca, constituído por areias, grânulos e pequenos seixos de quartzo e quartzito. Estes níveis ocorrem geralmente

no topo dos pequenos morrotes residuais, testemunhos possivelmente da mais antiga superfície geomorfológica do reverso da cuesta. O dismantelamento de tais couraças fornece abundante material, freqüente em depósitos controlados por soleiras locais, situados em níveis inferiores.

Ranzani *et al.* (1972) consideram os níveis de encouraçamento que ocorrem no reverso da cuesta como correlativos da mais antiga superfície de pediplanação pós-Bauru. As suas características físico-químicas mostram que teve origem em ambiente de savanas, com duas estações climáticas alternadas - seca e úmida. A longa estação seca de déficit de água no solo controla a deposição irreversível do ferro.

CAPÍTULO V

RESULTADOS E DISCUSSÕES

1 INTRODUÇÃO

Os trabalhos realizados na região de Franca concentraram-se preferencialmente em três áreas: Restinga, Pedregulho e Serra da Faquinha (Figura 6), onde estão localizadas as principais ocorrências de argilas esmectíticas.

As três áreas foram caracterizadas em detalhe nos trabalhos de campo, através de levantamento geológico e de campanhas de sondagem, e nos estudos laboratoriais. Para tanto, foram executadas 17 sondagens, perfurando-se mais de 185 m de material argilo-arenoso, sendo selecionadas 53 amostras para análises e ensaios laboratoriais (Quadros 4, 5, 6 e 7).

Estas atividades técnicas forneceram uma série de dados e informações que possibilitaram a identificação de dois tipos distintos de depósitos de argilas: residual e sedimentar.

O jazimento residual ocorre associado à alteração de derrames de basalto da Formação Serra Geral (JKsg), localizados na Serra da Faquinha. Os jazimentos sedimentares estão relacionados com a Unidade Franca (Kf), correspondendo aos depósitos de Restinga e Pedregulho.

Estes jazimentos foram estudados detalhadamente, abordando em particular a tipologia dos depósitos e as características tecnológicas de suas argilas. Além disso, foi possível fazer uma estimativa de reserva para os diferentes tipos de depósitos, com destaque para o de Restinga, considerado o mais importante, em vista do potencial e das propriedades de suas argilas.

LOCAL	AMOSTRAS	ANÁLISES									
		MINERALOGIA					GRANULOMETRIA (%)				
		Fração Argilosa (%)					Fração Silte - Areia	Argila	Silte	Areia	Grânulos
E	K	I	C.M.	Outros							
SERRA DA FAQUINHA	SF-1 (1,00-2,00m)		95	5	?		quartzo e caulinita	27,99	11,05	60,97	
	SF-2 (2,10-4,00m)	5	85	10	(?)		quartzo, caulinita e feldspato	37,77	16,11	46,00	0,12
	SF-3 (4,00-8,10m)	10	75	15	(?)		quartzo, caulinita e feldspato (?)	38,08	23,87	37,33	0,71
	SF-4 (8,10-11,00m)	15	65	20	(?)		quartzo, feldspato e caulinita	42,53	50,45	7,02	
	SC-1 (composta)	80	15	5			quartzo e goethita, feldspato e caulinita	30,40	52,07	17,53	
	P-1.1	73	27								
	P-1.2	33	60	7							
	P-1.3	77	23		tr						
	P-1.4	37	43	20			hematita, feldspato, quartzo e goethita	46,53	51,68	1,79	
	P-1.5	63	37								
	P-1.6	73	25	2		cl-tr					
	P-1.7	73	27	tr							
	P-2.1	67	33		tr						
	P-2.2	83	17		tr						
	P-2.3	37	63			go-tr					
	P-2.4	75	15	10	tr		hematita, quartzo, goethita	45,07	54,24	0,70	
	P-2.5	73	27								
	P-2.6	93	7	tr							
	P-2.7	87	13								
	P-2.8	83	17		tr						
	SV-1	23	77								
	SV-2	68	27	5							
	SB-1		87	13			quartzo, magnetita, hematita e caulinita				
	SB-2		100								
	SB-3	5	95				ilmenita, quartzo, magnetita, caulinita, mica, goethita				
	SB-4	5	95				ilmenita, caulinita, magnetita, goethita, feldspato				
	SB-5	5	90	5			caulinita, ilmenita e goethita				
	SB-6	10	85	5			caulinita, ilmenita, quartzo e/ou mica				

QUADRO 4 - Relação de amostras e resultados analíticos da região da Serra da Faquinha

Obs: E (esmectita), K (caulinita), I (ilita), C.M. (camada mista), cl (clorita), go (goethita), mi (mica), tr (traço - < 2%).

LOCAL	AMOSTRAS	ANÁLISES									
		MINERALOGIA					GRANULOMETRIA (%)				
		Fração Argilosa (%)					Fração Silte - Areia	Argila	Silte	Areia	Grânulos
RESTINGA		E	K	I	C.M.	Outros					
	F-1b	20	80	tr		tr-gb		23,61	11,17	64,39	0,27
	F-1b1	90	10	tr		tr		16,25	35,49	48,27	
	F-1c	45	45			10-mi		20,72	10,97	68,22	0,08
	F-2	---	70			30-gb		26,75	10,21	63,04	
	F-3	---	100			tr		48,43	17,76	33,81	
	R-1	100						36,1	63,9		
	R-2	100						54,9	45,1		
	R-3	95		5				55	45		

QUADRO 5 - Relação de amostras e resultados analíticos da área de Restinga.

LOCAL	AMOSTRAS	ANÁLISES									
		MINERALOGIA						GRANULOMETRIA (%)			
		Fração Argilosa (%)					Fração Silte - Areia	Argila	Silte	Areia	Grânulos
		E	K	I	C.M.	Outros					
PEDREGULHO	T8/F5 (6,10-8,80m)	35	30	35				52,03	26,07	21,90	
	T8/F5 (9,00-12,00m)	55		45				37,85	34,80	27,35	
	T8/F13A (8,70-10,00m)	45		55				49,49	38,37	15,14	
	T4/F4A (6,40-7,00m)	30	25	45				62,26	24,26	13,48	
	T4/F4A (7,00-9,00m)	30	15	35	20			49,76	38,14	12,10	
	T4/F14 (14,80-18,00m)	70		30				51,15	36,67	12,18	
	T14/F5 (3,90-4,90m)		35	45	20			47,45	15,98	36,57	
	T14/F5 (4,90-5,50m)	55	10	35				41,10	37,02	21,88	
	PS-3a	50		40	10			54,21	37,52	8,28	
	PS-3b	55		45				46,53	44,45	9,03	
	PC-1 (composta)	55	5	40			Quartzo (predomina) e feldspato	48,38	36,30	15,29	
	AQ-1		40	60							
	AQ-2		15	85		go-tr	quartzo, mica, ilmenita e caulinita				
	AQ-3		100								
	AQ-4		100								
	RF-1			100							
	RF-2	85		10	5						
	RF-2a	65		35							
	P1	20	50	30				54,1	40,2	5,7	
	P2		60			40		17,9	10,4	71,1	
	P3	45	5	5	45						
	P4	85	15								

QUADRO 6 - Relação de amostras e resultados analíticos da região de Pedregulho.

AMOSTRA	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	CaO	TiO ₂	PF
R-1	56,40	22,30	4,00	4,40	1,48	1,30	0,06	---	8,24
R-2	55,50	22,00	3,90	5,00	1,56	1,40	<0,05	0,79	9,70
R-3	52,35	26,42	3,50	2,91	0,96	0,16	---	0,41	13,24
P-1	49,40	20,80	12,40	2,80	3,80	1,10	0,13	---	7,42
P-2	22,80	43,60	2,10	0,19	0,18	0,35	<0,05	---	20,60
PC-1	47,10	24,90	6,80	2,30	2,03	1,70	0,05	4,61	10,30
P1.1	31,58	30,60	15,01	3,26	1,06	0,26	<0,1	0,053	16,50
P1.2	35,54	33,37	12,67	2,36	2,02	0,39	<0,1	0,054	13,56
P1.3	37,21	33,00	10,27	1,82	2,31	0,31	<0,1	0,050	14,30
P1.4	37,70	31,55	10,80	3,01	3,18	0,69	<0,1	0,053	12,14
P1.7	34,30	30,10	12,70	2,30	2,81	0,69	<0,1	0,049	10,00
P2.1	30,98	36,58	15,09	1,50	0,72	0,18	<0,1	0,054	13,07
P2.3	35,70	31,70	11,09	3,20	2,06	0,38	<0,1	0,054	15,09
P2.4	38,01	30,50	11,00	3,07	3,22	0,31	<0,1	0,053	13,00
P2.5	40,37	31,00	9,22	3,04	2,90	0,30	<0,1	0,053	10,49
P2.6	33,00	31,85	15,00	2,70	3,22	0,51	<0,1	0,054	10,57
P2.7	38,70	30,05	12,20	2,00	4,01	0,59	<0,1	0,041	10,80
SC-1	49,00	23,50	9,75	2,75	2,67	1,30	0,14	0,65	10,15

QUADRO 7 - Resultado de análises químicas.

1 TIPOS DE DEPÓSITOS

1.1 Depósitos Residuais

1.1.1 Geologia Local

Os depósitos residuais estão localizados nas partes superiores da Serra da Faquinha, que é constituída por pequenos morros isolados, tabuliformes ou convexos, destacando-se o Morro do Sapecado, com 1.072 m, como o ponto mais elevado da região. Esses relevos residuais mantêm-se ressaltados na paisagem em virtude de uma cobertura superficial detrito-laterítica, localmente com espessura superior a 1,5 m, resultante possivelmente da desagregação de uma antiga superfície de aplainamento (Superfície Sul-Americana, King 1956).

A área apresenta rochas da Formação Serra Geral (JKsg), Unidade Franca (Kf) e sedimentos cenozóicos (Figura 14). A Formação Serra Geral compreende um conjunto de derrames de basaltos toleíticos, entre os quais se intercalam arenitos silicificados. Os derrames apresentam-se quase que totalmente alterados, destacando-se veios e fissuras preenchidas por caulinita (cor clara) e, às vezes, esmectita (cor esverdeada), como ilustram as fotos 16 e 17.

A Formação Serra Geral encontra-se recoberta pela Unidade Franca através de contato interdigitado. Esta unidade é composta por uma seqüência detrítica, com espessura superior a 10 m, representada por um pacote de sedimentos arenosos, com matriz argilosa, contendo níveis conglomeráticos, principalmente na porção basal. Os arenitos são de cor avermelhada e amarelada, de granulação fina a média, exibindo, às vezes, estruturas cruzadas acanalada e planar (Figura 8).

Na superfície do terreno, ocorre uma cascalheira de natureza elúvio-coluvionar formada por seixos de quartzo e quartzito, às vezes cimentada por material ferruginoso. Sua espessura é superior a um metro, principalmente nas porções elevadas da área, nas cotas acima de 1.000 m.

1.1.2 Tipologia

As argilas esmectíticas que ocorrem na Serra da Faquinha são produtos remanescentes da alteração de derrames basálticos da Formação Serra Geral, preservados ainda devido às condições geomorfológicas locais.

As características texturais e estruturais desses derrames e as condições paleoclimáticas favoreceram a geração de tais argilas. Isto se deve, em parte, à sua

Kf	Unidade Franca		SF 1/4	Furo de sondagem com amostras analisadas.
JKsg	Formação Serra Geral			Amostras de afloramento
JKb	Formação Pirambóia e Botucatu		SP 1	Perfil de alteração
				Ocorrências de argilas esmectíticas

FIGURA 14-Mapa de localização da área - Serra da Faquinha.

pouca espessura, possível decorrência do posicionamento da região em áreas marginais da Bacia do Paraná, onde o vulcanismo foi menos intenso em relação às partes centrais da bacia. A porção superior dos derrames apresenta geralmente aspecto melafírico resultante da presença de amígdalas e vesículas, algumas parcialmente preenchidas por argilominerais. Este nível contém normalmente grande quantidade de material vítreo.

O estudo dos perfis alteríticos da Serra da Faquinha (Figuras 15 e 16), considerando a sua evolução morfológica e a mineralogia do material argiloso, sugere que o processo de alteração dos basaltos dessa área desenvolve-se em três estágios principais. O primeiro estágio (estágio deutérico ou pré-meteorico) consiste na percolação de fluidos hidrotermais através de canais preferenciais ao redor dos quais evoluem sistematicamente halos de alteração com a formação predominante de caulinita, enquanto os vazios (vesículas e amígdalas) se apresentam colmatados por assembléias mineralógicas (argilominerais do grupo das esmectitas, clorita). O segundo estágio (estágio intempérico ou meteorico) é caracterizado pela formação de esmectita sob condições climáticas não-lixiviantes, possivelmente áridas a semi-áridas. O terceiro estágio (estágio caulínítico) caracteriza-se pela degradação da esmectita que se transforma em caulinita, e pela formação de goethita e gibsitita.

O Quadro 8 traz uma síntese dos principais estágios de geração de argilominerais e sua paragênese associada na região de Franca.

Como resultado da atuação desses processos, têm-se a formação de material residual, poroso, composto por uma mistura de esmectita e caulinita, e secundariamente ilita.

Entretanto, em vários pontos da Serra da Faquinha constatou-se a presença de basalto ainda não totalmente alterado (Figura 8). Situação semelhante a esta ocorre nas rochas vulcânicas da região de Sacramento (MG), nas quais os processos intempéricos levaram à formação de depósitos irregulares de argilas nontroníticas.

Este tipo de mineralização contrasta com as demais áreas de ocorrência de rochas basálticas, em que o tipo de alteração mais comum é a monossialitização, sendo a caulinita o argilomineral predominante. Segundo Pedro (1966), a monossialitização é controlada principalmente por um alto índice pluviométrico (superior a 500 mm anual) e pela temperatura média da área.

Evidências de fenômenos hidrotermais também são observadas na região. Caracterizam-se pela presença de veios de caulinita e esmectita que seccionam o basalto, como verificado no perfil (SP-2) do Morro do Sapecado..

Os veios caulíníticos ocorrem com frequência ao longo de todo o perfil de alteração, mostrando geralmente certo paralelismo entre si.

FIGURA 15 - Perfil de alteração da Fazenda do Pontal (SW da Serra da Faquinha). Localização de amostras orientadas.

FIGURA 16 - Perfil de alteração do Morro do Sapecado (NE da Serra da Faquinha).
Localização de amostras orientadas.

UNIDADES GEOLÓGICAS	IDADE	ESTÁGIOS		
		DEUTÉRICO/ HIDROTHERMAL	INTEMPÉRICO	SEDIMENTAR
ALUVIÕES	TQ
COBERTURAS SUPERFICIAIS				
	Ks
UNIDADE FRANCA	Ki			
FORMAÇÃO SERRA GERAL	J			
DEPÓSITOS GERADOS		<p>FASE DE ALTERAÇÃO DEUTÉRICA - HIDROTHERMAL (JK): associada ao vulcanismo basáltico Serra Geral - Possibilidade de geração posterior de caulinita, relacionada ao vulcanismo alcalino do Cretáceo Superior.</p>	<p>1º FASE (I) DE ALTERAÇÃO: relacionada a exposição de basalto em clima árido/semi-árido.</p> <p>2º FASE (II) DE ALTERAÇÃO (TQ): relacionada a exposição de basaltos e sedimentos sob condições de sazonalidade climática seca e úmida (craquelamento detrítico-lateríticas) e condições quentes e úmidas tropicais (perfis de alteração atuais).</p>	<p>FASE I: transporte e sedimentação de argilas em paleoambientes da Unidade Franca (K).</p> <p>FASE II: transporte e sedimentação de argilas em aluviões quaternários.</p>

QUADRO 8 - Principais estágios de geração de argilominerais e paragênese associada na região de Franca

A configuração de veios e fissuras na rocha tornou-se a observação geológica mais comum, indicadora de existência de um processo hidrotermal (Velde 1985).

Em lâminas delgadas do material alterítico (perfis SP-1 e SP-2), foi possível caracterizar os constituintes mineralógicos, locais específicos de alteração e suas relações a partir de amostras não perturbadas e orientadas, como ilustrados nas Fotos 18, 19 e 20.

Observa-se que o material conserva ainda as estruturas originais da rocha parental. O processo de alteração levou à geração, por neogênese ou transformação, de materiais secundários, especialmente os argilominerais pertencentes aos grupos da esmectita e caulinita. Estes ocorrem geralmente na forma de produtos criptocristalinos, muitas vezes associados a oxi-hidróxidos de ferro, que obliteram, em parte, as características ópticas, dificultando sua identificação (Fotos 21 e 22).

Segundo Millot (1964), os depósitos argilosos residuais resultantes da alteração de rochas vulcânicas podem-se originar tanto por processos intempéricos quanto hidrotermais.

As rochas vulcânicas são facilmente afetadas pelos processos de alteração, devido principalmente à abundância de materiais amorfos como o vidro. Em ambientes aquosos, o vidro vulcânico é mais vulnerável que os silicatos cristalizados, resultando muitas vezes em importantes depósitos de argilas. A transformação de vidro em esmectita resulta na produção excedente de sílica, a qual pode ser removida em soluções ou cristalizada intersticialmente como quartzo microcristalino.

O clima e as características texturais e mineralógicas da rocha vulcânica exercem papel decisivo na formação das esmectitas. Em condições climáticas tropicais úmidas, tais rochas podem-se alterar diretamente em caulinita ou em oxi-hidróxidos metálicos (Fe, Al). A alteração intempérica atua, portanto, mais rapidamente nas zonas mais fraturadas e melaíricas, que favorecem a percolação de soluções drenantes e o contato destas com os minerais parentais (plagioclásio e piroxênio) através de fraturas e fissuras.

1.1.3 Estimativa de Reserva

O depósito da Serra da Faquinha possui uma reserva geológica de aproximadamente 1 milhão m³ de material silte-argiloso composto por esmectita (50%), caulinita (40-45%) e ílita (5-10%).

Para o cálculo de reserva, considerou-se a faixa de exposição do material, em torno de 22 m de largura, distribuído ao longo de escarpa da Serra da Faquinha (Figura 14). A espessura média do nível mineralizado é de cerca de 2,3 m e foi obtida através de seções e perfis em afloramentos ao longo das encostas da serra.

1.2 Depósitos Sedimentares

1.2.1 Geologia Local

Os depósitos sedimentares estão associados à Unidade Franca, correspondendo às ocorrências de Restinga e Pedregulho (Figuras 17 e 18). Esta unidade contém expressivas camadas de lamitos e lamitos arenosos, sobretudo na sua porção basal, constituída predominantemente por argilas esmectíticas. Em locais onde há percolação de águas meteóricas ou onde a drenagem é mais intensa, ocorre uma rápida lixiviação das bases (Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+) podendo formar caulinita, gibsita, ou mesmo goethita.

A geologia da área de Restinga compreende basicamente a Formação Serra Geral (JKsg) e a Unidade Franca (Kf), conforme ilustra a Figura 9.

A Formação Serra Geral apresenta derrames de basaltos, de cor cinza-escuro a negra, afaníticos, com fraturas subverticais de contração dividindo a rocha em colunas. A parte superior do derrame mostra aspecto melafírico com vesículas e amígdalas, parcial ou inteiramente preenchidas por calcedônia, quartzo e nontronitas. Intercalados aos derrames, ocorrem arenitos com estruturas tipicamente dunares e parcialmente silicificados.

Sobre os basaltos ocorre a Unidade Franca, formada por uma sequência de rocha areno-lamítica com intercalações de níveis rudáceos. Esta unidade inicia-se por um paraconglomerado (Foto 10) composto por seixos de basalto, clastos de lamito e arenito silicificado, em matriz arenosa avermelhada, que passa gradativamente para arenito avermelhado fino a médio, com feições de estratificação cruzada. Sobreposto a este, ocorre uma camada de lamito arenoso e argilito, creme-claro e aspecto ceroso (Foto 23), formado essencialmente por argilominerais do grupo das esmectitas (horizonte mineralizado), e que grada para arenitos avermelhados de granulação fina a média, com estruturas cruzadas, intercalando-se com níveis conglomeráticos e lamíticos (Figura 9). Recobre toda a sequência material coluvionar areno-conglomerático, contendo freqüentemente drusas de quartzo.

O contexto geológico das ocorrências de Pedregulho é similar ao de Restinga, sendo caracterizado pelas rochas da Formação Serra Geral (JKsg) e da Unidade Franca (Kf) e por sedimentos cenozóicos (indiferenciados), conforme ilustra a Figura 7.

A parte basal da sequência inicia-se pelos basaltos da Formação Serra Geral, de composição toleítica, cor cinza a negra, afaníticos, tendo no topo estruturas amigdaloidais e vesiculares, parcialmente preenchidas por calcedônia, calcita e nontronita. Intercalados aos derrames, têm-se arenitos silicificados com características eólicas semelhantes aos da Formação Botucatu, de espessura variando de alguns metros a mais de 20 m.

Baseado em IPT (1984)

0 1 2 km
ESC. 1:50000

Kf Unidade Franca
JKsg Formação Serra Geral

● Amostras de afloramento
▲ Ocorrências de argilas emectíticas

FIGURA 17-Mapa de localização da área - Restinga.

Kf Unidade Franca
 JKsg Formação Serra Geral

TS/F5
 Furo de sondagem

TS/F5
 Furo de sondagem com amostras analisadas

● Amostras de afloramento

▲ Ocorrências de argilas esmectíticas

FIGURA 18- Mapa de localização da área - Pedregulho.

Sobreposta à Formação Serra Geral, ocorre sequência detrítica, com espessura de aproximadamente 40 m na área, representada pela Unidade Franca, abrangendo genericamente dois conjuntos litofaciológicos distintos: um basal areno-pelítico e um superior areno-rudáceo.

O conjunto basal sobrepõe-se, através de contato concordante, a arenitos e basaltos da Formação Serra Geral. Compreende um pacote pelítico caracterizado pela alternância de fácies lamíticas, lamítico-arenosas e arenitos muito finos e finos a médio, geralmente maciços, com espessura da ordem de 20 m (Foto 24). Truncando a sequência anterior, ocorre nos limites da área um pacote areno-rudáceo com espessura superior a 15 m, destacando-se expressivos corpos conglomeráticos polimíticos, de espessura métrica.

Capeam a Unidade sedimentos areno-rudáceos cenozóicos com espessura variável, atingindo 15 m próximo ao trevo de Pedregulho, parcialmente laterizados, destacando-se expressivos corpos polimíticos.

1.2.2 Tipologia

A sedimentação da Unidade Franca é essencialmente detrítica com contribuição autógena subordinada (neoformação). As camadas lamíticas correspondem provavelmente às fácies mais distais de leques aluviais, estando associadas a processos de fluxo de massa (Pedregulho). Por outro lado, o depósito de Restinga estaria relacionado com uma pequena bacia lacustre, onde prevaleceram condições ambientais de baixa energia, permitindo a deposição de material mais homogêneo, predominantemente argiloso (Fotos 23 e 25)

A mineralogia destes sedimentos é constituída principalmente por argilomineral do grupo das esmectitas, e secundariamente por illita e caulinita.

A illita é um argilomineral frequente nos lamitos arenosos. A sua origem é provavelmente detrítica, tendo como área-fonte as rochas do embasamento cristalino (Grupo Canastra), onde predominam quartzitos com quantidades apreciáveis de mica.

A caulinita também ocorre nesses sedimentos, dominando localmente nos lamitos arenosos. Constataram-se, através de microscopia eletrônica de varredura (MEV), dois tipos morfológicos: o primeiro é composto por pequenos cristais pseudo-hexagonais que gradam a massas irregulares e estariam associados ao aporte de sedimentos à bacia de sedimentação, sendo portanto de origem detrítica. O segundo, representado por placas hexagonais de maior tamanho, com aspecto de fole de acordeão (Foto 26), estaria relacionado com a percolação de águas ligeiramente ácidas. Este tipo de caulinita seria de origem autógena.

As esmectitas presentes nas fácies lamíticas, analisadas através de MEV, revelaram também dois tipos morfológicos: o primeiro constituído de finas placas de bordos arqueados (Foto 27) e o segundo com aspecto esponjoso característico, semelhante a favos de mel (Foto 28).

As esmectitas de placas recurvadas seriam resultantes do aporte do material fino durante a sedimentação, portanto detrítica (Pedregulho). As rochas vulcânicas basálticas seriam a área-fonte, como evidenciado pelo tipo de argilomineral presente, a nontronita.

As esmectitas de aspecto esponjoso, mostrando feições mais delicadas, dificilmente resistiriam ao transporte e processos deposicionais, sem que isto culminasse com a degradação de suas formas. Estas argilas seriam então geradas por processos de neoformação (Restinga). Este tipo de argila tem forte semelhança com as esmectitas neoformadas de "Clay Spur" do Wyoming (EUA).

Segundo Millot (1964), no processo de neoformação os argilominerais são formados a partir da combinação de íons em solução em ambiente de sedimentação. Os ambientes lacustres, principalmente em regiões de climas áridos a semi-áridos, são favoráveis à geração de esmectitas autógenas. As águas devem ser calmas e o afluxo de íons, predominantemente Mg^{++} , Ca^{++} e Na^{+} .

Este modelo genético atende satisfatoriamente às características faciológicas, mineralógicas e químicas do jazimento de Restinga, salientando-se que, durante a existência do lago Restinga, ainda havia atividades vulcânicas na região, o que não descarta uma contribuição de material vulcânico (cinzas) na formação do depósito.

1.2.3 Estimativa de reserva

O depósito de Restinga é constituído por argilitos e lamitos de cor creme, intercalados com arenitos avermelhados de granulação fina a média. As camadas pelíticas, compostas predominantemente por argilas do grupo das esmectitas, têm distribuição relativamente homogênea numa área de aproximadamente 20 ha, conforme constatado em perfis, e a sua espessura média é em torno de um metro (Figura 9).

Com base nestes valores, pode-se estimar para o depósito de Restinga uma reserva geológica da ordem de 200.000 m³. Considerando a densidade da argila de 2,2 g/cm³, valor normalmente adotado para as argilas do Vale do Paraíba (Taubaté), tem-se uma tonelagem estimada em 440.000 t.

O outro depósito sedimentar localizado nas proximidades de Pedregulho é composto predominantemente por camadas de lamitos arenosos que se intercalam com arenitos finos. A sua distribuição na área é relativamente homogênea, conforme constatado em sondagens à trado, e espessura variável, atingindo o máximo de 4 m.

Este depósito foi avaliado em 2,5 milhões m³ de rocha lamítica com teores médio sem torno de 48% de argila, 36% de silte e 16% de areia. A mineralogia da fração argila é dada pela esmectita (50-55%), illita (40%) e caulinita (0-10%).

Para o cálculo de reserva, considerou-se a área de influência dos furos de sondagem realizados na porção inferior da área, entre os córregos Indaiá e Cascata (Figura 18), numa área de 170 ha com uma espessura média de 2,3 m.

2 CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA

2.1 Generalidades

A propriedade físico-química e tecnológica mais importante das esmectitas sódicas é a de apresentar, quando em suspensão aquosa a 6% (21 g de argila em 350 cm³ de água destilada), viscosidade plástica igual ou superior a 8 cP, ambas medidas em viscosímetro Fann - 35, a 300 e 600 rpm (Souza Santos 1975). As esmectitas não-sódicas, quando dispersam em água, floculam e, portanto, apresentam viscosidades aparentes inferiores a 2 cP.

Uma argila que satisfaça aos valores mínimos das especificações de viscosidades aparente e plástica poderá ter diversas aplicações industriais, principalmente como agente tixotrópico de fluidos de sondagem de poços e como agente aglomerante de areias de fundição e finos de minérios (Zandonadi *et al.* 1970, Zandonadi 1972).

Com base nesse pressuposto, realizaram-se ensaios visando à transformação das argilas policatiônicas em esmectitas sódicas por meio de tratamento adequado com compostos de sódio. Esta transformação é verificada através da determinação das viscosidades de suspensão da argila tratada.

Para esta finalidade, selecionaram-se três amostras compostas de material argiloso (SC-1, R-2, PC-1), representativas dos diferentes jazimentos. A amostra SC-1 (Serra da Faquinha) refere-se ao produto da alteração dos basaltos da Formação Serra Geral na Serra da Faquinha (Figura 14, Quadro 4). A amostra R-2 (Restinga) corresponde a um pacote de rochas lamíticas posicionado sobre os derrames da Formação Serra Geral (Figura 17, Quadro 5). A amostra PC-1 (Pedregulho) está associada à uma sequência areno-pelítica relacionada com a unidade suprabasáltica nas imediações de Pedregulho (Figura 18, Quadro 6).

O Quadro 9 mostra as variações de viscosidades aparente e plástica dessas amostras e os índices obtidos com a argila de Boa Vista(PB), que serve como referência.

AMOSTRAS	“In Natura” (Sem adição Na ₂ CO ₃)		Adição de 50meq de Na ₂ CO ₃ /100g de argila		Adição de 75meq de Na ₂ CO ₃ /100g de argila		Adição de 100meq de Na ₂ CO ₃ /100g de argila		Adição de 150meq de Na ₂ CO ₃ /100g de argila	
	Viscosidade (cP)		Viscosidade (cP)		Viscosidade (cP)		Viscosidade (cP)		Viscosidade (cP)	
	Aparente	Plástica	Aparente	Plástica	Aparente	Plástica	Aparente	Plástica	Aparente	Plástica
Restinga	1,7	1,5	2,0	2,0	4,0	3,0	4,5	4,0	6,0	4,0
Pedregulho	3,5	3,0	4,0	3,5	4,5	4,0	5,0	4,0	5,0	4,0
Serra da Faquinha	3,5	3,0	5,0	3,5	5,0	3,5	7,0	4,0	8,0	4,0
Boa Vista (*)	1,7	1,7	22,0	7,4	31,0	3,6	32,0	2,0	25,6	1,0

QUADRO 9 - Variações das viscosidades de suspensões aquosas a 6% de argilas esmectíficas tratadas com quantidades crescentes de carbonato de sódio (Na₂ CO₃). (*) Souza Santos (1976)

2.2.1 Argila esmectítica de Restinga

A amostra R-2 foi submetida a ensaio preliminar de ativação alcalina, através de tratamento com carbonato de sódio (Na_2CO_3), e a ensaio para determinar a sua capacidade de troca catiônica. O método adotado para a medida da CTC foi o acetato de sódio, cujo ensaio revelou valores em torno de 65 meq/100 g de argila, sendo o Mg e o Ca os cátions trocáveis (Zandonadi 1972).

Estes resultados preliminares permitem deduzir que as argilas esmectíticas de Restinga são suscetíveis à troca iônica, transformando-se, com relativa facilidade, em uma argila ativada, com probabilidade de usos industriais diversos.

Entretanto, no presente trabalho, não foram executados os ensaios tecnológicos para usos industriais, visto que já existia estudo pormenorizado nesse sentido. Zandonadi (1972) caracterizou tecnologicamente a argila de Restinga, juntamente com outras argilas nontroníticas brasileiras, comparando os seus resultados com a argila de Boa Vista (PB) e a do Wyoming (EUA).

Aqui neste estudo consideram-se os resultados dos ensaios de caracterização tecnológica obtidos por Zandonadi (*op.cit.*) para a argila de Restinga.

Esta argila foi testada como agente tixotrópico de fluidos de perfuração, agente aglomerante de areias de moldagem em fundição, agente aglomerante na pelotização de finos de minérios, e agente descorante de óleos vegetais e minerais. Fazem-se, a seguir, algumas considerações sobre os estudos tecnológicos efetuados e os resultados obtidos com a argila de Restinga.

a) Agente tixotrópico de fluidos de perfuração

Para esta finalidade, determinam-se diversos característicos, destacando os seguintes: viscosidade aparente, viscosidade plástica, limite de escoamento, resistência inicial e final do gel e rendimento.

Grim (1962), Stefan (1966), Zandonadi *et al.* (1970) e Souza Santos (1976) descreveram em detalhe os métodos de estudo para este uso. As especificações para os característicos desejados de uma argila esmectítica sódica foram fixados pelo American Petroleum Institute (1962 *apud* Zandonadi 1972) e adotadas pela Petrobrás (1981).

Resultado: O Quadro 10 apresenta os valores obtidos pela amostra de Restinga e os compara com os resultados das amostras do Wyoming (*Volclay*) e as especificações da Petrobrás. A amostra Restinga, na concentração de 12%, atende aos valores especificados para viscosidades, limite de escoamento e filtrado, mas rendimento médio, isto é, pode fornecer de 6 a 11,5 m³/t,

ENSAIOS	Concentração da suspensão		Viscosidade (cP)		Limite de escoamento (g/100cm ²)	Resistência do gel (g/100cm ²)		Filtrado após 30 min. (ml)	Espessura do bolo ("filter cake") (cm)	Rendimento (m ³ água/t)
AMOSTRAS	Para o rendimento (%)	Para os ensaios (%)	Aparente	Plástica		Inicial	Final			
Restinga	12,0	12,0	15,0	7,0	16,0	20,0	40,0	16,4	0,4	8,3
Volclay (Wyoming)	6,4	6,0	6,0	10,0	8,0	10,0	28,0	12,6	0,2	15,6
Especificações Petrobrás	--	--	15,0	4,0 (min.)	3,0 (máx.)	--	--	18 (máx.)	--	16 (min.)

QUADRO 10 - Resultados analíticos comparativos de argilas esmectíticas como agente tixotrópico de fluídos de perfuração, após tratamento com Na₂CO₃.

ENSAIOS	Característicos a verde (corpos de prova úmidos)						Característicos a seco (corpos de prova secos a 110°C - 3h)		
AMOSTRAS	Umidade (%)	Permeabilidade (AFS)	Tensão de ruptura a compressão (Kgf/cm ²)	Deformação (%)	Escoabilidade (AFS)	Dureza (AFS)	Permeabilidade (AFS)	Tensão de ruptura a compressão (Kgf/cm ²)	Dureza (AFS)
Restinga	2,90	82	0,60	1,20	74	76	102	2,11	2,00
Volclay (Wyoming)	2,80	73	0,85	0,90	88	85	80	3,02	5,00
Especificações do IPT	2,50	40	0,30	1,00	60	60	60	3,00	25,00

QUADRO 11 - Resultados analíticos comparativos de argilas esmectíticas (na forma sódica) como aglomerantes de areias de moldagem em fundição.

com concentrações variando de 16,5% a 9,0%. O rendimento pode ser considerado como o característico mais interessante, do ponto de vista econômico e técnico.

b) Agente aglomerante de areias de moldagem em fundição

A argila para esta utilização deve, juntamente com a água, envolver cada grão de areia, formando um filme adesivo por adsorção. A ação principal da argila como ligante é manter os grãos fixos nos pontos de contato, dando coesão ao sistema, o que resulta em melhores condições de resistência mecânica. Os moldes formados devem apresentar resistência mecânica e deformação em perfeito equilíbrio para suportar peso sem sofrer deformações permanentes. Tanto a esmectita sódica como a cálcica se prestam a esta finalidade.

Souza Santos (1963), Brosch *et al.* (1965) e Jordão (1966) fazem uma revisão das argilas empregadas em fundição. As especificações foram fixadas pela American Foundrymen's Society - AFS (1963 *apud* Zandonadi 1972).

Resultado: O Quadro 11 traz os resultados obtidos com a amostra na forma sódica, comparando com os valores da amostra padrão e as especificações do IPT. A amostra Restinga, na forma policatiônica natural e na forma sódica, atinge valores especificados para os característicos a verde. Entretanto, os valores da tensão de ruptura à compressão e da dureza a seco (110°C) são inferiores aos mínimos especificados, sobretudo quando na forma sódica.

c) Agente aglomerante na pelletização de finos de minérios

A argila usada para esta finalidade deve conferir ao minério as seguintes propriedades: consistência, resistência à compressão, resistência ao choque térmico, entre outras. A bentonita do Wyoming (Volclay) serviu de referência para esse ensaio, já que esta argila sódica é normalmente utilizada como aglomerante na pelletização de finos de minério de ferro.

Grim (1962), Brosch (1966) e Souza Santos (1976) descrevem detalhadamente os métodos de ensaios para esta aplicação.

Resultado: O Quadro 12 apresenta os resultados obtidos e os compara com os valores da amostra padrão. Com base nesses dados, conclui-se que a amostra de Restinga não se presta a esta finalidade.

		Restinga			Vale do Paraiba			Volclay (Wyoming)		
Quantidade (%)		0.50	1.00	1.50	0.50	1.00	1.50	0.50	1.00	1.50
Pelotas úmidas	Resistência a compressão (Kgf/pel)	0.93	0.86	0.84	0.75	0.88	0.88	0.88	1.00	2.10
Pelotas secas a 110°C	Resistência a compressão (Kgf/pel)	1.60	2.50	2.20	0.50	0.78	1.00	1.81	2.45	3.00
Pelotas calcinadas a 1200°C	Resistência a compressão (Kgf/pel)	135	145	154	142	144	157	133	99	136

QUADRO 12 - Resultados analíticos comparativos de argilas esmectíticas (na forma sódica) como aglomerante de finos de minério de ferro.

AMOSTRAS	Cores do óleo obtidas após descoramento com argila ativada		Cores do óleo após descoramento com mistura 50% de argila ativada e natural		Cores do óleo obtidas após descoramento com argila natural	
	Vermelha	Amarela	Vermelha	Amarela	Vermelha	Amarela
Restinga	1,2	7,5	1,2	8,3	2,0	12,4
Vale do Paraiba	2,3	20,4	3,0	17,2	3,7	26,0
Volclay (Wyoming)	3,7	11,4	1,5	7,3	2,0	24,0
Tonsil	1,3	11,3	--	--	--	--

QUADRO 13 - Resultados analíticos comparativos de argilas esmectíticas ativadas para descoramento de óleo de soja na proporção argila:óleo - 16%.

Obs: Cor original dos óleos: vermelho - 8,4; amarelo - 27,0

d) Agente descorante de óleos vegetais e minerais

Para os ensaios de descoramento, utilizou-se amostra no estado natural (granulometria inferior a 200 mesh) e ativada por ácido sulfúrico. Os óleos submetidos à clarificação foram os vegetais (algodão, soja e de mamona) e o mineral (Petrobrás). Os ensaios foram executados pelo processo de contato, segundo os métodos da American Oil Chemists' Society, adotados pela Petrobrás (1981)

Grim (1962), Souza Santos (1963) e Zandonadi (1972) fazem um levantamento dos diferentes tipos de argilas descorantes e seus característicos, bem como dos processos de descoramento.

Resultado: Os ensaios tecnológicos revelaram que a amostra, após ativação com ácido sulfúrico, na proporção argila:óleo de 16%, serve como agente descorante de óleo de algodão, de soja, de mamona e lubrificante mineral. O óleo mineral teve sua cor determinada em colorímetro ASTM. A mistura de argila com e sem ativação serve como agente descorante, usando-se para isto a mesma proporção.

O Quadro 13 exhibe os resultados obtidos pela amostra de Restinga para descoramento de óleo de soja, e os compara com os valores de argila ativada importada (Tonsil Optimum) e nacional (Vale do Paraíba), ambas empregadas normalmente para esta finalidade.

2.2.2 Argila esmectítica de Pedregulho e Serra da Faquinha

As amostras PC-1 (Pedregulho) e SC-1 (Serra da Faquinha) foram tratadas também com carbonato de sódio, para a determinação das viscosidades aparente e plástica das suspensões aquosas a 6% da argila, como prova da capacidade de troca catiônica.

Como ilustra o Quadro 9, as duas amostras apresentam índices de viscosidades aparente e plástica semelhantes aos da amostra Restinga, porém ficaram abaixo do padrão estabelecido (Petrobrás 1981). Somente a amostra SC-1 revelou sensível aumento no índice de viscosidade após a adição de 100 meq de Na_2CO_3 , chegando a atingir viscosidade aparente de 8,0 cP, índice ligeiramente superior ao da amostra Restinga.

O baixo desempenho dessas argilas pode ser atribuído principalmente à presença de argilominerais não-esmectíticos (caulinita e illita) e a quantidades apreciáveis de resíduos (quartzo, hematita, goethita), como ilustra o Quadro 14.

PROCEDÊNCIA	TIPO DE OCORRÊNCIA	COR % fração argila	ANÁLISES		
			Composição mineralógica (ordem decrescente)	Análise química da fração fina (%)	Usos prováveis
Restinga	sedimentar (Unidade Franca-Ki)	creme 55% (<0,004mm)	- esmectita - illita - quartzo	SiO ₂ = 55,50 Al ₂ O ₃ = 22,00 Fe ₂ O ₃ = 3,90 TiO ₂ = 0,79 MgO = 5,00 CaO < 0,05 K ₂ O = 1,56 Na ₂ O = 1,40 P.F. = 9,70	(*) - agente tixotrópico para perfuração de poços, - agente aglomerante de moldagem para fundição, - agente descorante de óleos vegetais.
Pedregulho	sedimentar (Unidade Franca-Ki)	cinza amarronzado 48% (<0,004mm)	- esmectita - illita - caulinita - camada mista (não identificada) - quartzo - feldspato	SiO ₂ = 47,10 Al ₂ O ₃ = 24,90 Fe ₂ O ₃ = 6,80 TiO ₂ = 4,61 MgO = 2,30 CaO = 0,05 K ₂ O = 2,03 Na ₂ O = 1,70 P.F. = 10,30	A amostra não apresentou características adequadas para uso como argila expansiva.
Serra da Faquinha	residual (rochas basálticas)	marrom esverdeado e arroxado com níveis esbranquiçados 42% (<0,004mm)	- esmectita - caulinita - illita - camada mista - goethita - hematita - quartzo - feldspato	SiO ₂ = 49,00 Al ₂ O ₃ = 23,50 Fe ₂ O ₃ = 9,75 TiO ₂ = 0,65 MgO = 2,75 CaO = 0,14 K ₂ O = 2,67 Na ₂ O = 1,30 P.F. = 10,15	A amostra não apresentou características adequadas para uso como argila expansiva.

QUADRO 14 - Resultados analíticos comparativos de argilas esmectíticas da região de Franca. (*) Zandonadi (1972).

Esta grande variedade mineralógica reflete, em parte, o tipo de ambiente em que tais argilas foram geradas. A argila de Pedregulho, embora também de origem sedimentar, não apresenta pureza semelhante à de Restinga. O seu depósito está associado a estratos psamíticos e rudáceos, evidenciando o ambiente enérgico de sedimentação, o que resulta em um material muito impuro, constituído por uma mistura de argila, silte e areia.

Já a argila da Serra da Faquinha representa um depósito residual, bastante irregular, resultante da alteração de basaltos. Em algumas partes, do perfil há predominância de minerais residuais dos tipos caulinita e goethita.

Considerado o baixo desempenho apresentado por estas argilas, aliado às suas características mineralógicas e granulométricas, não foram executados ensaios tecnológicos para uso industrial.

CAPÍTULO VI

CONSIDERAÇÕES FINAIS

1 EVOLUÇÃO GEOLÓGICO-GEOMORFOLÓGICA DA ÁREA

A área estudada localiza-se na borda nordeste da Bacia do Paraná, no Estado de São Paulo, abrangendo sedimentos e magmatitos fanerozóicos, além de restrita faixa do embasamento cristalino, ambos recobertos por sedimentos cenozóicos.

Este posicionamento marginal confere à estratigrafia da área características peculiares. Isto pode ser verificado através do seu registro lítico, que se destaca pelo aumento geral da granulometria, evidenciando a continentalização faciológica, bem como o adelgaçamento generalizado das unidades litoestratigráficas em direção ao embasamento pré-cambriano (Grupo Canastra), chegando, às vezes, à omissão de unidades.

A região de Franca mostra, nas suas formas de relevo, evidências de ação dos ciclos erosivos, que atuaram entre o fim do Cretáceo e do Terciário Superior, quando ocorreu o levantamento generalizado do continente. As superfícies que compõem os setores de planalto mais destacados estão relacionadas com a fase erosiva que culminou com a formação da Superfície Sul-Americana (King 1956). Estas, quando da retomada da erosão (ciclo Velhas), foram sendo erodidas até as zonas silicificadas. Parte dos materiais rochosos que compunham esses antigos perfis foi transportada para níveis topográficos inferiores, e pode ser encontrada como material detrítico sobre os perfis de baixadas, na forma de colúvio nos sopés das Cuestas Basálticas.

As rochas vulcânicas básicas da Formação Serra Geral estiveram, nesse período, submetidas a ciclos de intemperismo e erosão. Os seus minerais primários sofreram alterações e transformações, originando produtos secundários. Processos de neogênese, durante a fase de aridez, deram origem a argilas esmectíticas.

A sequência suprabasáltica, portadora dos horizontes de argilas esmectíticas, e até então tida como Bauru/Itaqueri, foi considerada neste trabalho como Unidade Franca, de acordo com a reavaliação feita por Tanno *et al.* (1990), que a inseriram no Grupo São Bento. Esta revisão estratigráfica, feita a partir de observações de campo, tem como base a relação de contato da Formação Serra Geral com os sedimentos sobrepostos e suas características faciológicas.

Dessa forma, podem ser individualizados três ciclos geológicos distintos para o Grupo São Bento na região nordeste do Estado:

- a) **ciclo inferior sedimentar** (Triássico Superior/Jurássico Superior): abrange a deposição flúvio-eólica Pirambóia, Botucatu e caracteriza-se pela predominância da influência climática na deposição;
- b) **ciclo intermediário magmático** (Jurássico Superior/Cretáceo Inferior): corresponde ao evento magmático Serra Geral; e
- c) **ciclo superior tectono-sedimentar** (Cretáceo Inferior): caracteriza a progradação dos sistemas periféricos alúvio-desérticos da Unidade Franca à Bacia São Bento.

Nesse contexto, a revisão do posicionamento estratigráfico da sequência suprabasáltica na região de Franca reforça, de certo modo, a potencialidade da Unidade Franca, em face de seu relacionamento mais íntimo com o vulcanismo penecontemporâneo, visto que há estreita relação entre atividades vulcânicas e a formação de argilas esmectíticas, a exemplo de outros jazimentos conhecidos (Boa Vista, Campina Grande).

Embora as condições paleoambientais tenham sido favoráveis à geração de tais argilas, verifica-se, no entanto, predominância de sedimentos psamíticos e rudáceos, evidenciando o ambiente energético de deposição da Unidade Franca. Os níveis lamíticos mais relevantes estão associados a fluxos de lama (Pedregulho) e a bacia lacustre (Restinga).

2 TIPOLOGIA DOS DEPÓSITOS

Os depósitos de argilas esmectíticas que ocorrem na região de Franca foram classificados, de acordo com sua gênese, em dois tipos distintos: residual e sedimentar.

2.1 Depósito Residual

As argilas da Serra da Faquinha são produtos da alteração dos basaltos da Formação Serra Geral, resultante dos processos que atuaram sobre essas rochas a partir do Cretáceo, como o hidrotermalismo e o intemperismo.

A atuação dos processos hidrotermais pode ser verificada pela presença de níveis e fissuras preenchidas principalmente por caulinita, formando às vezes estruturas sub-horizontais. As soluções hidrotermais que afetaram as rochas basálticas podem ter relação com o último evento magmático que atuou na região, e é mais recente que o magmatismo

básico da Formação Serra Geral, portanto correlato ao magmatismo alcalino associado ao Grupo Bauru (Coimbra *et al.* 1981, Coutinho *et al.* 1981).

Já a alteração intempérica dos basaltos levou inicialmente à formação de argilas esmectíticas, de acordo com o clima reinante na época de sua exposição. Estas rochas serviram de área-fonte para a formação de depósitos sedimentares de esmectita da Unidade Franca. O clima naquele período pode ser considerado como semi-árido a árido.

Posteriormente, essas argilas sofreram processo de degradação com as mudanças nas condições climáticas, quando o clima se tornou mais úmido, o que possibilitou a geração de caulinita e goethita.

A alteração intempérica que ocorreu na região tem caráter predominantemente químico, como evidenciado pelas modificações exibidas pela rocha matriz, que se traduzem pela geração de produtos secundários por neogênese. A mineralização é bastante heterogênea, refletindo em parte a ação dos processos de alteração e os aspectos texturais e mineralógicos da rocha basáltica (conteúdo de material vítreo).

Nas partes mais bem drenadas, sobretudo no horizonte superior do perfil, a esmectita é solubilizada, liberando a sílica em solução e precipitando compostos ferruginosos, principalmente nas fraturas e diáclases, e no topo do perfil.

Nos perfis estudados (SP-1 e SP-2) não se constatou a presença de rocha vulcânica sã, o que dificultou, em parte, a visualização das fases de transformação. Da mesma forma, a ausência de rochas encaixantes no topo e na base dos perfis não permitiu definir as relações de contato, constatando-se apenas a presença de uma cobertura coluvionar detrítico-laterítica, sobreposta ao perfil alterítico. Em geral, a base do perfil é constituída por camadas de arenito intertrape, silicificado ou parcialmente alterado.

A cobertura detrítico-laterítica presente nas porções mais elevadas da região está relacionada com uma antiga superfície de pediplanação. Suas características físico-químicas mostram que este paleossolo foi gerado em ambiente com clima marcado por alternância de períodos chuvosos e períodos secos, sendo a estação seca a responsável pela deposição irreversível do ferro. A abundância de ferro, liberado pelas rochas basálticas, indica que na época da formação do solos a área-fonte estaria em posição topográfica mais elevada do que os relevos atuais da região.

Em termos gerais, as condições favoráveis para a geração efetiva de mineralizações supérgenas esmectíticas prendem-se às condições climáticas que propiciaram a alteração dos basaltos e conseqüente formação da esmectita; e, posteriormente, com as mudanças climáticas e o estabelecimento de novo gradiente hidrostático regional, ocorrem a transformação das esmectitas e a formação de ilita e caulinita.

2.2 Depósitos Sedimentares

Os depósitos sedimentares estão associados aos litotipos da Unidade Franca, correspondendo aos argilitos e lamitos arenosos, situados na sua porção basal, que afloram nas áreas de Restinga e Pedregulho.

Estes sedimentos são compostos predominantemente por argilas do grupo das esmectitas. Em locais onde há percolação de águas metéóricas ou onde a drenagem é mais intensa, ocorre rápida lixiviação das bases, possibilitando a formação de caulinita, goethita, ou mesmo gibsitita.

O depósito de Pedregulho é produto de sedimentação essencialmente detrítica com contribuição autógena subordinada. As camadas lamíticas representariam as fácies mais distais de leques aluviais, estando relacionadas com processos de fluxo de massas. As esmectitas constituíram, portanto, heranças detríticas provenientes dos perfis de alteração do substrato basáltico, sob condições climáticas de semi-aridez.

Já o depósito de Restinga foi gerado em ambiente mais perene, do tipo *playa lake* associado a leques aluviais, que permitiu a ação mais efetiva de processos de decantação, com possível contribuição de material vulcânico (cinzas). O horizonte pelítico, com 0,5 a 2,0 m de espessura, é composto de camadas de lamitos de cor creme-claro, tendo a esmectita como argilomineral principal.

Em termos gerais, o registro sedimentar é predominantemente detrítico de natureza areno-conglomerática, típico de zonas de borda de bacia, com a sedimentação argilosa associada a fácies distais de leques aluviais ou em depressões lacustres. Neste último caso, foram gerados depósitos de argilas mais puras, incluindo níveis com precipitação química.

3 CARACTERÍSTICAS TECNOLÓGICAS

As amostras Restinga (R-2), Pedregulho (PC-1) e Serra da Faquinha (SC-1) foram submetidas a tratamento com compostos químicos de sódio para a determinação das viscosidades de suspensões das argilas.

A amostra R-2 revelou bom desempenho através do tratamento com Na_2CO_3 , como pode ser verificado pelos valores apresentados pelas viscosidades aparente e plástica de dispersões aquosas de concentração 6%. O ensaio de capacidade de troca catiônica feito na amostra tratada com acetato de sódio atingiu o valor máximo de 65 meq/100 g de argila.

Estes resultados permitem deduzir que as argilas de Restinga, contendo em média aproximadamente 90% de esmectita, moídas até passar totalmente em peneira USS

nº 200, podem ser transformadas em esmectita sódica por solução concentrada de carbonato de sódio.

Os ensaios de caracterização tecnológica realizados por Zandonadi (1973) revelam que estas argilas poderão ser utilizadas industrialmente, de forma satisfatória, em fundição, como agente tixotrópico e como argila descorante, após ativação com ácido sulfúrico, de óleo de algodão, soja, mamona e lubrificante mineral.

Com base nesses resultados, pode-se concluir que as argilas de Restinga, após tratamento com carbonato de sódio, apresentam propriedades tecnológicas que atendem às especificações para uso industrial, com qualidades equivalentes às argilas de Boa Vista (PB), ou mesmo às importadas.

Por outro lado, as amostras PC-1 e SC-1 revelaram índices de viscosidades inferiores aos valores padrão estabelecidos (Petrobrás 1981). Apenas a amostra SC-1 atingiu índice de viscosidade aparente de 8,0 cP, após adição de 100 meq Na_2CO_3 .

O baixo rendimento destas amostras pode ser conferido principalmente à ocorrência de argilominerais não-esmectíticos (caulinita e illita) e a porções consideráveis de resíduos (quartzo, hematita, goethita, feldspato, etc.), conforme mostra o Quadro 14.

Em face destes resultados não foram realizados os ensaios tecnológicos para uso industrial.

4 RESERVAS DOS DEPÓSITOS

A pesquisa executada na região de Franca permitiu estimar as reservas dos depósitos argilosos das áreas de Restinga, Pedregulho e Serra da Faquinha. Para o cálculo, foram consideradas a área de exposição do material argiloso e a espessura média, dados estes obtidos através de mapeamento geológico e furos de sondagem.

a) Restinga

Este depósito apresenta uma reserva estimada em torno de 440.000 t, constituída basicamente por rochas lamíticas predominando a fração silte-argilosa, de composição essencialmente esmectítica. O material argiloso poderá ter diversas aplicações industriais, conforme mostra os seus ensaios tecnológicos, preferencialmente como argila ativada para o descoramento de óleos vegetais. Esta argila possui qualidade superior ao material similar atualmente explotado na região de Taubaté (Vale do Paraíba). A homogeneidade e pureza do horizonte esmectítico mineralizado favorece a sua lavra e beneficiamento.

As possibilidades de aproveitamento econômico do depósito Restinga são favoráveis, apesar de o mercado brasileiro ser muito competitivo para argila industrial tipo descorante.

b) Pedregulho

Este jazimento possui uma reserva de 2,6 milhões m³ constituída por lamitos arenosos contendo 48% de argila, 36% de silte e 16% de areia. A fração argila é composta por esmectita (50-55%), illita (40%) e caulinita (0-10%).

A amostra PC-1, coletada em sondagens a trado, revelou índices de viscosidades abaixo do padrão adotado (Petrobrás). Este resultado preliminar indica, contudo, que o material analisado não poderá ser utilizado, no seu estado natural, como argilas expansivas. As baixas viscosidades aparente e plástica podem ser atribuídas ao alto teor de minerais não reativos.

c) Serra da Faquinha

Este depósito apresenta uma reserva geológica da ordem de 1 milhão m³ de material silto-argiloso, composto por 42% de argila, 52% de silte e 6% de areia. Os argilominerais presentes são a esmectita (50%), caulinita (40-45%) e illita (5-10%).

A amostra SC-1 coletada em afloramentos no Morro do Sapecado (Serra da Faquinha) revelou também índices de viscosidade abaixo do padrão estabelecido. Portanto, o material analisado não poderá ser empregado, no seu estado natural, como argila expansiva.

5.CONCLUSÕES

O estudo realizado na região de Franca possibilitou a definição de dois tipos distintos de jazimentos de argila esmectítica: um residual, resultante da alteração supérgena de basaltos da Formação Serra Geral na Serra da Faquinha, e outro sedimentar relacionada com as fácies pelíticas da Unidade Franca.

O depósito residual é bastante heterogêneo, refletindo não só as características mineralógicas da rocha basáltica, mas também a superimposição de processos intempéricos cenozóicos, relacionados com a evolução geomorfológica da área.

Com referência ao modelo sedimentar, é importante destacar a ação dos processos responsáveis pelo transporte e deposição dos sedimentos da Unidade Franca, que

resultaram na geração de depósitos de argila. No ambiente onde predominava a ação de fluxo de massa, formaram-se estratos impuros, compostos por uma mistura de lamitos, lamitos arenosos e arenitos finos (depósito Pedregulho). Por outro lado, condições ambientais mais perenes permitiram a formação de depósito lacustre, representado por estratos argilosos mais homogêneos, provavelmente com contribuição de material vulcânico (depósito Restinga).

Quanto à qualidade do material analisado, os estudos laboratoriais demonstram que essas argilas, em seu estado natural, apresentam qualidade heterogênea e aproveitamento econômico restrito.

A argila de Restinga só poderá ser utilizada industrialmente após tratamento com carbonato de sódio (barrilha), que possibilitará a sua transformação em uma argila sódica com propriedades tecnológicas semelhantes às de Boa Vista(PB), ou mesmo às importadas.

Para uso como argila descorante, este material deverá sofrer ativação química (com ácidos inorgânicos fortes), já que *in natura* a sua atividade descorante é normalmente baixa.

Já os lamitos arenosos do depósito Pedregulho poderão eventualmente ter algum uso industrial, se submetidos a beneficiamento, para eliminação de seus conteúdos deletérios (grãos de quartzo, goethita) responsáveis, em grande parte, pelo baixo rendimento da amostra ensaiada.

Por outro lado, o depósito da Serra da Faquinha dificilmente poderá ser aproveitado economicamente. A baixa qualidade da argila e a sua localização nas encostas da serra, praticamente inviabiliza a sua exploração.

No tocante às reservas, o depósito Restinga pode ser considerado como de pequeno porte, mas com grandes possibilidades de aproveitamento econômico, em face da qualidade e homogeneidade de suas argilas e de sua localização no Estado de São Paulo, próxima aos centros industriais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, F.F.M. de. 1956. O Planalto Brasileiro da Bacia do Paraná. *Bol. Paul. Geol.*, 24, p. 3-34.
- ALMEIDA, F.F.M. de. 1964. Os fundamentos geológicos do relevo paulista. In: Instituto Geográfico e Geológico. *Geologia do Estado de São Paulo*. São Paulo, p. 169-263. (Boletim, 41).
- ALMEIDA, F.F.M. de. 1986. Distribuição regional e relações tectônicas do magmatismo pós-paleozóico no Brasil. *Rev. Bras. Geoc.*, v. 16, n. 4, p. 325-349.
- AMPIANS, S. G. 1985. Clays. In: UNITED STATES BUREAU OF MINES. *Mineral Facts and Problems*. Washington: US Government Print Office, p. 157-169. (BM. Bulletin, 675).
- ANDREWS, P.R.A. 1992. *Bentonite, fuller's earth and kaolinitic clays*. Ottawa: Canmet, Energy, Mines and Resources Canada. (Summary Report nº 17).
- BARCELOS, J.H. 1984. *Reconstrução paleogeográfica da sedimentação do Grupo Bauru baseada na sua redefinição estratigráfica parcial em território paulista e no estudo preliminar fora do Estado de São Paulo*. Rio Claro. 191 p. (Tese de Livre Docência apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista).
- BATES, F. 1962. Halloysite and gibbsite formations in Hawaii. *Clays and Clay Minerals*. v. 9, p. 315-328.
- BELLIENI, G. et al. 1983. Petrological and paleomagnetic data on the plateau basalt to rhyolite sequences of the southern Parana Basin (Brazil). *An. Acad. Bras. Cienc.*, v. 55, n. 4, p. 355-383.
- BELLIENI, G. et al. 1984. Vulcanismo ácido na Bacia do Paraná; estudos mineralógicos e petrográficos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 33, 1984. Salvador. *Boletim de resumos...* Salvador, SBG, p. 254-255.
- BERG, E.A.T. & SOUZA SANTOS, P. 1968. Ocorrências de argilas montmoriloníticas no estado do Paraná. *Mineração e Metalurgia*, v. 48, n. 283, p. 25-30.
- BIGARELLA, J.J. & ANDRADE, G.O. de. 1965. Contribution to the Brazilian quaternary. In: Wright Jr., H.E. & FREY, D.G. (Ed.) *International studies on the quaternary*. New York: Geological Society of America, p. 443-451 (GSA Special Paper, 84).
- BLATT, H. 1982. *Sedimentary petrology*. San Francisco. USA: W.H. Freeman and Company, 564 p.

- BRANDT NETO, M. *et al.* 1990. Argilominerais da Bacia de Taubaté, SP. In: JORNADAS CIENTÍFICAS DO IGUSP, 1990, São Paulo. *Boletim Especial...* São Paulo: IGUSP, p. 16-20.
- BROSCH, C. D. 1966. Argilas e bentonitas para pelotização de minério de ferro. *Cerâmica*, v. 12, n.47/48, 132 p.
- CABRAL Jr., M. *et al.* 1992. Revisão estratigráfica do Mesozóico no Nordeste do Estado de São Paulo. In: SIMPÓSIO SOBRE AS BACIAS CRETÁCEAS BRASILEIRAS. 2. 1992, Rio Claro. *Resumos Expandidos*, Rio Claro: UNESP, p. 134-136.
- CAILLÈRE, S. & HÉNIN, S. 1963. *Minéralogie des argiles*. Paris: Masson et Cie. Éditeurs. 355 p.
- CALDASSO, A.L.S. 1967. Geologia da argila de Boa Vista, Paraíba. *Bol. Soc. Bras. Geol.*, v. 16, n. 1, p. 5.
- CALDASSO, A.L.S. & ANDRADE, D.A. 1979. Novas considerações sobre a gênese e idade dos depósitos de argilas montmoriloníticas da Paraíba. In: SIMPÓSIO GEOLÓGICO DO NORDESTE, 1979, Natal. *Atas...* Natal: SBG, p. 619-626.
- CHAMLEY, H. 1989. *Clay sedimentology*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 623 p.
- COIMBRA, A.M. *et al.* 1981. Lavas fonolíticas associadas à Formação Bauru em São Paulo. In: SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOLOGIA, 3, 1981, Curitiba. *Atas...* Curitiba:SBG, v. 1, p. 324-327.
- CORDANI, U.G. & VANDOROS, P. 1967. Basaltic rocks of the Parana basin. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON GONDWANA STRATIGRAPHY AND PALEONTOLOGY, 1, 1967, Mar del Plata. *Proceedings...Problems in Brazilian Gondwana Geology*. Curitiba: Instituto de Geociências da Universidade Federal do Paraná, p. 207-231.
- COTTAS, L.R. 1977. *Geologia da área de Nuporanga-Batatais, SP: uma contribuição ao estudo do cenozóico paulista*. São Paulo, 143 p. (Dissertação de Mestrado apresentado ao Instituto de Geociências/USP).
- COUTINHO, J.M.V. *et al.* 1982. Lavas alcalinas analcímicas associadas ao Grupo Bauru (Kb) no Estado de São Paulo, Brasil. In: CONGRESSO LATINOAMERICANO, 5, 1981, Buenos Aires. *Actas...* Buenos Aires: SGM/ IUGS. v. 2, p. 185-196.
- DEL MONTE, E.; SILVA, R.B. da; SAAD, A.R. 1988. Ocorrências de argilas bentoníticas e aluminosas na região de Franca, S.P. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 35, 1988, Belém. *Anais...* Belém: SBG, v. 1, p. 227-241.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DA PRODUÇÃO MINERAL - DNPM. 1964. *Relatório da Diretoria sobre estudos de argilas montmoriloníticas de Sacramento (MG)*. Rio de Janeiro, p. 69-90. (DNPM. Boletim. 122)

- DEPARTAMENTO NACIONAL DA PRODUÇÃO MINERAL - DNPM. 1991. *Anuário mineral brasileiro*. Brasília: MME/DNPM.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DA PRODUÇÃO MINERAL - DNPM. 1993. *Sumário mineral*. Brasília: DNPM, v. 12.
- DUNOYER DE SECONZAC, G. 1969. *Les minéraux argileux dans la diagenèse. passage au métamorphisme*. 320 p. (Mém. Serv. Carte Géol. Als. Lor. Strasbourg. n.9).
- FRANCHI, J.G. et al. 1992. Argilas descorantes do Vale do Paraíba, estado de São Paulo, Brasil. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MINERAIS INDUSTRIAIS, 1, 1992, São Lourenço. *Anais...* São Lourenço, MG, p. 39-55.
- GOMES, C.S.F. 1988. *Argilas - o que são e para que servem*. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 457 p.
- GONÇALVES, N.M.M. 1987. *Transformações mineralógicas e estruturais relacionadas a alteração hidrotermal e intempérica de rochas vulcânicas básicas da Bacia do Paraná Setentrional (Região de Ribeirão Preto - SP, Brasil)*. São Paulo, 212 p. (Tese de Doutorado apresentada ao Instituto de Geociências/USP).
- GOPINATH, T.R. et al. 1979. Análise ambiental dos arenitos associados com bentonita da Boa Vista-Paraíba. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO NORDESTE, 9, 1979, Natal. *Atas...* Natal: SBG, p. 215-224.
- GOPINATH, T.R.; SCHUSTER, H.D.; SCHUCKMANN, W.K. 1981. Modelo de ocorrências e gênese da argila bentonítica de Boa Vista, Campina Grande, PB. *Rev. Bras. de Geoc.*, São Paulo, v.11, n. 3, p.185-192.
- GRIM, R.E., 1962. *Applied clay mineralogy*. New York: McGraw-Hill, 442 p.
- GRIM, R.E. 1968. *Clay mineralogy*. 2nd. ed. New York: McGraw-Hill, 596 p.
- GRIM, R.E. & GÜVEN, N. 1978. *Bentonite. Geology, mineralogy, properties and uses*. Amsterdam: Elsevier, 256 p (Development in Sedimentology, 24).
- GÜVEN, N. 1988. Smectites. In: Bailey, S. W. (Ed.), *Hydrous Phyllosilicates*. Miner. Soc. America, p.497-559. (Reviews in Mineralogy, 19).
- HARBEN, P.W. & BATES, R.L. 1990. Clays. In: *Industrial Minerals. Geology and World Deposits*. London: Industrial Minerals Division, p. 63-89.
- HASUI, Y et al. 1989. *Compartimentação estrutural e evolução tectônica do Estado de São Paulo*. São Paulo, 2 v., (IPT. Relatório, 27 394).
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO - IPT. 1981a. *Mapa geológico do Estado de São Paulo*; escala 1:500.000. São Paulo. 2 v., (IPT. Monografias, 6).

- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO - IPT. 1981b. *Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo*. São Paulo. 2 v., (IPT. Monografias. 5).
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO - IPT. 1986. *Pesquisa de argilas montmoriloníticas nas regiões de Franca e Pedregulho*. São Paulo. Pró-Minério/SICCT. (IPT. Relatório, 23 836).
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO - IPT. 1990. *Programa de desenvolvimento da indústria diamantária da região nordeste do Estado de São Paulo - diagnóstico preliminar*. São Paulo, 2 v. (IPT. Relatório. 28 611).
- JACKSON, M.L. 1959. Frequency distribution of clay mineral in major soil groups as related to factors of soil formation. *Clays and Clay Minerals*, n. 6, p. 133-143.
- JORDÃO, M.A.P. 1966. Argilas verdes de Sacramento como aglomerante de areias de moldagem para fundição. *Cerâmica*, v. 12, n. 47/48, p. 55.
- KING, L.C. 1956. A geomorfologia do Brasil Oriental. *Rev. Bras. Geogr.* Rio de Janeiro, v. 18, n. 2, p. 147-265.
- KRAUSKOFF, K.B. 1967. *Introduction to geochemistry*. New York: McGraw-Hill, 721 p.
- LIRA FILHO, D.P. 1973. *Perfil analítico da bentonita*. Rio de Janeiro DNPM/MME, 33 p. (Boletim. 4)
- MELFI, A.J. 1967. *Intemperismo de granitos e diabásios no município de Campinas e arredores, Estado de São Paulo*. São Paulo, 166 p. (Tese de Doutorado apresentada à FFCL/USP).
- MELO, M.S. & PONÇANO, W.L. 1983. *Gênese, distribuição e estratigrafia dos depósitos cenozóicos no Estado de São Paulo*. São Paulo: IPT. 74 p. (IPT. Monografias. 9).
- MILLOT, G. 1964. *Géologie des argiles*. Paris: Masson et Cie. Éditeurs. 499 p.
- MOREIRA, M.D. 1984. *Mineralogical and physico-chemical investigation of a montmorillonite clay from Bahia (Brazil)*. 95 p. (M.Sc.Thesis, University of Hull, USA).
- MOREIRA, M.D. 1986. Controle de qualidade de argila montmorilonítica de Vitória da Conquista (BA). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 34, 1986 Goiânia. *Boletim de Resumos*. Goiânia: SBG, p. 193.
- NEMECZ, E. 1981. *Clay minerals*. Budapest: Akadémiai Kiadó, 531 p.
- O'DRISCOLL, M. 1989. Bentonite: overcapacity in need of markets. *Industrial Mineral*. London. June 1989, p. 55-71. (A special review).

- PAIVA NETO, J.E. & NASCIMENTO, A.C. 1956. Argilas bentoníticas do terciário do Vale do Paraíba. São Paulo. *Boletim da Soc. Bras. de Geologia*, v. 5, n. 2, p. 5-15.
- PATERSON, S.H. & MURRAY, H.H. 1983. Clays. In: STANLEY, J.L. (Ed.) *Industrial mineral and rock*. 5th Edition. Baltimore, p. 585-651.
- PEDRO, G. 1966. *Essai sur la caracterisation géochimique des differents processus zonaux résultant de l'altération des roches superficielles*. Paris: C.R. Acad. Sci., 262 p.
- PETROBRÁS. 1981. *Especificações n.1398 e n.1446*. Rio de Janeiro: Petróleo Brasileiro S/A, 5 p.
- PONÇANO, W.L. 1981. O cenozóico paulista. In: ALMEIDA, F.F.M. de et al. *Mapa geológico do Estado de São Paulo*, escala 1:500 000, São Paulo, v. 1, p.82-96. (IPT. Monografias, 6).
- PONÇANO, W.L. et al. 1982. A Formação Itaqueri e depósitos correlatos no Estado de São Paulo. In: CONGRESSO BRASILEIRO de GEOLOGIA, 32, 1982, Salvador. *Anais...* Salvador: SBG, v.4, p. 1339-1350.
- PONÇANO, W.L.; SILVA, R.B.; ETCHEBEHERE, M.L.C. 1992. Avaliação preliminar do potencial diamantífero da região de Franca, SP. *Cadernos IG/Unicamp*, v. 2, n. 1, p. 54-89.
- RAMOS, N.A. & FORMOSO, M.L.L. 1975. Argilominerais das rochas sedimentares da Bacia do Paraná. Rio de Janeiro: Petrobrás/Cenpes. 72 p. (Publicação, 9).
- RANZANI, G.; PENTEADO, M.M.; SILVEIRA, J.D. da. 1972. *Concreções ferruginosas, paleossolos e a superfície de cimeira no Planalto Ocidental Paulista*. , São Paulo, Instituto de Geografia/USP, p. 1-28. (Geomorfologia, 31).
- RICCOMINI, C. 1989. *O rift continental do Sudeste do Brasil*. São Paulo, 256 p. (Tese de Doutorado apresentada ao Instituto de Geociências/USP).
- ROISENBERG, A.; GAMERMANN, N.; VIEIRA JR, N. 1984. Argilominerais em rochas basálticas inalteradas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 33, 1984, Rio de Janeiro, *Anais...* Rio de Janeiro: SBG, v. 4, p. 4241-4252.
- ROSS, C.S. & HENDRICKS, S.B. 1945. *Minerals of the Montmorillonite Group*. Washington, p. 23-79. (U.S. Geol. Surv. Prof. Papers, 205-B).
- RÜEGG, N.R. 1975. *Modelos de variação química na Província Basáltica do Brasil Meridional*. São Paulo, 215 p. (Tese de Livre Docência apresentada ao Instituto de Geociências/USP).
- SIDDIQUI, M.K.H. 1968. *Bleaching earths*. London: Pergamon Press, 86 p.
- SOARES, P.C.. 1973. *O mesozóico gondwânico no estado de São Paulo*. Rio Claro. (Tese de Doutorado apresentada à FFCL de Rio Claro).

- SOARES, P.C. & LANDIM, P.M.B. 1973. Aspectos geológicos da estratigrafia da Bacia do Paraná no seu flanco nordeste. In: CONGRESSO BRASILEIRO de GEOLOGIA, 27, 1973, Aracaju. *Anais...* Aracaju: SBG, v. 1, p. 243-256.
- SOARES, P.C. *et al.* 1973. Geologia do nordeste do Estado de São Paulo. In: CONGRESSO BRASILEIRO de GEOLOGIA, 27, 1973, Aracaju. *Anais...* Aracaju: SBG, v. 1, p. 282-296.
- SOARES, P.C. 1975. Divisão estratigráfica do mesozóico no Estado de São Paulo. *Rev. Bras. Geoc.* v. 5, n. 4, p. 229-251.
- SOARES, P.C. *et al.* 1980. Ensaios de caracterização estratigráfica do cretáceo no Estado de São Paulo: Grupo Bauru. *Rev. Bras. Geoc.* v. 10, n. 3, p. 177-185.
- SOUZA A. de. *et al.* 1984. Ocorrência de rochas intrusivas no Grupo Bauru. In: CONGRESSO BRASILEIRO de GEOLOGIA, 33, 1984, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro: SBG, v. 2, p. 816-820.
- SOUZA SANTOS, P. 1963. Análise térmica diferencial de argilas descorantes. *Boletim Técnico da Petrobrás*, v. 6, n. 2, p. 117-174.
- SOUZA SANTOS, P. & SANTINI, P. 1965. Ocorrências de argilas montmoriloníticas no Brasil. *Cerâmica*, v. 11, n. 44, p. 36-64.
- SOUZA SANTOS, P.S. 1975. *Tecnologia de argilas - aplicada às argilas brasileiras*. São Paulo: Edgard Blücher, 2 v.
- SOUZA SANTOS, P.S. 1976. *Estudo tecnológico de argilas montmoriloníticas do distrito de Boa Vista, município de Campina Grande, Paraíba*. São Paulo, 53 p. (IPT, Relatório, 862).
- SOUZA SANTOS, P. 1989. *Tecnologia de argila*. São Paulo: Edgard Blücher, v. 1.
- STEFAN, P. 1966. Métodos de ensaios de argilas e bentonitas para fluidos de perfuração de poços. *Cerâmica*, v. 12, n. 47/48, 256 p..
- SUGUIO, K. 1969. *Contribuição à geologia da Bacia de Taubaté*. São Paulo, 106 p. (Tese de Doutorado apresentada à FFCL/USP).
- TANNO, L.C. *et al.* 1990. Pesquisa de argilas esmeectíticas na região de Franca-Pedregulho, SP. São Paulo: Pró-Minério/SCTDE, 138 p. (IPT, Relatório, 28 697).
- TANNO, L.C. *et al.* 1992. Tipologia dos depósitos de argilas esmeectíticas da região de Franca, SP. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 27, 1992, São Paulo. *Resumos Expandidos*. São Paulo: SBG, v. 2, p. 13.
- TARDY, Y. 1969. *Géochimie des altérations. Etude des arenés et des eaux des quelques massifs cristallins d'Europe et d'Afrique* Strasbourg, 199 p. Mém. Serv. Géol. Als. Lor. n. 31.
- VELDE, B. 1985. *Clay minerals: a physico-chemical explanation of their occurrence*. Amsterdam: Elsevier, 427 p. (Developments in Sedimentology, 40).

- WEAVER, C.E. 1959. The clay petrology of sediments. *Clays and Clay Mineral.* v. 6, p. 154-187.
- WEAVER, C.E. & POLLARD, L.D. 1973. *The chemistry of clay minerals.* Amsterdam: Elsevier, 213 p. (Development in Sedimentology, 15).
- WEAVER, C.E. 1989. *Clay, muds and shales.* Amsterdam: Elsevier, 819 p. (Developments in sedimentology, 44).
- YAMAMOTO, J.K.; SUGUIO, K.; COIMBRA, A.M. 1977. Caracterização sedimentológica do perfil geológico entre Franca e Rifaina. In: SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOLOGIA, 1, 1977, São Paulo. *Atas...* São Paulo: SBG. p. 282-302.
- ZANDONADI, R.; SOUZA SANTOS, P.; LOURENÇO, O.B. 1970. Ensaio preliminares de laboratório de argilas montmoriloníticas visando a utilização industrial. *Cerâmica*, v. 16, n. 64.
- ZANDONADI, A.R. 1972. *Estudos tecnológicos das argilas nontroníticas brasileiras.* São Paulo, 243 p. (Tese de Doutorado apresentada ao Instituto de Química/USP).

DOCUMENTAÇÃO FOTOGRÁFICA

FOTO 1 - Sequência basal areno-lamítica da Unidade Franca, situada próximo ao Córrego da Cascata (Pedregulho). O topo do pacote está truncado por delgada cascalheira cenozóica.

FOTO 2 - Sequência superior areno-rudácea (fluxos de massa e lençóis de areia) da Unidade Franca (trevo de Pedregulho).

FOTO 3 - Detalhe do pacote rudáceo da foto anterior: paraconglomerado com seixos de quartzo, quartzito e basalto.

FOTO 4 - Cobertura conglomerática inconsolidada sobre sedimentos da Unidade Franca, encontrada nos patamares mais elevados do Planalto de Franca (acima de 1000 m), relacionada com a Superfície Sul-Americana.

FOTO 5 - Lamitos lacustres e arenitos eólicos interderrames da Formação Serra Geral (Serra de Rifaina).

FOTO 6 - Sedimentos rudáceos gerados nas porções apicais dos leques aluviais, truncando lençóis de areia (topo da Unidade Franca), próximo ao trevo de Pedregulho.

FOTO 7 - Conglomerado polimítico onde se destacam clastos de rochas feldspáticas e basaltos com fissuras preenchidas por caulinita.

FOTO 8 - Argilito lacustre constituído por argilas esmectíticas, aflorante na área de Restinga.

FOTO 9 - Veios hidrotermais de caulinita seccionando sedimentos alterados da Unidade Franca (Rod. Pedregulho-Igarapava, km 27).

FOTO 10 - Brechas basálticas (paleossolo) no contato da Formação Serra Geral com a Unidade Franca (Restinga).

FOTO 11 - Aspecto dos níveis encouraçados característicos das porções mais elevadas do Planalto de Franca (Serra da Faquinha), produto do desmantelamento parcial da Superfície Sul-Americana.

FOTO 12 - Aspectos geomorfológicos das "Cuestas Basálticas" na borda do Planalto de Franca, onde se observa a Superfície Sul-Americana rebaixada por nível planáltico mais jovem.

FOTO 13 - Feição geomorfológica do reverso das Cuestas Basálticas caracterizado localmente por relevo colinoso.

FOTO 14 - Platô testemunho na forma de mesas basálticas (Morro do Sapecado - Serra da Faquinha).

FOTO 15 - Porção setentrional da Serra da Faquinha recoberta pelos sedimentos da Unidade Franca.

FOTO 16 - Vista do perfil de alteração desenvolvido sobre rochas basálticas no Morro do Sapecado (Serra da Faquinha).

FOTO 17 - Aspecto do basalto alterado, destacando-se os veios esbranquiçados de caulinita sub-paralelos, gerados por processos hidrotermais (Morro do Sapecado).

FOTO 18 - Aspecto geral da rocha basáltica (SB-7), com detalhe para a textura onde se observam cristais (ripiformes) de plagioclásio inalterados (pl), cristais subhédricos de clinopiroxênio (px) e pseudomorfos de clinopiroxênio e/ou olivina argilizados. Nicóis paralelos. Aumento 80 X.

FOTO 19 - Detalhe da foto anterior, com destaque para a massa vítrea intersticial que se recristaliza em argilominerais do grupo das esmectitas (es), em contato com cristais de plagioclásio (pl), clinopiroxênio (px) e opacos. Nicóis paralelos. Aumento 200 X.

FOTO 20 - Aspecto geral da isoalterita de rocha basáltica (P1.3); destaca-se a formação de argilominerais (ka, es) a partir de minerais primários, com preservação de esqueletos (opacos). Aumento 80 X.

FOTO 21 - Isoalterita de basalto (P2.1) onde se observam a ferruginização do plasma argiloso, pseudomorfos de plagioclásio preservando a feição textural da rocha, e amígdala com esmectita (porção esquerda da foto). Nicóis paralelos. Aumento 80 X.

FOTO 22 - Fraturas milimétricas subparalelas ao topo do perfil (P2.4) preenchidas por esmectitas (es). Observam-se comumente pseudomorfos de plagioclásio (ka). Nicóis paralelos. Aumento 80 X.

FOTO 23 - Camada de lamito arenoso e argilito de cor creme clara e aspecto ceroso (Restinga).

FOTO 24 - Conjunto basal da Unidade Franca compreendendo lamitos arenosos e arenitos finos, próximo ao trevo de Pedregulho.

FOTO 25 - Vista parcial do depósito de Restinga, destacando-se as camadas de lamitos esmetíticos (R-2).

FOTO 26 - Micrografia (MEV). Caulinita "autígena" cristalizada na forma de "acordeon" associada aos lamitos arenosos da Unidade Franca (Pedregulho).

FOTO 27 - Micrografia (MEV). Esmeclitas detriticas constituídas por finas placas de bordos arqueados (Pedregulho). Aumento 6000 X.

FOTO 28 - Micrografia (MEV). Esmeclita de aspecto esponjoso semelhante a "favos de mel" (Restinga). Aumento 4000 X.